

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique



# MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

**Pour l'obtention du Diplôme de Master**

**Domaine :** Sciences et Technologie

**Filière :** Génie mécanique

**Parcours :** Master

**Spécialité:** Energétique

**Thème**

**Etude numérique de la charge de chaleur d'un  
matériau de changement de phase mousse  
métallique dans une unité de stockage thermique**

Préparé par :

LARICHI Ahmed

BACHOU Oussama

Soutenu publiquement le : 22/ 06/ 2024, devant le jury composé de :

M.cheikh samra	Maître de Assistant "B" (Univ. Ibn-Khaldoun)	Président
M.MEKROUSSI said	Maître de Conférences "Professeur" (Univ.Ibn-khaldoun)	Examineur
M.AKERMI Nacereddine	Maître de Conférences " A " (Univ.Ibn-khaldoun)	Examineur
M.KHALDI sabrina	Maître de Assistant "A" (Univ.Ibn-khaldoun)	Encadreur

Année universitaire : 2023 - 2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# Remerciements

En premier lieu on remercie الله, pour nous avoir donné la force et la patience pour accomplir ce modeste travail.

Derrière ce travail se cache la présence, le support et l'ouverture d'esprit de notre enseignante et promotrice Dr. KHALDI Sabrina. Nous la remercions de nous avoir encadré, orienté, aidé et conseillé et surtout pour sa confiance totale en nous et sa patience tout au cours de ce travail.

Notre profond respect va à notre enseignant Dr. CHEIKH Samra, Pour avoir accepté de présider le jury et d'apprécier la qualité de notre Travail.

Nous adressons nos sincères remerciements aux membres du jury Dr. MEKROUSSI Said et Dr. AKERMI Nacereddine de nous avoir fait l'honneur d'accepter de juger ce travail.

Nous exprimons également notre profonde gratitude à tous les enseignants du département de génie mécanique, à tous ceux et celles qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce travail.

Enfin, On voudrait remercier très chaleureusement nos familles et à nos parents, qui ont été nos plus fidèles supporteurs et qui nous ont aidé à traverser cette période

# Dédicace

Louange à Dieu, qui selon notre travail.

Je dédicace le fruit de ce travail de Dieu leur a commandé dans le livre saint notre très chère en présence de Dieu nous demandons et la satisfaction ainsi que les personnes âgées.

Pour mon père que j'avais un lien et un soutien dans ma Carrière dans l'espoir de mon succès et à atteindre mes Objectifs.

A ma grande famille.

A mon binôme oussama qui réalise avec moi ce travail.

A tous mes collègues pour tous les très bons moments Partagés ensemble qui ont rendu cette année Particulièrement agréable.

# NOMENCLATURES

**Nomenclature**

Ks	Conductivité thermique du solide	[w/m.k]
Kfe	Conductivité thermique effective du fluide (pcm)	[w/m.k]
Kf	Conductivité thermique du fluide (pcm)	[w/m.k]
Ke	Conductivité thermique effective	[w/m.k]
Href	Enthalpie sensible a la température de référence	[j/kg]
Dp	Taille des pores	[m]
Dl	Diamètre ligamentaire du milieu poreux	[m]
Cf	Coefficient du forchheimer	[j/kg k]
Lf	Chaleur latente de fusion	[j/kg]
Tref	Température de référence	[k]
Ts	Température de solide	[k]
Tf	Température de fluide	[k]

**Symboles grecs**

$\varepsilon$	Porosité	[-]
A	Diffusivité thermique	[M <sup>2</sup> .t -1 ]
$\beta$	Coefficient d'expansion thermique	[l -1 ]
$\nu$	Viscosité cinématique	[m <sup>2</sup> .t -1 ]
$\mu$	Viscosité dynamique	[kg n -1 .t -1 ]
$\rho$	Masse volumique	[kg.n -3 ]
$\lambda$	Conductivité thermique	[W/m. k]
k	Perméabilité du milieu poreux	[m <sup>2</sup> ]
$\omega$	Densité des pores	[PPI]
Q	Flux de chaleur	[W]

## Nomenclatures

---

M	Masse.	[Kg]
$\Delta$	Variation.	[-]
$\sigma$	constante de Stefan Boltzmann = $5.67 \cdot 10^{-8}$ [W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup> ]	

### **Abréviation**

MCP	Matériaux à` changement de phase
SET	stockage d'énergie thermique
SCS	Système de stockage combine´
HTF	Fluide caloporteur

**Liste des tableaux**

Table I.1: Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20 °C ..... 5

Table I.2: Liste de quelques eutectiques [9]..... 16

Table I.3: Avantages et désavantages des différentes catégories de MCP [9]..... 16

Table II.1 : Propriétés termo-physique de la cire de paraffine , l'eau, cuivre ,aluminium, et de nickel  
..... 46

Tableau IV.1: Propriétés thermophysiques des métaux utilisés..... 58

## Chapitre 1

I.1. Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état .....	7
I.2. Variation de l'enthalpie spécifique en fonction de la température : (a) pour un corps pur; (b) pour un mélange .....	8
I.3. système de stockage par sorption et par réaction chimique .....	9
I.4. Schéma de transfert de chaleur conductive dans une barre .....	10
I.5. Mécanisme de la convection .....	11
I.6. transfert de chaleur par rayonnement .....	12
I.7. Quelque matériau à changement de phase : pochettes, sphères, tubes, plaquettes .....	12
I.8. classification des matériaux a changement de phase .....	13
I.9. Paraffines brutes, en capsulées, en poudre ou en granulés .....	14
I.10. Conteneurs de MCP et la configuration du MCP par rapport HTF. (a) coquille et le récipient de tube ; (b) récipient cylindrique ; (c) contenant rectangulaire .....	15
I.11. MCP micro-encapsulés: (a) état liquide et état poudre (b) image microscopique électronique à balayage de nombreuses capsules .....	18
I.12. Capsules de différentes formes .....	19
I.13. Les applications Transport de produits alimentaires .....	19
I.14. Récipients contenant sang et des organes qui contiennent MCP .....	20
I.15. (a) : Réfrigérateur normale, (b) : Réfrigérateur avec (MCP) .....	20
I.16. Stockage de l'énergie dans un capteur solaire utilisant un MCP .....	21
I.17: (a) : Réfrigérateur normale, (b) : Réfrigérateur avec (MCP) .....	22
I.18: Stockage de l'énergie dans un capteur solaire utilisant un MCP .....	22

## Chapitre 2

II .1 Exemples de matériaux poreux naturels a) grès, b) calcaire, c) sable de plage, d) pain, e) bois, f) cartilage articulaire .....	24
II.2: Modèle série de la conductivité thermique effective .....	27

II. 1: Modèle parallèle de la conductivité thermique effective .....	28
II. 2: Représentation schématique du volume élémentaire représentatif .....	29
II. 3: Milieu poreux non consolidé .....	30
II. 4: Milieu poreux consolidé .....	30
II. 7 : Dispositif expérimental de stockage.....	36
II. 8: Schéma de système d'énergie thermique de tube à ailette .....	37
II.9 : Le modèle physique étudié.....	37
II. 10. Schéma du diapositive expérimental .....	38
II.11 : Schéma du système de stockage d'énergie thermique latente: a) unité de stockage, b) module de stockage.....	38
II.12: Protocole de préparation des composites mousses métalliques /MCP .....	39
II. 13 : (a) domaine physique de problématique (mousse métallique avec MCP) (b) photo expérimentale .....	40

### Chapitre 3

III.1 : Enthalpie en fonction de la température pour: (a) changement de phase isotherme; (b) changement de phase non isotherme .....	42
III.2 : Le schéma du modèle physique axisymétrique (A) ainsi que les conditions aux limites(B).....	45

### Chapitre 4

IV.1 : Maillage du domaine étudié (axisymétrique) .....	50
IV.2 :Comparaison entre les températures de sortie prédites par le présent modèle et les données de(kibria) .....	51
IV.2 :Comparaison entre les températures de sortie prédites par le présent modèle et les données de(kibria) .....	52
IV.4 : Tracés des courbes de résidus .....	53
IV.5:La fraction liquide à différents moments pour le système : MCP seul, le système Poreux-MCP .....	54

## Liste Des Figures

---

IV.6: contours de température à différents moments pour le système : (a) MCP seul, (b) le système Poreux-MCP .....	55
IV.7: La fraction liquide à différents moments pour le système : (a) MCP seul, (b) le système Poreux-MCP .....	55
IV.8: Evolution de le flux thermique instantanée donnée par l'eau pendant le processus de charge .....	56
IV.9: La fraction liquide a différentes moments pour deux densités de pores (10 et 20ppi) ...	57
IV.10:La fraction liquide à différents moments pour différents de tubes .....	58
IV.11:La fraction liquide a différentes moments pour trios porosités différentes (0.85 , 0.90 et 0.95) .....	59

<b>Remerciements</b>	<b>i</b>
<b>Dédicaces</b>	<b>ii</b>
<b>List des Figures</b>	<b>v</b>
<b>List des Tables</b>	<b>vii</b>
<b>Nomenclature</b>	<b>vii</b>
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I: généralités sur les matériaux à changement de phase et le stockage thermique</b>	
I.1.Introduction	4
I.2.Le stockage d'énergie thermique	4
I.2.1.Stockage par chaleur sensible	4
I.2.2.Stockage par chaleur latent	5
I.2.3.stockage par mcp	6
I.2.3.1. Comportement d'un corps pur:	7
I.2.3.2. Comportement d'un mélange	7
I.2.4.Stockage thermochimique	8
I.3.Notions sur le Transfer de chaleur	10
I.3.1. Conduction	10
I.3.2. Convection	10
I.3.3. Rayonnement	11
I.4.Les matériaux a` changement de phase (MCPs)	12
I.4.1. Principe De Fonctionnement Des MCP	12
I.4.2. Classification Des Matériaux A Changement De Phase	13
I.4.2.1. Les MCP inorganiques	13
I.4.2.2. Les MCP organiques	14
I.4.2.3. les MCP Eutectiques	15
I.4.3. Comparaison Entre Les Différents Types De MCP	16
I.4.4. Classe de MCP	17
I.4.5. Le choix d'un MCP	17
I.4.6. Différentes Formes Des Matériaux A Changement De Phase	18
I.4.6.1. Micro encapsulation	19
I.4.6.2. Macro encapsulation	19

I.4.7. Applications Des MCP	20
I.4.7.1. Transport des produits alimentaires	20
I.4.7.2. Application médicales	20
I.4.7.3. L'industrie textile	21
I.4.7.4. MCP en réfrigérateur domestique	21
I.4.7.5. Stockage de l'énergie solaire par MCP	22

**Chapitre II : Notions sur les milieux poreux et revus bibliographiques**

II.1. Introduction	23
II.2. Définition les Milieux poreux	23
II.3. Classification des milieux poreux	23
II.3.1. Milieu granulaire	24
II.3.2. Milieux cellulaires	24
II.3.3. Milieux fibreux	25
II. 4 Propriétés d'un milieu poreux	25
II.4.1 Porosité	25
II.4.2 Perméabilité	26
II.4.3 Surface spécifique	26
II.4.4 Conductivité thermique effective	27
II.4 .5 Volume élémentaire représentatif (V.E.R)	28
II.5 Classification des milieux poreux	29
II.5.1 Milieu poreux non consolidé	29
II.5.2 Milieu poreux consolidé	30
II.6 Modèles d'écoulement dans les milieux poreux	30
II.6.1. Modèle de Darcy	31
II.6.2. Modèle de Darcy-Brinkman	31
II.6.3. Modèle de Brinkman-Wooding	31
II.6.4. Modèle de Forchheimer	31
II.6.5. Modèle de Darcy-Brinkman-Forchheimer	32
II.6.6. Model d'équilibre	32
II.6.7. Model de non équilibre	32
II.7. Quelques travaux sur le stockage de l'énergie thermique par MCP uniquement	35
II.8. Quelques travaux sur le stockage de chaleur par MCP/mousse métallique	39

**Chapitre III : Modélisation mathématique et position de problème**

III.1. Introduction	41
III.2. Solutions numériques du transfert de chaleur avec changement de phase	41
III.2.1. Méthode à maillage fixes	41
III.2.1.1. Méthode de la capacité effective	42
III.2.1.2. La méthode Enthalpique	42
III.3. Équations du Modèle mathématique	43
III.3.1. Formulation mathématique gouvernantes pour le système de MCP seul	43
III.3.1.1. Équation de continuité	43
III.3.1.2. L'équations de quantités de mouvements	44
III.4. Position du problème	45
III.4.1. Problème physique étudié	45
III.4.2. Les conditions aux limites	46
III.4.3. Objectifs de notre travail	46
III.5. Modélisation numérique	47
III.6. Formulation mathématique gouvernantes pour le système de MCP dans un milieu poreux	47
III.6.1. Equation de continuité	47
III.6.2. Équation de la quantité de mouvement	48
III.7. Définition du programme Fluent	48
III.8 Définition du programme Gambit	49

**Chapitre IV : résultats et discussions**

IV.1. Introduction	50
IV.2. Génération du maillage	50
IV.3. Validation du code de calcul	51
IV.3.1. Validation du système MCP seul	51
IV.3.2. Validation du système MCP/mousse métallique	52
IV.4. Convergence des calculs	53
IV.4.1 Étude paramétrique	53
IV.5. Effet du poreux-MCP par rapport au MCP seul	53
IV.5.1. Fraction liquid	54
IV.5.2. Contours de Température	55

## Sommaire

---

IV.5.3. Contours de fraction liquide	55
IV.5.4. Flux thermique	56
IV.6. Effet de la densité des pores sur le changement de phase	57
IV.7. Effet du type de tube	58
IV.8. Effet du porosité sur le changement de phase	59
Conclusion Générale	60
référence bibliographique	61
Résumé	

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

### Introduction générale

L'énergie est l'une des bases dont les gens anciens et modernes ont besoin dans leur vie quotidienne, comme la cuisine et le chauffage, et ils ont cherché à le stocker, en particulier les thermiques.

Il existe plusieurs façons de stocker l'énergie selon le type étudié. Les combustibles fossiles (le pétrole, le charbon et le gaz) existent en tant que réservoirs naturels et sont donc intrinsèquement capables de servir de moyen de stockage. D'un point de vue technique, l'extraction, l'isolation, le logement et le transport des sources d'énergie intermittentes sont des processus simples. Cependant, le stockage de ces sources d'énergie est beaucoup plus complexe. Les vecteurs énergétiques, notamment l'électricité, la chaleur ou l'hydrogène, sont utilisés pour transmettre la production d'énergie intermittente, nécessitant l'utilisation de systèmes de stockage spécialisés.

Le stockage de l'énergie est l'un des défis les plus importants. Le stockage d'énergie permet d'ajuster la production et la consommation d'énergie tout en minimisant les pertes d'énergie. Lorsque l'énergie est disponible en excès, elle peut être stockée et utilisée lorsque la demande est plus élevée. Ceci est particulièrement utile face à la production intermittente ou fluctuante de certaines énergies, comme les renouvelables. Le stockage d'énergie peut également aider à répondre à une demande constante.

le stockage de l'énergie est devenu un sujet de grand intérêt car il a le potentiel d'atténuer ces lacunes. C'est un problème à résoudre. Il existe trois méthodes principales : le stockage de chaleur sensible, latente et thermochimique. Parmi ces méthodes, le stockage thermique de chaleur latente à l'aide de PCM était le plus favorable pour sa densité de stockage de haute énergie avec de petites variations de température. En effet, les MCP ont la capacité unique d'absorber et d'émettre de l'énergie thermique pendant ces transitions, permettant un stockage d'énergie plus efficace.

Des publications sont disponibles dans la littérature qui traite de l'investigation expérimentale de la performance thermique des PCM s. Un PCM approprié devrait également améliorer la performance du stockage. Dans ce contexte, la cire de paraffine est apparue comme un grand attrait parmi les chercheurs pour leurs caractéristiques attrayantes telles qu'une bonne densité de stockage de chaleur, une fusion compatible avec peu ou pas de sous-refroidissement, une non-

réactivité avec les réactifs chimiques les plus courants et un faible coût et ont une plage de conductivité thermique d'environ 0,15 à 0,4 (W/(m.K)).

Pour améliorer la conductivité thermique de ce matériau, des charges thermo- conductrices doivent être incorporées. L'une des pistes utilisées pour remédier à ce problème consiste à imprégner les MCP dans un milieu poreux de haute conductivité thermique : Les mousses métalliques sont des milieux poreux à matrice métallique, qui possèdent une ossature métallique qui leur confère des propriétés spécifiques, telles qu'une porosité élevée (entre 0,8 et 0,98) et une grande conductivité thermique. Ce qui les qualifie à être une bonne solution pour intensifier le transfert thermique lors de la fusion et de la solidification du MCP.

Notre travail a pour but d'étudier numériquement le phénomène de stockage de l'énergie thermique en utilisant un matériau à changement de phase MCP (cire de paraffine) Qui remplit l'espace annulaire du tube de cuivre.

Nous présentons l'ensemble de notre travail comme suite :

- Une introduction générale présente le but du travail en montrant l'intérêt de stockage thermique.
- Le premier chapitre présente des généralités sur le stockage d'énergie, ainsi que le stockage d'énergie thermique et des matériaux à changement de phase.
- Le deuxième chapitre est consacré aux généralités sur les principales caractéristiques des milieux poreux (définitions, les différentes propriétés, classifications, et Modèles d'écoulement) et une revue bibliographique sur quelques études et travaux effectués dans le domaine.
- Le troisième chapitre contient une présentation du logiciel Gambit ainsi que, celle du code de calcul (Fluent) que nous avons utilisé pour la résolution numérique du problème afin de présenter le modèle mathématique contenant les équations gouvernant le transfert de chaleur. ainsi en présentant la configuration géométrique étudiée (modèle physique), les conditions aux limites associées et une validation numérique a été faite pour assurer le choix de modèle utilisé.
- Le quatrième chapitre On rassemble dans les différents résultats obtenus et leurs interprétations.

## Introduction Générale

---

□ En fin, nous terminons ce mémoire par une conclusion générale et des perspectives pour des avenir études.

# CHAPITRE I

**GÉNÉRALITÉS SUR LES MATÉRIAUX À  
CHANGEMENT DE PHASE ET LE  
STOCKAGE THERMIQUE**

### I.1 Introduction

Le stockage d'énergie thermique par PCM est capable de stocker et de libérer de grandes quantités d'énergie. Le système dépend du changement de phase du matériau pour maintenir et libérer l'énergie. Par exemple, des processus tels que la fusion, la solidification ou l'évaporation nécessitent de l'énergie. La chaleur est absorbée ou libérée lorsque le matériau passe du solide au liquide et vice versa. Par conséquent, les PCM changent facilement et de manière prévisible leur phase avec un certain apport d'énergie et libèrent cette énergie plus tard.[1]

### I.2 Le stockage d'énergie thermique

Le stockage d'énergie thermique permet de capturer l'énergie lorsqu'elle est abondante et économique pour la conserver dans un endroit précis. Cette énergie stockée peut ensuite être utilisée à un moment ultérieur lorsque la ressource devient rare ou plus onéreuse. Ce système est particulièrement crucial pour les énergies renouvelables intermittentes comme l'énergie solaire ou éolienne, car leur production est variable en fonction du temps. En effet, le stockage permet de pallier à ces fluctuations et de garantir une alimentation en énergie plus stable et fiable. L'avantage principal d'une unité de stockage réside dans la réduction de la consommation d'énergie. La littérature scientifique recense divers types de stockage de chaleur, tels que le stockage sensible, le stockage latent, le stockage chimique, le stockage thermochimique, etc.[2]

#### I.2.1 Stockage par chaleur sensible

Le stockage par chaleur sensible est une méthode ancestrale pour emmagasiner de l'énergie sur des durées variables. Il consiste à utiliser une source de chaleur pour augmenter la température d'un matériau sans en modifier l'état. Le tableau I.1 résume les propriétés thermo-physiques de certains matériaux couramment utilisés, comme la conductivité thermique:  $\lambda$ , la chaleur spécifique  $C$  et la masse volumique  $\rho$ .

Le principe de fonctionnement est simple : un apport de chaleur élève la température d'un matériau « monophasé » (solide ou liquide), stockant ainsi l'énergie sous forme de chaleur sensible. à l'inverse, la restitution de cette chaleur permet de diminuer la température du matériau et de libérer l'énergie stockée.

Imaginons un corps à haute température placé dans un système à température plus basse. à pression constante, l'énergie nécessaire pour augmenter sa température de  $T_1$  à  $T_2$ , sachant que sa masse est  $m$  et sa capacité thermique massique  $C(T)$ , est donnée par la variation d'enthalpie [2].

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

En supposant la capacité calorifique indépendante de la température (ce qui est le cas dans une plage de température réduite), cette relation devient :

$$H_2 - H_1 = mC (T_2 - T_1) \quad (I.2)$$

**Table I.1: Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20 °C**

Matériaux	Densité' Kg/m <sup>3</sup>	Chaleur spécifiques (J/Kg · K)	Capacité' thermique volumétrique J/m <sup>3</sup> K
Argile	1458	879	1.28
Brique	1800	837	1.51
Grès	2200	712	1.57
Bois	700	2390	1.67
Béton	2000	880	1.76
Verre	2710	837	2.27
Aluminium	2710	896	2.43
Ferre	7900	452	3.57
Acier	7840	465	3.68
Eau	988	4182	4.17

### I.2.2 Stockade par chaleur latent

Le stockage par chaleur latente permet d'emmagasiner de l'énergie dans une plage de température constante et réduite, correspondant à un changement de phase ou d'état physique du matériau. Les systèmes de stockage latent utilisent des matériaux à changement de phase (MCP), qui changent d'état à une température précise ou dans une plage limitée (pour les mélanges non eutectiques). Ces MCP permettent de stocker dix fois plus d'énergie par unité de volume que les systèmes par chaleur sensible.[2]

Lors de la solidification, les MCP libèrent une grande quantité de chaleur, tandis qu'en fondant, ils en absorbent autant. Ce changement d'état à température constante est idéal pour réguler la température, notamment dans les applications de chauffage et de climatisation des bâtiments. L'énergie massique stockée entre la température initiale  $T_1$  et la température finale  $T_2$  s'exprime par la formule suivante :

$$\Delta h_{tot} = \int_{T_1}^{T_f} C_s dT + L_f + \int_{T_f}^{T_2} C_l dT \quad (I.3)$$

Ou:

$\Delta h_{tot}$  : est l'enthalpie massique totale avec changement d'état.

$C_s$  : Capacité thermique massique à l'état solide.

$C_l$  : Capacité thermique massique à l'état liquide.

$L_f$  : Chaleur latente de fusion.

### I.2.3 Stockage par MCP

Le stockage de chaleur latente est une technique qui permet d'atteindre des densités d'énergie élevées en utilisant des matériaux qui se fondent et gèlent à des températures très spécifiques, appelés matériaux à changement de phase (MCP).

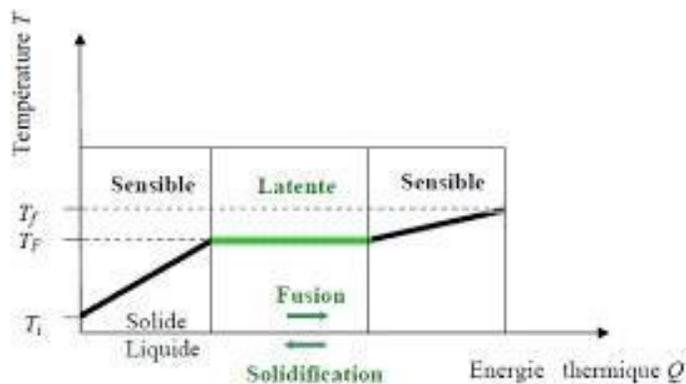
En fondant, de grandes quantités de chaleur peuvent être stockées. Lorsqu'elles doivent libérer la chaleur stockée, elles gèlent à nouveau à une température spécifiée. Ce faisant, ils peuvent économiser de grandes quantités d'énergie thermique dans une plage de température étroite. Le plus grand avantage du MCP est qu'il peut stocker la même quantité d'énergie qu'un réservoir d'eau dans 4 fois moins de taille occupée. Cela le rend vraiment pratique à installer même lorsque l'espace est limité ou distinct.

Basées sur la compréhension que le monde utilise plus de deux fois plus de chaleur que l'électricité, les batteries thermiques Sunamp aident à résoudre de nombreux problèmes en stockant l'énergie sous forme de chaleur, lorsque cette énergie est disponible et libérée en cas de besoin. L'innovation vient de l'utilisation d'une combinaison spéciale de matériaux de stockage d'énergie trouvés dans une batterie thermique unique, possédée et de haute énergie. Les batteries thermiques solaires contiennent des matériaux inorganiques et non toxiques à base de sel pour le changement de

phase (MCP), qui absorbent et libèrent de l'énergie thermique pendant le processus de fusion et de congélation. Lorsque le MCP gèle, il libère une énorme quantité d'énergie sous forme de chaleur latente à une température constante sélectionnée.

### I.2.3.1. Comportement d'un corps pur:

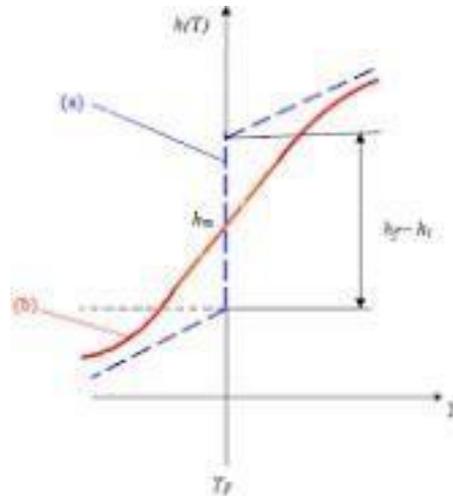
Lors du chauffage d'un MCP pur avant sa température de fusion, on observe une augmentation linéaire de la température en fonction du temps. Au cours du changement d'état (fusion), la température reste constante tandis que la grande quantité de chaleur latente est absorbée. Si l'on représente l'enthalpie spécifique en fonction de la température, on obtient une courbe en escalier comme la courbe (a) de la figure I.2. La discontinuité horizontale correspond au changement d'état, où il n'y a pas de variation de température mais une absorption importante de chaleur.[3]



**Figure I.1:** Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état. [4]

### I.2.3.2. Comportement d'un mélange:

Dans le cas d'un mélange de MCP (par exemple un alliage), la variation d'enthalpie est plus progressive et ne présente pas de discontinuité nette comme la courbe (b) de la figure I.2. Cela signifie que la fusion se produit sur une plage de température plus large, sans palier à température constante.[3]



**Figure I.2:** Variation de l'enthalpie spécifique en fonction de la température : (a) pour un corps pur; (b) pour un mélange. [7]

Le changement d'état d'un matériau pur se fait à température constante et l'énergie est stockée par chaleur latente jusqu'à la transformation complète d'un état à un autre. Généralement, le matériau continue à recevoir de l'énergie au cours du temps, ce surplus d'énergie est stocké sous forme de chaleur sensible [5]. La possibilité d'introduire ce mode de stockage est un verrou fondamental dans la problématique du chauffage et de climatisation des bâtiments. En effet, le recours à ce type de stockage dans le bâtiment permet de maintenir une température quasi-constante à l'intérieur d'une pièce et en cas de besoin l'énergie stockée est libérée [6].

### I.2.4 Stockage thermochimique

Le stockage thermochimique regroupe deux types de processus : la sorption et la réaction chimique (Figure I-3).

- Stockage par sorption: Ce procédé est adapté aux températures basses (environ  $80^{\circ}\text{C}$ ) et utilise des matériaux absorbants qui capturent la chaleur par changement d'état.

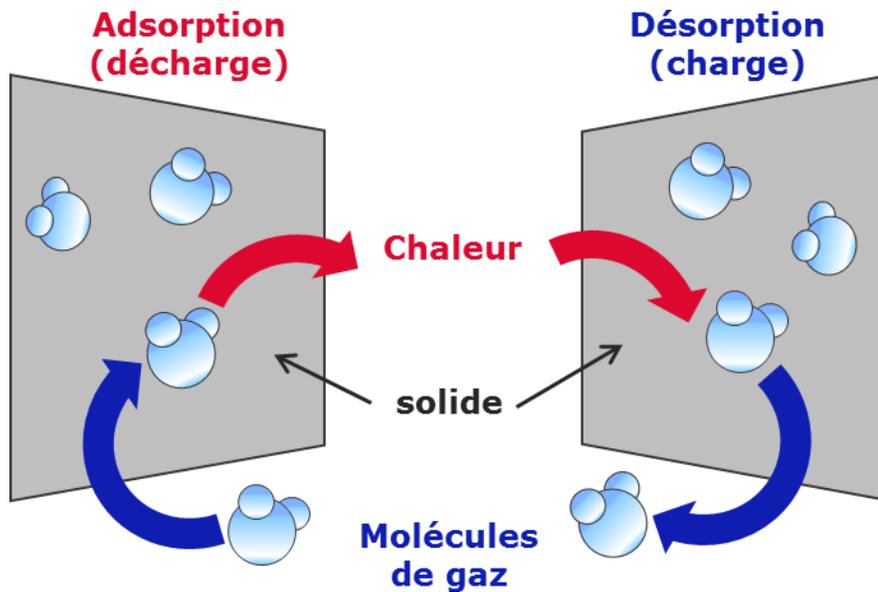
Stockage par réaction chimique: Cette méthode est plus adaptée aux applications à haute température (entre  $200$  et  $1000^{\circ}\text{C}$ ), notamment dans le domaine de l'énergie solaire concentrée. Elle consiste à stocker l'énergie sous forme de composés chimiques produits par des réactions réversibles.

La Figure I-3 présente une classification des systèmes de stockage thermochimique par sorption et par réaction chimique [6]. Pour les applications en centrales solaires thermodynamiques, les gammes de température de stockage se situent généralement entre 300 et 550°C. Par conséquent, cette étude se concentrera uniquement sur les phénomènes de stockage thermochimique sans sorption.

La voie thermochimique exploite la réversibilité des réactions chimiques pour stocker l'énergie. De façon générale, les réactions sont de la forme :



Les réactions les plus couramment rencontrées sont de la forme suivante :



**Figure I.3:** Le principe du stockage de l'énergie par adsorption/désorption [8]

Ce schéma illustre les étapes clés du processus, en mettant en évidence la réversibilité de la réaction chimique. La quantité d'énergie qui peut être stockée dans une réaction chimique de type  $A + H_r \rightleftharpoons B + C$  est la somme des énergies sensibles des matériaux et de la chaleur de réaction. La quantité d'énergie stockée est exprimée par la relation ci-dessous :

$$E = \sum_{i=1}^N \int_{T_i}^{T_f} m_i \cdot C_i dT + n_A \cdot \Delta H_r \quad (I.6)$$

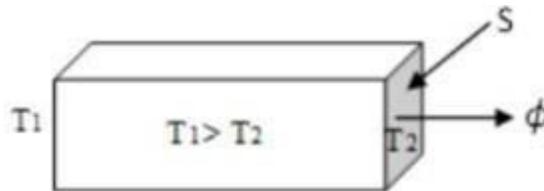
En résumé, le stockage par chaleur latente offre un ensemble d'avantages qui en font un choix privilégié pour stocker l'énergie thermique de manière efficace, compacte et flexible.

### **I.3 Notions sur le Transfert de chaleur**

Le transfert de chaleur est l'un des modes, les plus connus d'échange d'énergie. Lorsqu'il existe une différence de température entre deux points d'un système à des températures différentes sont mises en contact, on constate une tendance à l'égalisation des températures, il y a trois type de transfert de chaleur.

#### **I.3.1 Conduction**

Ce transfert de chaleur est le seul que l'on puisse rencontrer dans les solides. La propagation de la chaleur s'effectue d'atome en atome, de proche en proche, par transmission d'énergie d'agitation thermique. En milieu solide les atomes, dont les positions d'équilibre sont fixes dans l'espace. Transfèrent de la chaleur sans déplacement de matière La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier. Le flux de chaleur est proportionnel au gradient de température.



**Figure I.4:** Schéma de transfert de chaleur conductivité dans une barre

#### **I.3.2 Convection**

C'est, de façon générale, un transfert de chaleur entre deux phases de nature différente. Elle intervient par exemple, à la surface de séparation entre un solide et un fluide (liquide ou gaz), ou aussi bien, à la surface libre entre un liquide et un gaz.

Le transfert de chaleur s'effectue en 2 phases:

- 1ère phase : la chaleur est échangée par conduction entre la surface solide et une mince

couche de fluide (appelée « film »), au voisinage de la surface.

- 2ème phase : le fluide du film est déplacé dans la masse du fluide ; ce déplacement du fluide est, soit naturel (variation de la masse volumique du film chauffé ou refroidi, par rapport celle du fluide en masse), soit artificiel (action d'une pompe, d'un agitateur). On parle alors soit de convection naturelle, soit de convection forcée

Donc, le transfert de chaleur par convection est provoqué par le déplacement d'un fluide, qui transporte avec lui l'énergie qu'il contient. Quelle que soit le type de convection (libre ou forcée) et quelle que soit le régime d'écoulement du fluide (laminaire ou turbulent), le flux de chaleur transmis est donnée par la relation dite loi de Newton.

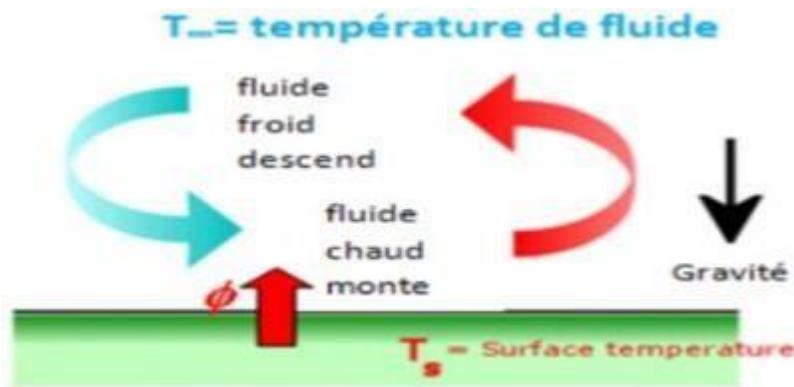


Figure I.5: Mécanisme de la convection

### I.3.3 Rayonnement

Les corps quel que soit leur état : solide, liquide ou gazeux, de température absolue  $T > 0$  K, émettent des ondes électromagnétiques ; on dit qu'ils émettent « un rayonnement thermique ». En plus, au processus d'émission de rayonnement thermique s'ajoute un processus d'absorption des radiations électromagnétiques provenant de l'environnement de ces corps. Leur état thermique est alors régi par le bilan des processus d'émission et d'absorption.

Le rayonnement thermique correspond à un transfert de chaleur ne nécessitant aucun support-matériel, c'est ainsi que la terre est « chauffée » par le rayonnement thermique du soleil qui s'est propagée dans le vide, de la surface solaire, qui l'a émis, jusqu'à la terre qui l'absorbe. Le flux de chaleur échangé entre la surface  $S$  et l'environnement est donné par loi de Stefan Boltzmann.

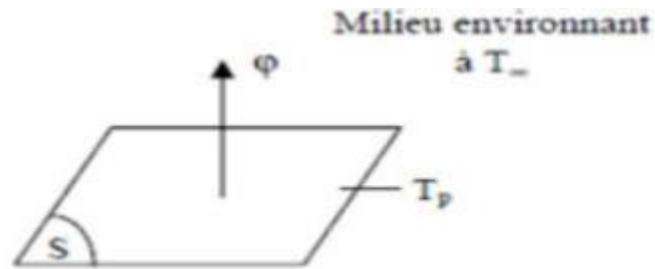


Figure I.6: transfert de chaleur par rayonnement

#### I.4 Les matériaux à changement de phase (MCPs)

Les matériaux souvent utilisées pour le stockage thermique par chaleur latente sont appelées Matériaux à Changement de Phase (MCP). Dans des systèmes de stockage avec MCP, un matériau devient liquide au moment de la charge et se solidifie, au moment de la restitution de la chaleur, dans une gamme de températures bien définie (changement de phase).

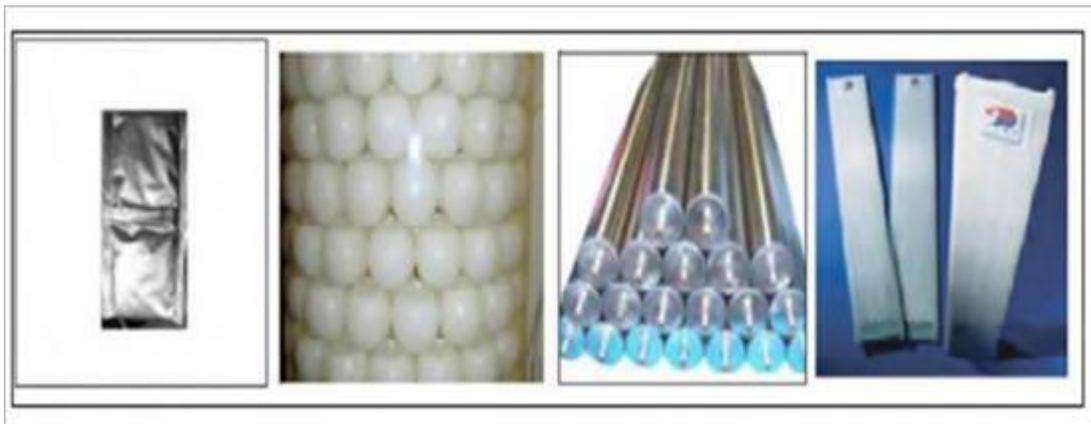


Figure I.7: Quelques matériaux à changement de phase : pochettes, sphères, tubes, plaquettes

##### I.4.1 Principe De Fonctionnement Des MCP

Les matériaux à changement de phase utilisent la chaleur latente de changement de phase pour contrôler la température dans une plage spécifique. Lorsque la température dépasse un certain point, les liaisons chimiques dans le matériau vont commencer à briser et le matériau absorbe la chaleur dans un endothermique processus ou il passe de l'état solide à l'état liquide.

Comme la température baisse, le matériau dégage l'énergie et revient à l'état solide.

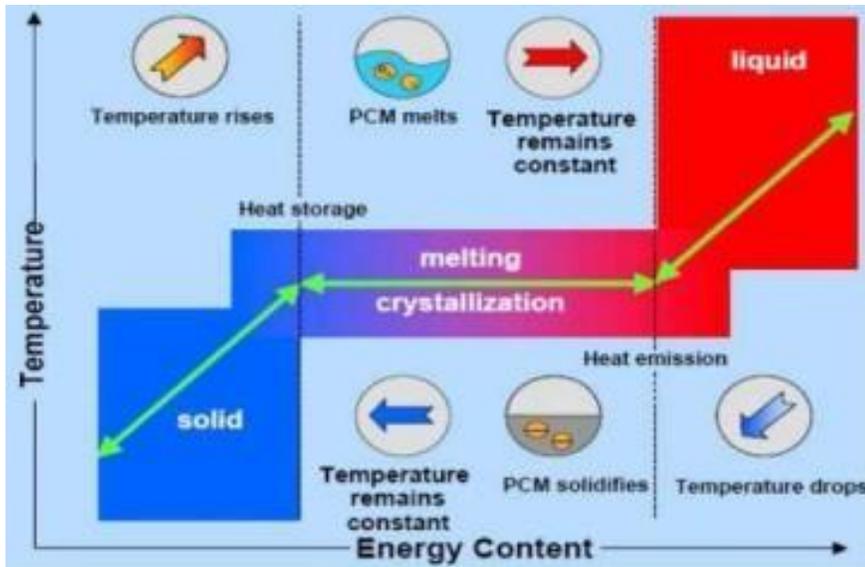


Figure I.8: Principe de fonctionnement des MCP [9]

#### I.4.2 Classification Des Matériaux A Changement De Phase

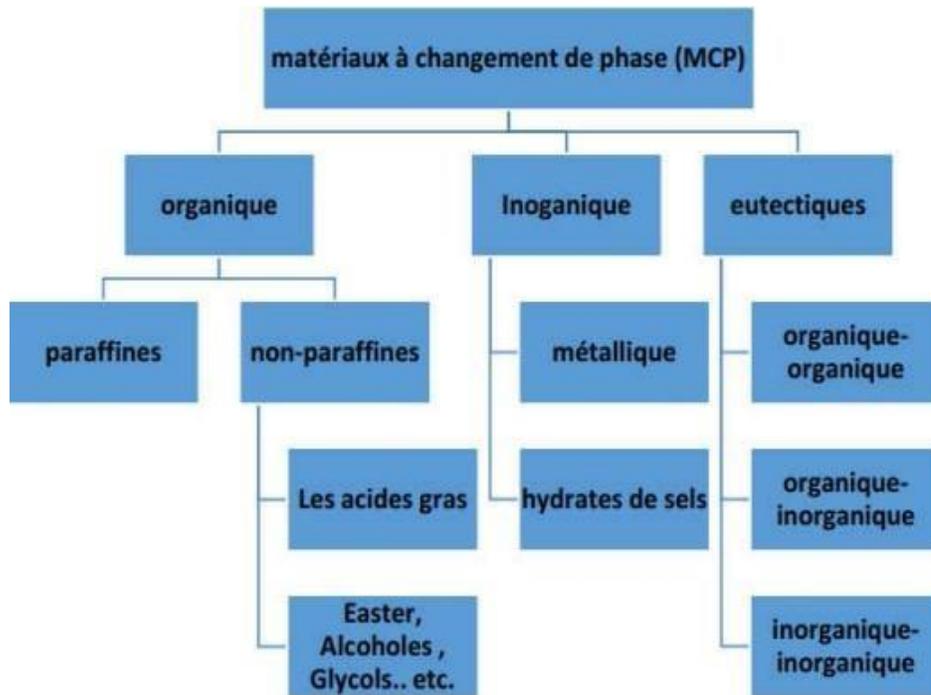
On distingue trois grandes familles de MCP :

- les composés organiques
- les composés inorganiques
- les mélanges eutectiques.

Les MCP inorganiques

Les matériaux ou substances inorganiques constituent une catégorie importante de Matériaux à Changement de Phase (MCP) pour le stockage thermique. Ils se distinguent par leur large plage de températures de fusion, s'entendant de  $-100^{\circ}\text{C}$  à  $+1000^{\circ}\text{C}$ . Parmi les MCP inorganiques les plus couramment utilisés, on trouve :[9].

- L'eau
- Les solutions aqueuses de sel
- Les sels hydratés
- Les mélanges de sels
- Les mélanges de métaux



**Figure I.9:** classification des matériaux a changement de phase [6]

**Hydrates de sels :** Les hydrates de sel sont des sels inorganiques qui contiennent de l'eau et dont la formule générale est  $AB.nH_2O$ . Pendant la charge, la déshydratation du sel a lieu.

**Sels :** Les sels sont des composés ioniques neutres formés à partir de cations et d'anions.

Les sels les plus connus sont les nitrates comme le  $NaNO_3$  ( $T_{fusion} = 307\text{ °C}$ ), le  $KNO_3$  ( $T_{fusion} = 333\text{ °C}$ ) ou encore le  $LiNO_3$  ( $T_{fusion} = 250\text{ °C}$ ) [5].

**Métaux :** On peut citer notamment le Potassium ( $T_{fusion} = 63.2\text{ °C}$ ), le  $Bi_{58}Sn_{42}$  ( $T_{fusion} = 138\text{ °C}$ ) ou encore le Lithium ( $T_{fusion} = 186\text{ °C}$ ).

#### I.4.2. Les MCP organiques

Les matériaux organiques ont une température ou une plage de température comprise entre  $0\text{ °C}$  et  $150\text{ °C}$ . Les plus utilisés sont essentiellement à base de paraffine, des acides gras et des alcools de sucre. Ils comportent certains inconvénients, comparés aux avantages des MCP inorganiques, ils ont une plus faible conductivité à l'état solide et à l'état liquide, ils ont une chaleur latente de fusion plus faible, ils sont inflammables.

Par contre, ils ont des avantages majeurs ; ils sont disponibles dans une large gamme de

températures et sont compatibles avec les matériaux conventionnels de construction, ils sont chimiquement stables. Ils sont non réactifs la plus part du temps et ils sont recyclables

**Les paraffines:** Les paraffines sont des matériaux organiques, constitués par des mélange d'hydrocarbures saturés qui eux-mêmes sont alcanes de formule générale.



**Figure I.10:** Paraffines brutes, en capsulées, en poudre ou en granulés [9]

**Acides gras:** Les acides gras sont des matériaux ayant pour origine les huiles végétales ou animales .Ils ont la formule chimique générale suivante :  $\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_{2n} \text{COOH}$

### I.4.2.3.les MCP Eutectiques

Il s'agit généralement d'un mélange de PCM organiques et inorganiques. Il se compose de plusieurs PSM purs. Ces matériaux présentent deux avantages majeurs : un point de fusion net similaire à une substance pure et des températures volumétriques latentes légèrement supérieures à celles des composés organiques purs. Deux inconvénients majeurs sont qu'il existe peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux et peu utilisées dans les systèmes industriels.

Table I.2: Liste de quelques eutectiques[9]

Futes:tique Inorganique	Point de fusion [°C]	Chaleur latente de fusion [kJ/kg].
49.3% MgCl.6H <sub>2</sub> O + 50.7% Mg(NO <sub>3</sub> ).6H <sub>2</sub> O	58	132.3
61.5% Mg(NO <sub>3</sub> ) 6H <sub>2</sub> O + 38.5% NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	51	131.1
58.3% Mg(NO <sub>3</sub> ) 6H <sub>2</sub> O + 41.7% MgCl.6H <sub>2</sub> O	58	106
CaCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O + CaBr <sub>2</sub> · H <sub>2</sub> O	14	140
Eutectique organique :		
Acide caprique-laurique	18	120
Acide plamitique-laurique	33	145
Acide stéarique-laurique	34	150

### I.4.3 Comparaison Entre Les Différents Types De MCP

Plusieurs auteurs [14,15,16] ont présenté une comparaison des avantages et désavantages des matériaux organiques, inorganiques et eutectiques.

Table I.3: Avantages et désavantages des différentes catégories de MCP [9]

MCP	Avantage	Désavantage
Organiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- disponibles dans une large gamme de température</li> <li>- chimiquement stables</li> <li>- haute d'énergie de fusion</li> <li>- non corrosifs</li> <li>- simple d'utilisation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- faible conductivité thermique</li> <li>- chaleur latente faible</li> <li>- Peut-être inflammable</li> <li>- chaleur spécifique massique faible</li> <li>- fort coût</li> <li>- masse faible</li> </ul>
Inorganiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- chaleur latente élevée</li> <li>- faible coût</li> <li>- point de fusion nette</li> <li>- non- inflammable</li> <li>- forte conductivité thermique</li> <li>- chaleur spécifique massique élevée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- phénomène de surfusion</li> <li>- agent de nucléation étranger indispensable</li> <li>- corrosifs pour la plupart des métaux</li> <li>- vieillissement rapide</li> </ul>
Eutectiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- point de fusion nette Similaire à une substance pure</li> <li>- chaleur latente légèrement supérieures à celle des composés organiques purs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- peu de données disponibles sur les propriétés de ces matériaux</li> <li>- peu utilisés au niveau des applications industrielles</li> </ul>

### I.4.4 Classe de MCP

Il existe plusieurs catégories de MCP disponibles, les suivantes étant les types les plus couramment utilisés:

Matériaux à changement de phase SP : Grâce au développement de la chaleur latente, une nouvelle catégorie de MCP non combustibles a émergé, grâce à la fusion de SP. La composition des hydrates de sel et des éléments organiques dans le SP conféré une stabilité inégalée dans le temps, donnant lieu à un cycle remarquable [10].

Matériaux à changement de phase RT : En utilisant un matériau RT, le stockage de l'énergie thermique est obtenu grâce à l'absorption d'une quantité importante de chaleur, appelée chaleur latente, à une température constante. Lors de l'inversion de ce changement de phase, où le liquide se transforme en solide, la chaleur latente précédemment accumulée est alors libérée

### I.4.5 Le choix d'un MCP

Pour faciliter la sélection d'un MCP approprié pour une application spécifique, un ensemble de critères sera établi ;

Considérations thermiques La température à laquelle un changement de phase se produit varie en fonction de l'application spécifique. La chaleur latente de fusion a une valeur de 130 kJ/kg, ce qui en fait un choix compétitif. Cette caractéristique se caractérise par une conductivité thermique exceptionnelle résultant en une cinétique de charge et de décharge rapide. Pour éviter les problèmes de résistance à la pression du système de stockage, il est conseillé de maintenir une faible pression de vapeur.

#### Propriétés physiques

- De légères variations de volume lors des transitions d'état doivent être prises en compte lors du dimensionnement des capacités de stockage et de l'évaluation de leur résistance à la pression.
- Le MCP vise à maximiser la capacité de stockage dans l'espace le plus compact possible, nécessitant un haut niveau de densité.
- Réaliser une union harmonieuse grâce à l'utilisation d'une forme composée

### Considérations cinétiques

- Dynamique de charge et de décharge rapide.
- Evitez à tout prix la surfusion, car elle peut perturber la cinétique et impacter négativement le processus de déstockage.
- Considérations de stabilité et de compatibilité avec les autres matériaux:
- Stabilité du corps lors des cyclages thermiques.
- Compatibilité avec les matériaux du réservoir de stockage pour chaque phase pour éviter tous les problèmes de corrosion, de réactivité chimique ou électrochimique.

### Considérations chimiques

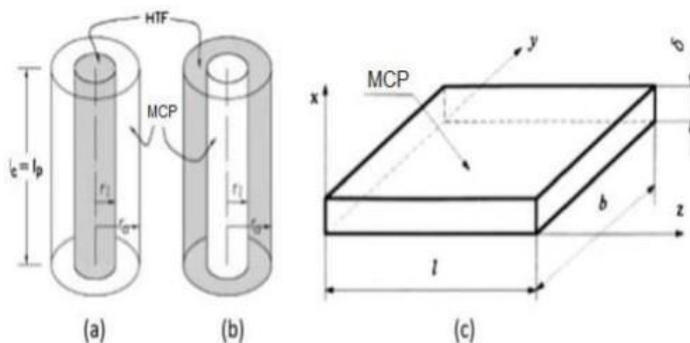
- Stabilité chimique des objets dans le temps et les niveaux de température.
- Bon taux de cristallisation et ininflammable et non toxique.

### Considérations économiques

- Cout raisonnable et bonne disponibilité de stockage.

### I.4.6. Différentes Formes Des Matériaux A Changement De Phase

Il doit avoir un échange de chaleur efficace entre le MCP et le fluide caloporteur afin d'avoir une grande efficacité du stockage d'énergie. Par conséquent, les MCP sont généralement contenus tels que soit grande surface de transfert de chaleur ou de coefficient de transfert de chaleur par convection élevée entre Pack MCP et le fluide caloporteur est possible.



**Figure I.11:** Conteneurs de MCP et la configuration du MCP par rapport HTF. (a) coquille et le récipient de tube ; (b) récipient cylindrique ; (c) contenant rectangulaire [1]

### I.4.6.1. Micro encapsulation

La micro encapsulation des MCP consiste à emballer les matériaux MCP dans des capsules qui vont de moins de 1m et jusqu'à environ 300m. [7].



**Figure I.12:** MCP micro-encapsulés: (a) état liquide et état poudre (b) image microscopique électronique à balayage de nombreuses capsules

### I.4.6.2. Macro encapsulation

Macro encapsulation se réfère à MCP encapsulés dans n'importe quel type de conteneurs tels que des tubes, des sphères ou des panneaux [7].



**Figure I.13:** Capsules de différentes formes [6]

### **I.4.7.Applications Des MCP**

#### **I.4.7.1 Transport des produits alimentaires**

Les MCP sont utilisés dans l'industrie agroalimentaire, pharmaceutique et médicale pour limiter au maximum les variations de température 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.



**Figure I.14:** Les applications Transport de produits alimentaires [10]

#### **I.4.7.2.Application medicals**

Dans le secteur médical, une des applications principales est le transport de sang Figure.II.9 et organes. D'autres applications médicales peuvent être des coussinets chauds ou froids pour traiter la douleur locale dans le corps.



**Figure I.15:** Récipients contenant sang et des organes qui contiennent MCP [11]

### I.4.7.3.L'industrie textile

Les matériaux à changement de phase peuvent être appliqués dans des nombreux domaines d'application de l'industrie qui sont appropriés pour optimiser le confort thermo physiologique de vêtements, de couil à matelas, de sacs de couchage. Il devient alors particulièrement important de trouver des matériaux dont les températures de fusion et de cristallisation sont très proches de la température superficielle du corps humain [20].

Les matériaux utilisés pour ce genre d'applications sont généralement des paraffines qui ont une température moyenne de 30-34°C, ce qui devient très confortable pour le corps humain.



Figure I.16: L'efficacité de MCP dans les textiles

### I.4.7.4.MCP en réfrigérateur domestique

Les réfrigérateurs fonctionnant en permanence ont des médiocres performances énergétiques. Ces appareils consomment 18 milliards de kWh ce qui équivaut à 20 pourcent de la consommation résidentielle d'électricité et contribuent ainsi à l'effet de serre à hauteur de 2,25 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub>/an. L'intégration de matériaux à changement de phase dans un réfrigérateur domestique est une solution technologique innovante et économique pour réduire cette consommation d'énergie et limiter les pics de puissance en électricité.

L'effet de la plus grande inertie thermique apportée par ces matériaux aura également pour conséquence de limiter le nombre d'arrêt démarrage de privilégier certaines heures de fonctionnement dans la journée et de stabiliser la température pour une meilleure conservation des aliments [22].

La figure I.14 montre un exemple d'un réfrigérateur domestique contenant le matériau à



# **CHAPITRE II**

**NOTIONS SUR LES MILIEUX POREUX ET  
REVUS BIBLIOGRAPHIQUES**

## II.1 Introduction

Le stockage thermique est un enjeu majeur pour les industries qui cherchent à optimiser leur consommation d'énergie. Cependant, les méthodes traditionnelles de stockage présentent des limites en termes d'efficacité et de coût. Il est donc crucial de trouver des procédés innovants pour améliorer le stockage thermique.

Dans ce contexte, les matériaux à changement de phase (MCP) ont émergé comme une solution prometteuse. Cette technologie permet de stocker l'énergie thermique de manière plus efficace et économique que les méthodes conventionnelles.

Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour améliorer le stockage thermique par MCP. Tout d'abord, il est possible d'augmenter la conductivité thermique des MCP en ajoutant des matériaux conducteurs tels que des nanoparticules ou ajouter un matériau conducteur sous forme une mousse métallique (milieu poreux). Cela permet de transférer plus efficacement l'énergie thermique vers et depuis les MCP.

## II.2 Définition Les Milieux poreux

Un milieu poreux est typiquement défini comme une matrice solide contenant des espaces vides interconnectés ou isolés. En d'autres termes, il s'agit d'un matériau solide avec un volume important de pores, disposés de manière ordonnée ou aléatoire, pouvant être interconnectés ou séparés, comme illustré sur la figure (II.1) Ces espaces vides, appelés porosité, présentent une large gamme de formes et de tailles. On peut les classer en trois groupes principaux : les pores microstructuraux, le type le plus petit ; les macropores ou cavités, le type le plus grand ; et les mésopores, qui occupent la plage de taille entre les deux autres.

## II.3 Classification des milieux poreux

La classification des milieux poreux peut être établie en fonction de la structure du matériau solide qui forme la matrice (Figure II .1). Ici, nous explorerons trois catégories distinctes :



**Figure II.1 :** Exemples de matériaux poreux naturels a) grès, b) calcaire, c) sable de plage, d) pain, e) bois, f) cartilage articulaire[18].

### II.3 .1 Milieu granulaire

Un milieu granulaire est composé d'une multitude de particules solides séparées, appelées grains, qui n'ont pas de liaison chimique entre elles. Le sable, le gravier et l'argile sont des exemples de milieux granulaires. Ces matériaux se caractérisent par [18]:

- **Porosité intergranulaire :** Les espaces vides entre les grains individuels contribuent à la porosité globale.
- **Haute perméabilité:** En raison de la nature interconnectée des pores, les fluides peuvent facilement traverser le milieu.
- **Faible surface spécifique:** La surface totale du matériau solide par unité de volume est relativement faible par rapport aux autres types de milieux poreux.

### II.3 .2 Milieux cellulaires

Dans les milieux cellulaires, le composant solide forme des cellules distinctes, qui peuvent être ouvertes ou fermées. Des exemples incluent la mousse, les os et certains types de céramiques. Ces matériaux présentent les caractéristiques suivantes [18]:

- **Porosité cellulaire :** La porosité résulte de la présence de ces cellules internes au sein de la structure solide.
- **Perméabilité variable :** La perméabilité peut varier en fonction de la taille, de la forme et de la connectivité des cellules.

- Surface spécifique modérée : Par rapport aux milieux granulaires, les milieux cellulaires offrent une surface spécifique plus élevée en raison des parois cellulaires internes.

### II.3 .3 Milieux fibreux

La partie solide d'un milieu fibreux est constituée de fibres entrelacées souvent liées par un liant. Le papier, le feutre et les textiles sont tous des exemples de milieux fibreux. Ces matériaux se caractérisent par[18]:

- Porosité inter-fibres : Les espaces vides entre les fibres enchevêtrées contribuent à la porosité globale.
- Perméabilité' anisotrope : La perméabilité peut dépendre de la direction, ce qui signifie qu'elle peut varier en fonction du sens d'écoulement par rapport à l'alignement des fibres.
- Surface spécifique élevée : En raison du rapport surface/volume élevée milieux fibreux possèdent généralement une surface spécifique élevée.

### II.4 Propriétés d'un milieu poreux

Dans le domaine des matériaux, un milieu poreux se distingue par sa porosité et sa perméabilité, deux propriétés qui sont interdépendantes. Ces propriétés sont définies comme suit: [19]

#### II.4 .1 Porosité :

La présence de l'espace vide (pores) occupé par un fluide distribuée dans la matrice solide est caractérisée par la porosité du milieu poreux.  $V_s$ ,  $V_f$  dénotent le volume occupé par les phases solide et fluide respectivement. Nous définissons la porosité  $\phi$  du milieu poreux comme étant le rapport du volume des pores (fluide) au volume total  $V$  ( $V=V_s+V_f$ )

La porosité d'un milieu poreux notée  $\varepsilon$  est définie comme suit [20] :

$$\varepsilon = \frac{V_f}{V} = \frac{V_f}{V_s+V_f} \quad [\text{II- 1}]$$

Puisqu'il s'agit d'un rapport de mêmes propriétés, la porosité n'a pas d'unités et elle est souvent exprimée en pourcentage. Les valeurs de la porosité sont :

$\varepsilon =0$  : solide pure.

$0 < \varepsilon < 1$  : milieu poreux.

$\varepsilon = 1$  : fluide pure.

#### II.4 .2 Perméabilité :

La perméabilité est une mesure de la facilité avec laquelle un fluide s'écoule à travers un milieu poreux sous l'influence d'un gradient de pression. Elle est notée  $K$  et est uniquement déterminée par la porosité et la géométrie de la matrice solide [21]. La relation de Kozeny-Carmen, établie en 1937, fournit une estimation de la perméabilité d'un milieu poreux non consolidé composé d'éléments identiques de géométrie de base:

$$K = \frac{D^2 \varphi^3}{36C_0(1-\varphi)^2} \quad [\text{II-2}]$$

Où,  $D$  désigne une mesure distinctive des composants qui composent la structure perméable, tandis que la constante,  $C_0$ , dépend de la forme des grains ( $3.6 < C_0 < 5$ ). Pour un écoulement unidirectionnel d'un fluide incompressible au sein d'une colonne poreuse constituée de particules sphériques, de diamètres  $D$  et soumise à un gradient de pression, l'équation de Kozeny –Carmen devient comme suit:

$$K = \frac{D^2 \varphi^3}{150(1-\varphi)^2} \quad [\text{II- 3}]$$

Ce qui correspond à une valeur de  $C_0$  de la loi de Kozeny – Carmen de [2- 3].

#### II .4 .3 Surface spécifique:

Comme la porosité, la surface spécifique [20] est une propriété géométrique importante du milieu poreux. On peut définir la surface spécifique comme  $\alpha_{sf}$  le rapport entre l'aire de la surface totale de l'interface fluide -solide  $A_{sf}$  et le volume de l'échantillon, soit :

$$\alpha_{sf} = \frac{A_{sf}}{V} \quad [\text{II- 4}]$$

Cette grandeur joue un rôle important dans les problèmes d'échange de chaleur entre le fluide et la matrice solide.

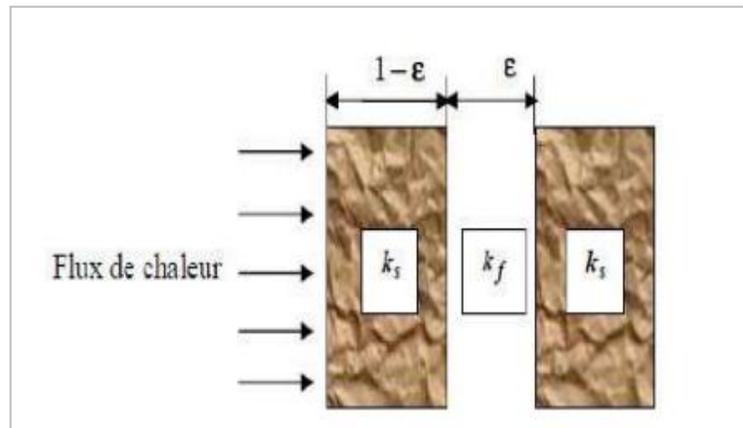
#### II.4.4 Conductivité thermique effective:

La complexité de l'architecture des milieux poreux associée à l'existence de phases solides et fluides dissemblables nécessite l'utilisation d'une conductivité thermique efficace  $k_e$  pour modéliser le transfert de chaleur. Les phases solide et fluide du milieu poreux contribuent de manière inégale à la conduction, la valeur de  $K_{solide}$  dépassant généralement  $K_{fluide}$ .

L'efficacité de la conductivité repose à la fois sur la porosité et la conductivité thermique des composants solides  $k_s$  et fluides  $k_f$ .

En règle générale, il n'existe pas de modèles précis de conductivité thermique efficace pouvant être mis en œuvre dans des scénarios pratiques impliquant des matériaux poreux. Les modèles actuels servent plutôt de cadres lâches construits pour des formes de base avec des hypothèses simplificatrices, dérivées de données expérimentales. Tous les modèles disponibles présentés sont un mélange de modèles en parallèle et en série, leurs poids étant déterminés par des analogies électriques. Le modèle en série décrit le transfert séquentiel du flux de chaleur à travers les phases solide et fluide. Dans ce procédé, la résistance thermique du milieu est égale à la somme des résistances thermiques présentées individuellement par chaque phase [20]. (Fig. II.2)

$$\frac{1}{K_c} = \frac{\varepsilon}{K_f} + \frac{1-\varepsilon}{K_s} \quad [\text{II} - 5]$$

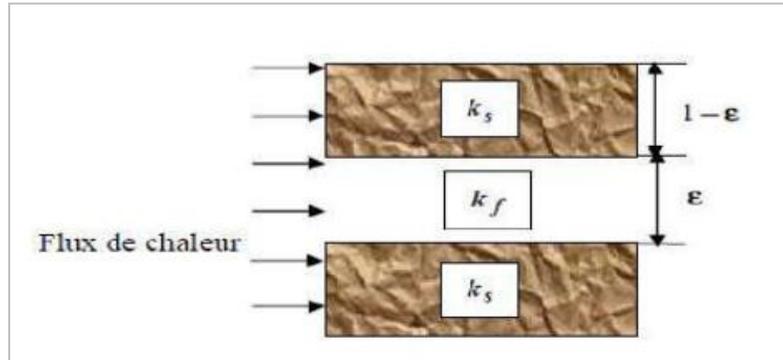


**Figure II.2:** Modèle série de la conductivité thermique effective [20].

Le modèle parallèle de flux de chaleur implique deux phases parallèles l'une à l'autre. La conductivité effective résultante est calculée comme la somme des conductivités thermiques de chaque phase individuelle. (Fig. II.3).

$$K_e = (1 - \varepsilon)K_s + \varepsilon K_f \quad [\text{II. 6}]$$

La conductivité thermique effective est toujours comprise entre celle du fluide et celle du solide.



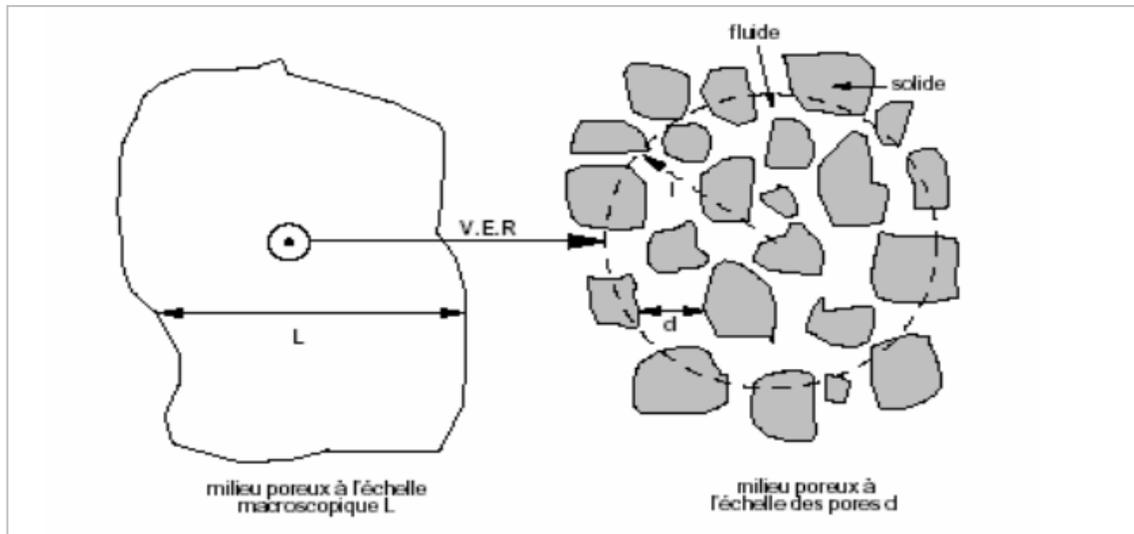
**Figure II. 5:** Modèle parallèle de la conductivité thermique effective [20].

#### II .4 .5 Volume élémentaire représentatif (V.E.R)

Les équations du mouvement des milieux poreux sont formulées par la moyenne du volume, dans laquelle le volume élémentaire représentatif (V.E.R) joue un rôle essentiel. Il s'agit d'attribuer les traits d'un volume convenablement représentatif à un point mathématique précis, permettant le calcul et la mesure de moyennes de propriétés, selon la proposition de (Baer, 1972).

Selon la définition de Marsily en 1981, le (V.E.R) est un volume à pores multiples, permettant le calcul d'une propriété universelle. La taille de ce volume est arbitraire mais doit être suffisamment petite pour que les paramètres varient en douceur entre les domaines voisins [22].

Les dimensions du volume seront sensiblement supérieures à la taille des pores mais considérablement inférieures à la masse globale de la matrice solide, illustrée sur la figure (II.4), se trouve la taille intermédiaire  $l$  désignant le volume élémentaire représentatif (V.E.R). Elle existe entre l'échelle macroscopique  $L$  du milieu poreux et l'échelle des pores  $d$  [23].



**Figure II. 6:** Représentation schématique du volume élémentaire représentatif [23].

Pour répondre aux critères requis, le volume élémentaire représentatif doit satisfaire aux conditions suivantes :

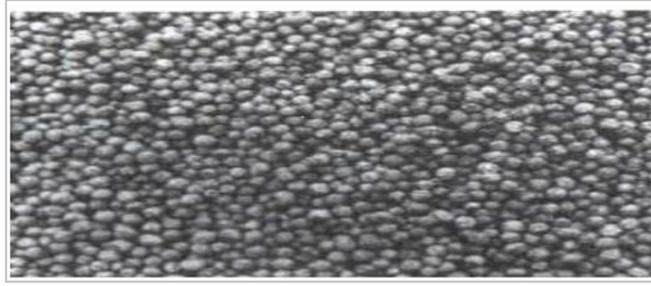
- Dans la plupart des cas, les dimensions du VER ont tendance à dépasser la taille des grains.
- Il est important que les VER restent suffisamment compacts pour permettre la représentation des fluctuations des paramètres dans le domaine de l'étude sous la forme de fonctions ininterrompues.

## II.5. Classification des milieux poreux

Lorsque des espaces vides dans un milieu poreux forment des interconnexions, des fluides peuvent s'y écouler. Généralement, ces espaces doivent être complètement saturés par un fluide monophasique. Les milieux poreux sont composés d'une matrice solide qui peut prendre deux formes distinctes, conduisant à deux grandes familles de milieux poreux :

### II.5.1 Milieu poreux non consolidé:

La phase solide prend forme sous la forme de grains ou de fibres séparés qui restent non liés, comprenant des matériaux comme le sable, le gravier, les billes d'acier et le verre.



**Figure II. 7:** Milieu poreux non consolidé [23]

### **II.5.2 Milieu poreux consolidé :**

Une phase solide compacte qui ne peut pas être subdivisée en grains ou en fibres est composée de grains cimentés tels que le calcaire, le grès, la céramique et les tissus organiques de plantes et d'animaux.



**Figure II. 8:** Milieu poreux consolidé [23].

### **II.6 Modèles d'écoulement dans les milieux poreux**

Des études de recherche antérieures ont principalement utilisé la loi de Darcy pour décrire l'écoulement à travers des milieux poreux, en supposant sa validité. Cependant, cette loi est uniquement applicable aux écoulements à faible vitesse et aux milieux poreux à porosité moyenne. À mesure que la vitesse de filtration augmente, les effets d'inertie prennent de l'ampleur, nécessitant la nécessité de modifier la loi de Darcy.

Les experts ont suggéré plusieurs extensions de la loi de Darcy pour tenir compte de toutes les variables impliquées dans l'écoulement des médias poreux et fournir des descriptions plus précises.

**II.6.1 Modèle de Darcy :**

Darcy [24] a proposé une loi expérimentale en 1856 pour expliquer le mouvement des fluides uniformes dans les matériaux poreux. Cette loi s'exprime comme suit :

$$\overline{\nabla P} = -\frac{\mu}{k} \overline{V} \quad [\text{II} - 7]$$

Où  $\overline{V}$  est la vitesse de filtration,  $\mu$  est la viscosité dynamique du fluide,  $K$  est la perméabilité du milieu poreux et  $\overline{\nabla P}$  le gradient de pression appliqué. Notamment, la loi de Darcy néglige l'impact de la diffusion visqueuse causée par le frottement paroi-fluide et les influences inertielles. Par conséquent, d'autres modèles qui tiennent compte de ces facteurs existent, notamment :

**II.6.2 Modèle de Darcy-Brinkman :**

En 1947, Brinkman a développé la loi de Darcy [25] en incorporant une composante reflétant le paramètre de diffusion visqueuse dans l'équation de Stokes.

$$\overline{\nabla P} = -\frac{\mu}{k} \overline{V} + \mu_{\text{eff}} \overline{\nabla^2 V} \quad [\text{II} - 8]$$

Où le premier terme de second membre de droite est le terme de Darcy et le deuxième et appelé le terme de Brinkman.

**II.6.3 Modèle de Brinkman-Wooding :**

Wooding [25] a suggéré l'expansion de l'équation de Darcy-Brinkman en 1957, qui comprenait un terme convectif modélisé d'après les équations de Navier-Stokes par analogie.

$$\frac{\rho}{\varepsilon^2} (\overline{V} \cdot \overline{\nabla}) \overline{V} = -\overline{\nabla P} - \frac{\mu}{k} \overline{V} + \mu_{\text{eff}} \overline{\nabla^2 V} \quad [\text{II} - 9]$$

Le terme de gauche de l'équation (I. 6) est le terme de convection qui tient compte des effets inertiels quand les vitesses sont importantes.

**II.6.4 Modèle de Forchheimer :**

Lorsque les taux de filtration atteignent un certain niveau, l'effet d'inertie non linéaire s'installe, rendant l'équation de Darcy inadéquate pour décrire l'écoulement du milieu poreux. Un modèle proposé par Ward (1964) a tenté de remédier à cette limitation :

$$\overline{\nabla P} = -\frac{\mu}{k} \vec{V} + \frac{\rho \cdot F}{\sqrt{K}} |\vec{V}| V \quad [\text{II} - 10]$$

Où F est la constante adimensionnelle de Forchheimer.

### II.6.5 Modèle de Darcy-Brinkman-Forchheimer :

Les suggestions initiales de Forchheimer et Brinkman ont abouti à l'élaboration du cadre global suivant :

$$\frac{\rho}{\varepsilon^2} (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} = -\overline{\nabla P} + \mu_{\text{eff}} \nabla^2 V - \frac{\mu}{k} \vec{V} - \frac{\rho \cdot F}{\sqrt{K}} |\vec{V}| V \quad [\text{II} - 11]$$

### II.6.6 Model d'équilibre :

Dans le **modèle d'équilibre**, le MCP liquide et le milieu poreux ont la même température, et l'équation de Brinkman Forchheimer est juste ajoutée à l'équation de quantité de mouvement en tant que nouveau terme source.

L'équation d'énergie est donnée comme suit qui est la même pour le milieu fluide et poreux [26]

$$\rho_f \left( C_f + L \frac{d\lambda}{dT_f} \right) \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f C_f (\vec{V} \cdot \nabla T_f) = K_e \nabla^2 T_f \quad [\text{II} - 12]$$

Où  $k_e$  est calculé comme la moyenne volumique des conductivités thermiques du matériau de matrice poreuse et MCP, est donné comme [27] :

$$k_e = (1 - \varepsilon) k_s + \varepsilon k_f \quad [\text{II} - 13]$$

Notez que pour le système MCP uniquement, dans les équations gouvernantes, la porosité est égale à 1, et les termes sources dans les équations de quantité de mouvement dus à la présence du milieu poreux sont omis.

### II.6.7 Model de non équilibre :

Dans le modèle de **non-équilibre thermique**, le milieu poreux et le fluide ne sont pas en équilibre thermique, et les températures du solide et du fluide sont résolues séparément en utilisant une approche semi-heuristique basée sur un modèle de non-équilibre thermique local. Ce modèle est plus précis et utilisé dans cette étude [29,30] dérivé d'abord par Vafai et Tien" puis modifié par Cheng et Hsu". [28]\*\*

Le premier terme lié à la présence du milieu poreux est le terme de perte visqueuse, où K est calculé sur la base de l'équation empirique de Calmidi et Mahajan [33] qui a été obtenue à partir d'expériences comme suit [32] :

$$K = 0.00073d_p^2(1 - \varepsilon)^{-0.224} \left(\frac{d_l}{d_p}\right)^{-1.11} \quad [\text{II-14}]$$

Le deuxième terme est un terme de perte inertielle, où C'est déterminé comme [32]:

$$C = 0.00212(1 - \varepsilon)^{-0.132} \left(\frac{d_l}{d_p}\right)^{-1.63} \quad [\text{II-15}]$$

Et  $d_l$  est le diamètre du ligament ou de la cellule donné comme [31]:

$$d_l = 1.18d_p \sqrt{\frac{1-\varepsilon}{3\pi} \left(\frac{1}{1-e^{-(1-\varepsilon)/0.04}}\right)} \quad [\text{II-16}]$$

Les caractéristiques du milieu poreux sont définies par trois paramètres dont le  $\varepsilon$ ,  $\omega$  et  $d_l$ , et en connaissant deux de ces paramètres, l'autre peut être calculé à partir de l'équation [2- 14] , où  $d_p$  est donné par [31]:

$$d_p = 0.0254(\text{m})/\omega(\text{PPI}) \quad [\text{II-17}]$$

Ou PPI signifie partie par pouce.

Les équations d'énergie pour le solide et le fluide sont données comme [28]:

**\*Pour le MCP :**

$$\varepsilon\rho_f \left(C_f + L \frac{d\lambda}{dT_f}\right) \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f C_f (\vec{V} \cdot \nabla T_f) = K_{fe} \nabla^2 T_f - h_{sf} A_{sf} (T_f - T_s) \quad [\text{II-18}]$$

**\*Pour le milieu poreux :**

$$(1 - \varepsilon)\rho_s C_s \left(\frac{\partial T_s}{\partial t}\right) = K_{se} \nabla^2 T_s - h_{sf} A_{sf} (T_s - T_f) \quad [\text{II-19}]$$

Dans l'équation de l'énergie, L est défini sur la base de la température du fluide, du solidus et du liquidus [34]

$$\lambda = \frac{\Delta H}{L} \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{Si } T < T_{\text{solidus}} \\ 1 & \text{Si } T > T_{\text{liquidus}} \\ \frac{T - T_{\text{solidus}}}{T_{\text{liquidus}} - T_{\text{solidus}}} & \text{Si } T_{\text{solidus}} < T < T_{\text{liquidus}} \end{array} \right\} \quad [\text{II}-20]$$

Et l'enthalpie totale est la somme des sens et la chaleur latente donnée comme :

$$H = h + \Delta H \quad [\text{II}-21]$$

Où h est défini comme :

$$H = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T C_p dt \quad [\text{II}-22]$$

Et  $\Delta H$  est la chaleur latente fractionnaire du MCP qui peut varier entre zéro pour le solide et L (chaleur latente de fusion) pour le liquide.

Dans le modèle de non-équilibre thermique, la conductivité thermique effective du fluide et du solide doit être déterminée et utilisée indépendamment. Il existe différents modèles théoriques dans la littérature basés sur les caractéristiques poreuses, la conductivité thermique du solide et du fluide [33, 35, 36]. Les modèles sont classés en fonction de la cellule unitaire. Le modèle cellulaire «tétraikadecaèdre» de Boomsma et Poulikakos est utilisé dans cette étude qui est introduit pour la première fois en 2001[38] puis corrigé en 2011[37]. Dans ce modèle, la forme générale de la conductivité thermique effective est définie comme [38, 37]:

$$K_{\text{eff}} = \frac{1}{\sqrt{2}(R_A + R_B + R_C + R_D)} \quad [\text{II}-23]$$

Où :

$$R_A = \frac{4\sigma}{(2e^2 + \pi\sigma(1-e))K_s + (4 - 2e^2 - \pi\sigma(1-e))K_f} \quad [\text{II}-24]$$

$$R_B = \frac{(e-2\sigma)^2}{(e-2\sigma)e^2k_s + (2e-4\sigma - (e-2\sigma)e^2)k_f} \quad [\text{II}-25]$$

$$R_C = \frac{\sqrt{2}-2e}{\sqrt{2}\pi\sigma^2K_s + (2-\sqrt{2}\pi\sigma^2)k_f} \quad [\text{II}-26]$$

$$R_D = \frac{2e}{e^2k_s + (4-e^2)k_f} \quad [\text{II}-27]$$

Où  $e = 0.339$

Et :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sqrt{2}\left(2 - \left(\frac{3\sqrt{2}}{4}\right)e^3 - 2\varepsilon\right)}{\pi(3 - 2\sqrt{2}e - e)}} \quad [\text{II}-28]$$

Ensuite, la conductivité thermique effective du fluide et le solide est calculé à partir de l'équation [II-29] comme :

$$k_{fe} = k_{eff}/k_s = 0 \quad [\text{II}-30]$$

$$k_{se} = k_{eff}/k_f = 0 \quad [\text{II}-31]$$

Coefficient de transfert thermique local [39]:

$$Re = \frac{\mu C_p}{k} \quad [\text{II}-32]$$

$$h_{sf} = \begin{cases} \frac{0.76Re^{0.4}Pr^{0.37}k_{mcp}}{d_l} \text{ pour } 0 < Re \leq 40 \\ \frac{0.52Re^{0.5}Pr^{0.37}k_{mcp}}{d_l} \text{ pour } 40 < Re \leq 1000 \\ \frac{0.26Re^{0.6}Pr^{0.37}k_{mcp}}{d_l} \text{ pour } 1000 < Re \leq 20000 \end{cases} \quad [\text{II}-33]$$

Où :

$A_{sf}$  est donné par [40]:

$$A_{sf} = \frac{3\pi d_l (1 - e^{-(1-\varepsilon)/0.04})}{0.59d_p^2} \quad [\text{II}-34]$$

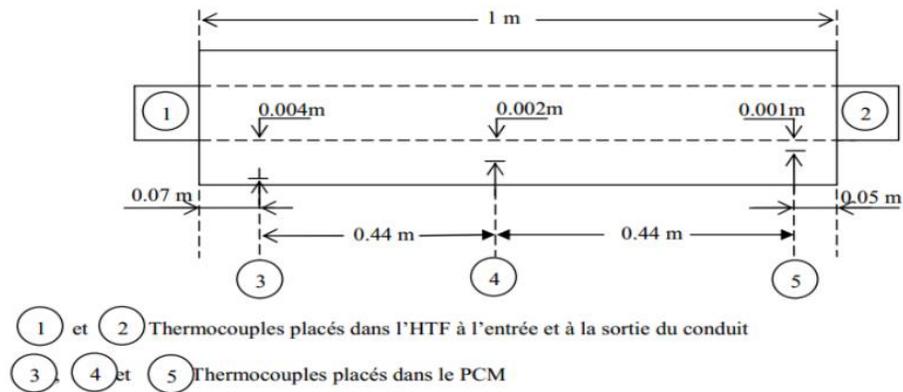
Dans la littérature on trouve un nombre important de recherches et d'investigations réalisées sur le stockage thermique, dans différentes géométries et en présence d'un MCP, la mousse métallique

## II.7 Quelques travaux sur le stockage de l'énergie thermique par MCP uniquement :

**Lacroix (1993)** [41] a développé un modèle théorique pour prédire le comportement transitoire d'une unité de stockage constituée de tubes cylindriques en matériau à changement de phase (PCM), avec un fluide caloporteur (HTF) circulant à l'intérieur des tubes en

régimes laminaire et turbulent. Le problème de stockage est traité avec la méthode d'enthalpie couplée avec le transfert de chaleur par convection dans le fluide caloporteur. Les prédictions numériques sont validées avec les données expérimentales. Une série d'expériences numériques est réalisée pour évaluer les effets de différents paramètres thermiques et géométriques sur le processus de transfert de chaleur et sur le comportement du système de stockage. Les résultats montrent que le rayon du tube, le débit massique et la température d'entrée du fluide doivent être choisis avec soin afin d'optimiser les performances de l'appareil.

L'unité de stockage est montrée dans la figure ( II .7).

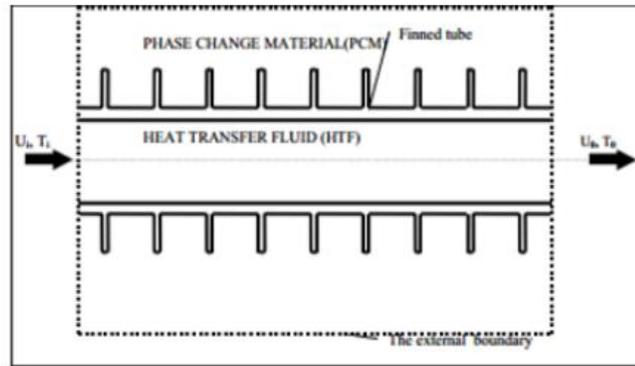


**Figure II . 7 :** Dispositif expérimental de stockage.

**Erek (2003)** [42] a étudié l'amélioration du transfert de chaleur dans un système de stockage d'énergie thermique en utilisant des tubes à ailettes. La solution du système consiste en la résolution des équations du fluide de transfert (HTF), de la paroi et la nageoire, et le matériau à changement de phase (PCM) en un seul domaine.

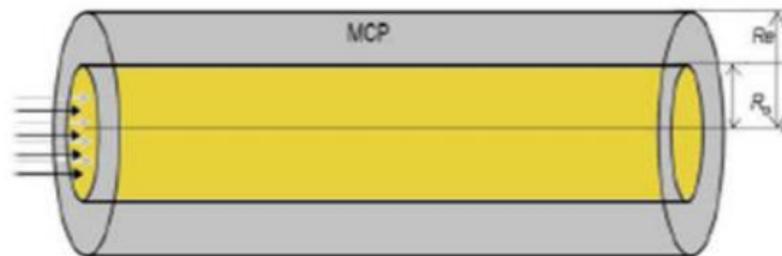
Le changement de phase étudié est un phénomène bidimensionnel autour d'un tube horizontal à ailettes radiales. La distribution de la température dans le réservoir de stockage, la quantité d'énergie stockée sont calculés avec précision.

Le modèle physique du problème, est représenté sur la figure ( II.8)



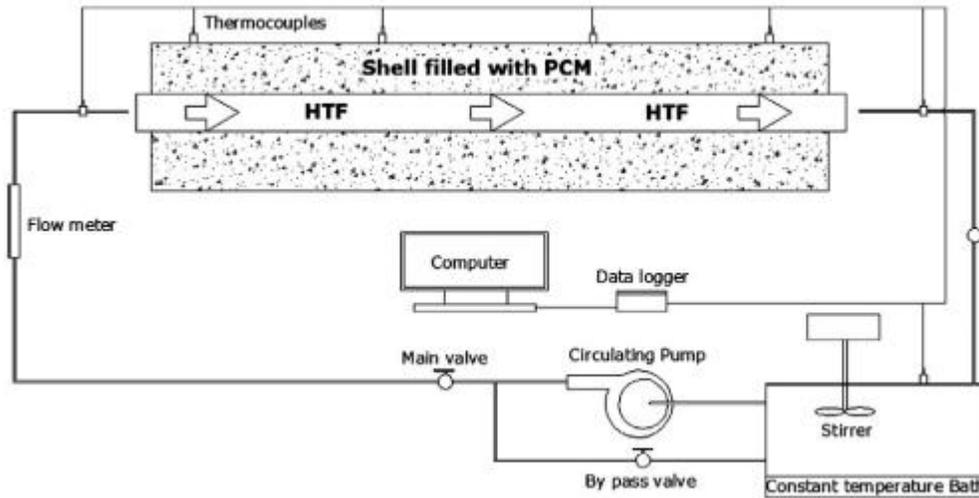
**Figure II. 8:** Schéma de système d'énergie thermique de tube à ailette.

**El Bahjaoui (2013).** [43] à présenté une étude numérique d'un élément de stockage d'énergie par chaleur latente de fusion d'un matériau à changement de phase MCP, la n-octadécane. L'élément de stockage d'énergie est constitué de deux tubes concentriques. L'espace annulaire de ceux-ci est rempli de MCP. Celui-ci est chauffé par un fluide caloporteur (Eau) en écoulement pulsé dans le tube intérieur .



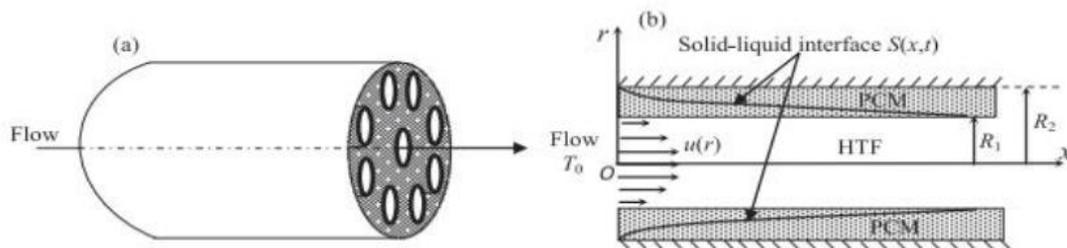
**Figure II.9 :** Le modèle physique étudié.

Kibria, M. A., Anisur, M. R., Mahfuz, M. H., Saidur, R., Metselaar ( 2014) Une étude numérique et expérimentale du processus de changement de phase dominé par la conduction thermique dans une unité de stockage thermique est présentée dans cet article. Le stockage d'énergie thermique implique un arrangement de coquille et de tube où la cire de paraffine comme matériau de changement de phase (PCM) est remplie dans la coquille. L'eau en tant que fluide caloporteur (HTF) est passée à l'intérieur du tube pour les cycles de charge et de décharge. Selon la conservation de l'énergie, une méthode numérique simple appelée itération alternative entre la résistance thermique et la température a été développée pour l'analyse du transfert de chaleur entre le PCM et le HTF pendant les cycles de charge et de décharge.



**Figure II. 10.** Schema du dispositif expérimental

**Bechiri et Mansouri (2015)** [44] ont présenté une solution analytique d'une unité de stockage de chaleur latente (LHSU) constituée de deux tubes concentriques. La solution a été obtenue en utilisant la fonction exponentielle intégrale et la technique de séparation des variables. Le fluide de travail (eau) circulant par convection forcée à l'intérieur du tube intérieur charge et décharge le PCM. La comparaison entre les prévisions analytiques et les données expérimentales montrent un bon accord. Afin d'étudier la performance du système et son optimisation, la distribution des températures dans le PCM au cours de la fusion /solidification, l'énergie stockée, la position de l'interface et l'efficacité thermique ont été obtenues par une série de calculs numériques et représentés graphiquement.



**Figure II.11 :** Schéma du système de stockage d'énergie thermique latente: a) unité de stockage, b) module de stockage.

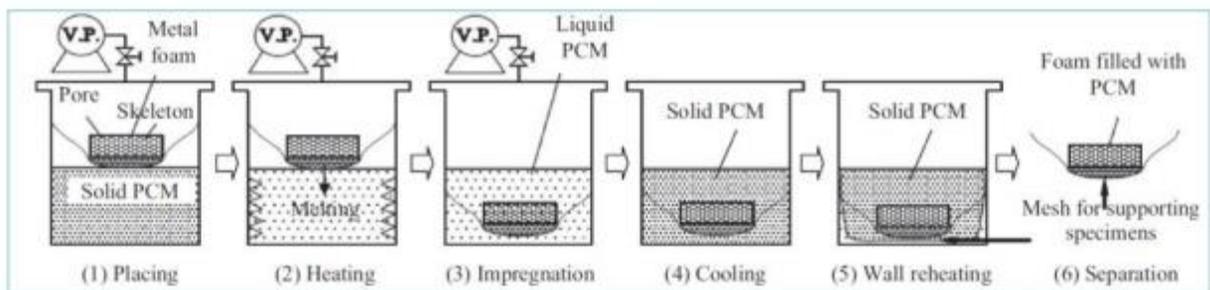
### II.8 Quelques travaux sur le stockage de chaleur par MCP/mousse métallique :

Deux méthodes sont disponibles pour créer des composites de mousse métallique/MCP. La première technique consiste à immerger la mousse métallique dans du MCP liquide, en veillant à ce que les pores soient remplis par le MCP.

Cette méthode a été problématique, les chercheurs ont utilisé une deuxième méthode de préparation, connue sous le nom employé par Mallow et al [47] et Righetti et al [48]. Une technique simple, cette méthode ne nécessite pas d'équipement spécialisé. Cependant, il souffre d'un problème commun - l'air emprisonné dans les pores de la mousse métallique empêche l'imprégnation du MCP, ce qui entraîne une diminution du facteur d'imprégnation. Afin de résoudre ce problème d'imprégnation sous vide, telle que documentée dans la littérature.

Cette méthode consiste à évacuer l'air des pores de la mousse avant de l'immerger dans le liquide MCP. Xiao et al [45, 46], Zhang et al [49] et Jin et al [50] ont tous utilisé cette technique, qui comprend six étapes, comme illustré à la figure 1.16. Pour créer une mousse métallique et un composite MCP, la mousse et le MCP sont placés dans un four à une température de sous-fusion de MCP et une pression de vide inférieure à 0,5 mbar pour éliminer l'air des pores de la mousse. Par la suite, tout en maintenant la pression du vide, le MCP est chauffé à une température de fusion et versé sur la mousse pour l'immerger complètement.

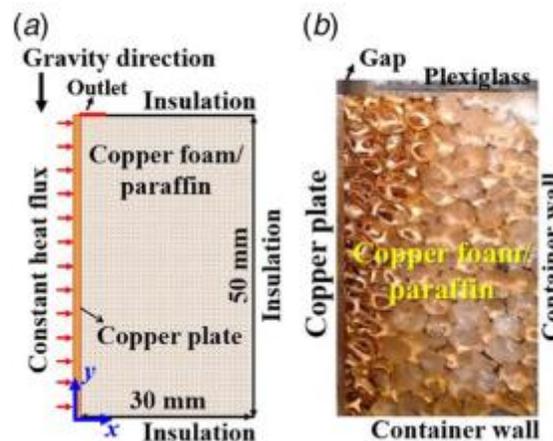
Ensuite, la pression est augmentée jusqu'aux niveaux atmosphériques et le composite est refroidi en dessous du point de fusion du MCP. Une fois le MCP complètement solidifié, le composite est prêt à l'emploi. Des études récentes ont montré que l'imprégnation sous vide donne des composites de mousse métallique avec des facteurs d'imprégnation allant de 95% à 98,6%, dépassant ceux des méthodes d'imprégnation directe. [45,46]



**Figure II.12:** Protocole de préparation des composites mousses métalliques /MCP [45].

Dans une étude menée par Li et al. [51], la conductivité thermique d'un composite mousse de cuivre/acétate de sodium tri-hydraté AST a été étudiée. Les porosités des mousses de cuivre testées variaient de 92,4 % à 97,3 %, avec des tailles de pores comprises entre 5 et 25 PPI. Les résultats ont révélé que la conductivité thermique du composite était de  $6,8 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  lorsque la porosité de la mousse de cuivre était de 92,4 %, ce qui est 11 fois supérieur à celui de l'AST pur ( $0,59 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ). De plus, l'étude a établi que la conductivité thermique du composite diminue avec l'augmentation de la porosité de la mousse de cuivre, allant de  $6,8 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  à  $3,3 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

Dans une étude de Yao et al. [52], le processus de solidification de la paraffine RT27 avec une température de solidification de  $26^\circ\text{C}$  a été étudié expérimentalement. Cela a été fait en infiltrant la paraffine dans une mousse de cuivre qui avait une porosité de 97,4 % et un diamètre de pore de 10 PPI. Les résultats ont révélé que le composite mousse de cuivre/RT27 se solidifiait 2,8 fois plus vite que le RT27 seul. Les chercheurs ont attribué cela au transfert de chaleur amélioré résultant de l'utilisation de la mousse de cuivre



**Figure II.13 :** (a) domaine physique de problématique (mousse métallique avec MCP) (b) photo expérimentale

Meng et al (2017), ont construit une unité de stockage de l'énergie thermique latente (LTES) en tube dans un réservoir utilisant la paraffine comme MCP, qui peut être utilisée dans de nombreuses applications. Afin d'améliorer les performances thermiques de l'unité LTES, le PCM composite est fabriqué en incorporant de la mousse de cuivre dans de la paraffine pure. Les performances de l'unité LTES avec le MCP composite pendant les processus de chargement et de déchargement de la chaleur sont étudiées expérimentalement [53].

# CHAPITRE III

## MODÉLISATION MATHÉMATIQUE ET POSITION DE PROBLÈME

### III.1 Introduction

Le phénomène de changement de phase solide-liquide est associé à plusieurs applications pratiques. Il se produit dans une large gamme de procédés industriels, tels que la solidification des pièces moulées, l'ingénierie environnementale et le système de stockage d'énergie thermique par chaleur latente et le confort thermique des bâtiments. Dans ces processus, la matière est soumise à un changement de phase.

Auparavant, les méthodes analytiques étaient les seuls moyens disponibles pour la résolution des problèmes de changement de phase. Bien que les méthodes analytiques offrent une solution exacte mais elles sont limitées, telque sont principalement destinées aux cas unidimensionnels avec des conditions initiales simples

Cependant, les phénomènes de changement de phase pratiquement sont tridimensionnel et compliqués.

En effet, la modélisation numérique devienne souvent nécessaire, ceci par l'utilisation des approches les plus économiques et les plus rapides pour mieux comprendre les processus pratiques impliquant les problèmes de changement de phase.

Cette résolution numérique fait recours à l'une des méthodes numériques suivantes : des différences finies ; des éléments finis ; ou des volumes finis. Le succès de cette dernière méthode réside dans sa capacité à gérer des géométries les plus complexes, et à prédire les écoulements à contre courant et ayant des zones de recirculation.,

Dans ce chapitre on va décrire en détails le modèle physique de cette étude, les conditions aux limites et opératoires (pression, température, débit volumique...),les modèles mathématiques utilisé ainsi, le logiciel Fluent qui est utilisé pour résoudre le problème numériquement.

### III.2 Solutions numériques du transfert de chaleur avec changement de phase:

#### III.2.1 Méthode à maillage fixes:

Cette méthode repose sur l'hypothèse ou l'interface de transition n'est pas connue. Alors une seule équation d'énergie doit être résolue dans les deux phases. La solution numérique du procédé s'effectue sur un maillage spatial qui reste fixe le long du calcul. Cette méthode pose des instabilités numériques due aux gradients de température dans la région pâteuse. Deux grandes méthodes sont

les plus utilisées pour ce type de problèmes : la méthode de la capacité effective et la méthode Enthalpique.[54]

### III.2.1.1 Méthode de la capacité effective:

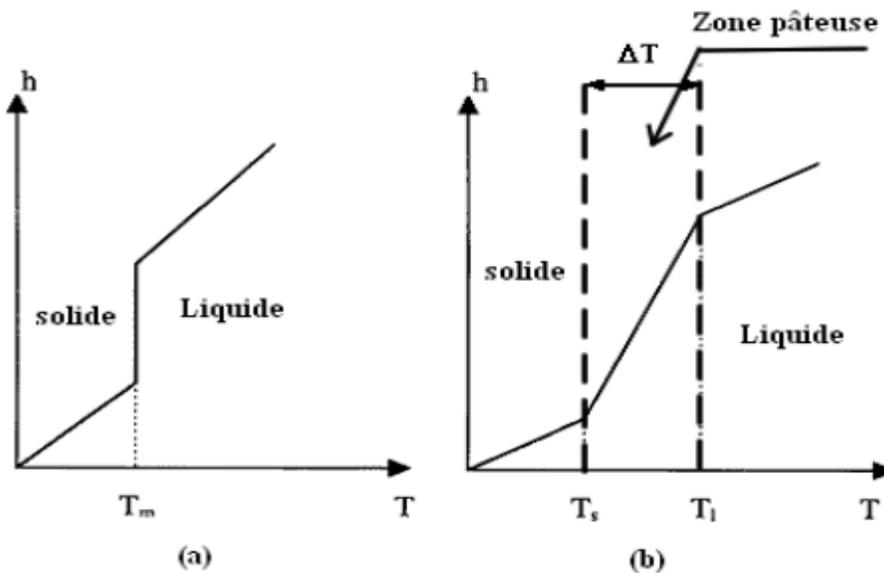
Dans cette méthode, la chaleur latente s'explique par l'augmentation de la capacité calorifique  $C_p$  du MCP dans la plage de température de changement de phase [55].

### III.2.1.2 La méthode Enthalpique:

La caractéristique essentielle de base pour cette méthode est que l'évolution de la chaleur latente s'explique par l'enthalpie ainsi que par la relation entre l'enthalpie et la température. Le procédé peut être illustré en considérant un problème de transfert de chaleur unidirectionnel contrôlé par la conduction thermique. Une équation appropriée pour un tel cas peut être exprimée comme :

$$\rho(T) \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x}) \quad (\text{III-1})$$

La relation entre l'enthalpie et la température peut être définie en fonction des caractéristiques de dégagement de chaleur latente du matériau à changement de phase. [55].



**Figure III.1** : Enthalpie en fonction de la température pour: (a) changement de phase isotherme;(b) changement de phase non isotherme

La méthode Enthalpique a plusieurs limitations telles que :

1. Prends plus de temps de calcul en raison des petits pas de temps et d'espace.

2. La chaleur latente absorbée et rejetée lors d'un changement de phase n'est pas entièrement représentée dans cette méthode.
3. Des oscillations de température se produisent près des conditions limites.

### III.3 Équations du Modèle mathématique:

#### III.3.1. Formulation mathématique gouvernantes pour le système de MCP seul :

Les équations exprimant les phénomènes du transfert thermique en régime laminaire sont principalement celles de dérivées des lois physiques de conservation de masse de la quantité de mouvement et de l'énergie.

Pour construire des modèles suffisamment détaillés et précis, il faut parfois tenir compte d'un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Pour notre cas, on suppose que :

Les propriétés thermo physiques du HTF et du MCP étaient constantes par rapport à la température.

1. La conduction thermique dans la direction axiale est négligée pour le MCP et le HTF.
2. La convection naturelle à l'intérieur du PCM n'a pas été prise en compte, c.-à-d. la force de flottabilité pour le changement de volume en raison du changement de phase a été ignorée.
3. La température initiale du stockage était uniforme et se trouvait à la température de fusion.
4. Un mur adiabatique a été supposé.
5. Le HTF entrant à l'intérieur était laminaire et se développait simultanément.

Compte tenu des précédentes considérations, les équations qui régissent le problème en question

sont les suivantes :

#### III.3.1.1 Équation de continuité:

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

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (\text{III -2})$$

#### III.3.1.2 L'équations de quantités de mouvements:

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_j u_i) = \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_i} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + S_i \quad (\text{III - 3})$$

### Équation de l'énergie

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + S_h \quad (\text{III - 4})$$

Où  $\rho$  est la densité,  $k$  indique la conductivité thermique,  $\mu$  est la viscosité dynamique,  $S_i$  et  $S_h$  sont les termes sources,  $u_i$  est la composante de vitesse dans la direction  $i$ ,  $x_i$  est une coordonnée cartésienne et  $h$  est l'enthalpie spécifique. L'enthalpie sensible  $h_s$  est donné par :

$$h_s = h_{ng} + \int_{T_s}^T C_p dT \quad (\text{III - 5})$$

Et l'enthalpie totale,  $H$  est définie comme:

$$H = h_s + \Delta H \quad (\text{III - 6})$$

Où  $\Delta H = \gamma L$  est le changement d'enthalpie due au changement de phase,  $h_{ng}$  est l'enthalpie de référence à la température de référence  $T_{ref}$ ,  $C_p$  est la chaleur spécifique,  $L$  est l'enthalpie spécifique de fusion (état liquide) et  $\gamma$  est la fraction liquide pendant le changement de phase qui se produit sur une plage de températures  $T_{solidus}$  ;  $T_i$  ;  $T_{liquidus}$  définie par la relation suivante :  
7.(a,b,c)

$$T < T_{solidus} \text{ ( solid state ) : } \gamma = \frac{\Delta H}{L} = 0 \text{ (a)}$$

$$T_{solidus} < T < T_{liquidus} \text{ ( Mushy state ) : } 0 < \gamma = \Delta H < L \text{ (b)} \quad (\text{III-7})$$

$$T > T_{liquidus} \text{ ( liquid state ) : } \gamma = \frac{\Delta H}{L} = 1 \text{ (c)}$$

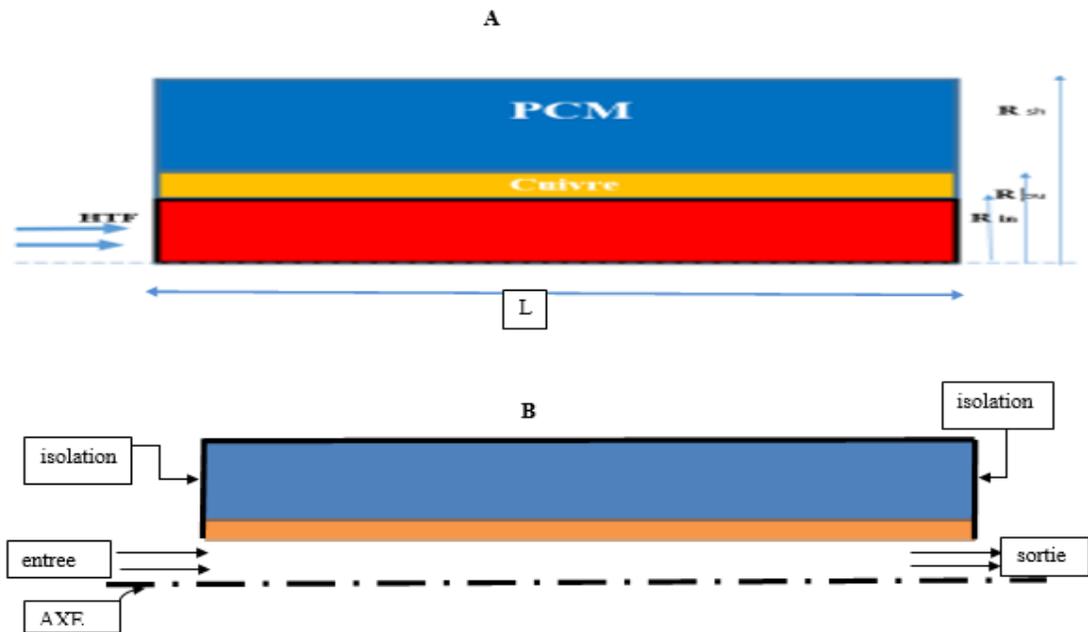
### III.4 Position du problème:

#### III.4.1 Problème physique étudié :

Le système de stockage et de tube a été étudié avec de la paraffine ; il consiste d'un tube en coaxial (voir figure III.2 a) précédemment utilisé par KiBria et al. [56]. Le tube intérieur est en cuivre. L'eau distillée circule dans le tube intérieur comme le HTF. Le matériau à changement de phase (cire de paraffine) remplit l'espace annulaire. La surface externe de l'unité de stockage est bien isolée figure (III.2 ,b.)

La longueur du tube de cuivre est de 1 m de long et le diamètre intérieur et extérieur du tube sont de 10,8 mm et 12,0 mm respectivement. Le diamètre intérieur de l'unité est de 36,0 mm comme la figure (III.2 ) montre.

Nous utilisons un maillage : Quadratique uniforme de 32000 cellule (500x64) ,a l'aide de logiciel gambit le maillage du domaine est représenté sur la figure (III.2 )



**Figure III.2 :** Le schéma du modèle physique axisymétrique (A) ainsi que les conditions aux limites(B).

#### III.4.2 Les conditions aux limites:

Dans la présente investigation on traite le transfert de chaleur bidimensionnel dans une échangeur bitube rempli de MCP destinée pour stocker l'énergie thermique. Le système physique considéré consiste à un écoulement permanent de l'eau chaude et on considère que les parois extérieures sont considérés comme adiabatiques. Les mêmes conditions aux limites utilisées pour toutes les configurations.

La cire de paraffine est le matériau à changement de phase utilisé pour ce cas ainsi que le cuivre est le matériau du tube centrique.

Table II.1 : Propriétés thermo-physique de la cire de paraffine , l'eau, cuivre ,aluminium, et de nickel

matériaux	Densité		Chaleur spécifique		Chaleur latente	Conductivité thermique		Viscosité dynamique	
	Solid	Liquide	Solid	Liquide		Solid	Liquide	Solid	Liquide
Cire de paraffine	910	790	2000	2150	190000	0.24	0.22	/	0.004108
Fluide caloporteur									
<b>Eau a` 88</b>	<b>967.1</b>				<b>4203</b>	<b>0.674</b>		<b>0.000324</b>	

**III.4.3 Objectifs de notre travail :**

Les objectifs de ce travail se devisent en plusieurs études :

- Etude numérique de stockage de chaleur lors d'un écoulement de l'eau chaude dans le MCP seul (phase de charge)
- Etude numérique de l'influence de l'ajout de la mousse métallique en cuivre au MCP sur la qualité de stockage thermique
- Etude numérique de l'effet de la porosité de milieu poreux sur la charge thermique
- Etude de l'effet de la densité des pores de la mousse métallique
- En fin , on a changer la nature de matériau de tube intérieur (cuivre, aluminium, nickel).

**III.5 Modélisation numérique.**

Notre travail est basé sur une configuration de forme tube coaxial (voir fig. III.2 a) qui a été utilisée précédemment par Kibria et al. [56]. c'est un système d'un échangeur de chaleur où il y a échange de chaleur entre une cire de paraffine et l'eau distillée qui circule dans le tube intérieur sous forme HTF le problème examiné est axisymétrique, un domaine de calcul schématique 2-D pour tous les sujets étudiés.

Les équations gouvernantes sont discrétisées à l'aide de l'algorithme SIMPLE avec le schéma PRESTO pour l'équation de correction de pression et le schéma QUICK pour les équations de quantité de mouvement et d'énergie. Les valeurs des facteurs de sous-relaxation sont fixées à 0,3, 0,6, 1 et 0,9 pour la pression, la vitesse, l'énergie et la fraction liquide, respectivement. Les critères de convergence pour les équations de continuité et de quantité de mouvement sont fixés à  $10^{-6}$  pour l'équation d'énergie, De plus, Nous avons simulé avec un pas de temps pour : 0.1 s Le nombre de pas est de 60000 s et le nombre maximum d'itérations par pas est de 300, HTF s'écoule à l'intérieur du tube à une température d'entrée de  $88^\circ\text{C}$  et à un débit massique de  $0,072\text{ kg/min}$ , tandis que le matériaux à changement de phase a une température de fusion de  $61^\circ\text{C}$  qui a été considéré comme température initiale pour tout le système.

### III.6 Formulation mathématique gouvernantes pour le système de MCP dans un milieu poreux [57]

#### III.6.1 Equation de continuité :

L'équation de continuité est définie comme suit en se basant sur les hypothèses mentionnées :

$$\varepsilon \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot \rho_f \vec{V} = 0 \quad (\text{III-8})$$

#### Equation de l'énergie :

$$\rho_f \left( C_f + L \frac{d\lambda}{dT_f} \right) \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f C_f (\vec{V} \cdot \nabla T_f) = k_e \nabla^2 T_f \quad (\text{III-9})$$

Où  $k_e$  est défini comme la conductivité thermique moyenne de volume de MCP et le milieu poreux

$$k_e = (1 - \varepsilon)k_s + \varepsilon k_f \quad (\text{III-10})$$

### III.6.2 Équation de la quantité de mouvement

Les équations de quantité de mouvement dans les directions x et y sont donnée par le **Modèle d'équilibre thermique**.

$$\rho f \frac{\partial u}{\partial t} + \rho f (\vec{V} \cdot \nabla u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu f (\nabla^2 u)$$

$$-Am \frac{(1-\lambda)^2}{\lambda^3 + 0.001} u - \left( \frac{\mu f}{K} + \frac{\rho f C |u|}{\sqrt{K}} \right) u$$

$$\rho f \frac{\partial v}{\partial t} + \rho f (\vec{V} \cdot \nabla v) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu f (\nabla^2 v) \quad (\text{III -11})$$

$$-Am \frac{(1-\lambda)^2}{\lambda^3 + 0.001} v - \left( \frac{\mu f}{K} + \frac{\rho f C |u|}{\sqrt{K}} \right)$$

$$v - \rho f g \beta \varepsilon (T - T_{ref})$$

Pour résoudre les équations gouvernantes, le logiciel ANSYS-FLUENT 16.0

### III.7 Définition du programme Fluent

ANSYS FLUENT est une application logicielle sophistiquée qui modélise des géométries complexes, l'écoulement des fluides, le transfert de chaleur et les réactions chimiques. Écrit en langage de programmation C, il capitalise sur l'adaptabilité et la force du langage. Cela lui permet d'offrir une flexibilité totale dans le maillage, y compris la capacité de résoudre les complications d'écoulement en utilisant des maillages 2D ou 3D non structurés qui peuvent être créés avec une relative facilité pour les géométries complexes. Et permet également d'affiner ou de grossir le maillage basé sur la solution d'écoulement [58]. Après la lecture d'un maillage dans ANSYS FLUENT, toutes les opérations restantes sont effectuées dans ANSYS FLUENT. Il s'agit notamment de définir les conditions aux limites, de définir les propriétés des fluides, d'exécuter la solution, affiner le maillage, et pos-traiter et afficher les résultats [58].

### III.8 Définition du programme Gambit

Le logiciel Gambit est un préprocesseur qui fonctionne comme un meilleur 2D/3D pour faciliter le maillage des domaines géométriques CFD (Computational Fluid Dynamics). Les résultats de ce processus sont des fichiers de type maillage qui peuvent être utilisés avec Fluent [59]. Ce meilleur est utilisé comme étape préliminaire avant d'exécuter un logiciel de simulation et offre la possibilité de produire des maillages structurés ou non structurés en coordonnées cartésiennes, polaires, cylindriques ou axisymétriques. Il est capable de créer des maillages complexes en deux ou trois dimensions en utilisant des maillages rectangulaires ou triangulaires [60]. Gambit est composé de trois fonctions principales : définir la géométrie du problème, ce qui implique soit de le construire s'il est simple, soit de l'importer via la CAO ; générer et vérifier le maillage ; et définir les frontières et les domaines de calcul, y compris les types de conditions aux limites [61].

# CHAPITRE IV

## MODÉLISATION MATHÉMATIQUE ET POSITION DE PROBLÈME

## IV.1 Introduction

Après avoir vu dans le chapitre précédent les détails du modèle, Ce chapitre a été consacré à la présentation des résultats et de leurs discussions. Ces résultats ont été obtenus numériquement par la résolution d'un modèle bidimensionnel qui a été développé avec succès pour traiter un problème de transfert de chaleur avec changement de phase (solide-liquide) dans un système MCP et MCP/mousse métallique.

Les procédures de calcul ont été effectuées par le code de calcul **FLUENT 16.0** pour résoudre les équations régissant le phénomène étudié.

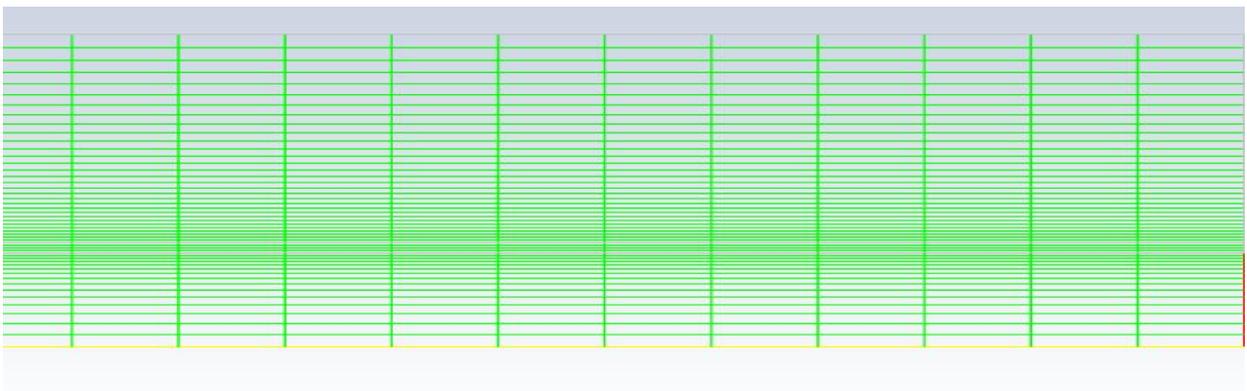
dans ce dernier chapitre on va discuter et interpréter les résultats obtenus ainsi, les courbes de la fraction liquide de fusion de MCP et les contours de température au cours de la fusion .

Une première action pour améliorer le transfert thermique dans le réservoir de stockage est de combiner le MCP avec un matériau plus conducteur afin d'obtenir une conductivité thermique globale plus élevée. Ainsi, il est possible de l'intégrer dans une matrice métallique ou de fabriquer un composite ayant des propriétés thermo-physiques meilleures.

Notre travail consiste à étudier l'influence de plusieurs paramètres sur le stockage thermique, à savoir l'effet de la nature de matériau de tube conducteur , et l'influence de l'ajout de la mousse métallique sur la qualité de stockage.

## IV.2 Génération du maillage:

On a utilisé un maillage carré raffiné près de la paroi de tube intérieur ; avec un pas d'espace de 0.5mm. Le nombre total des cellules de contrôle utilisées est 32000 cellule (500x64)



**Figure IV.1** : Maillage du domaine étudié (axisymétrique)

### IV.3 Validation du code de calcul :

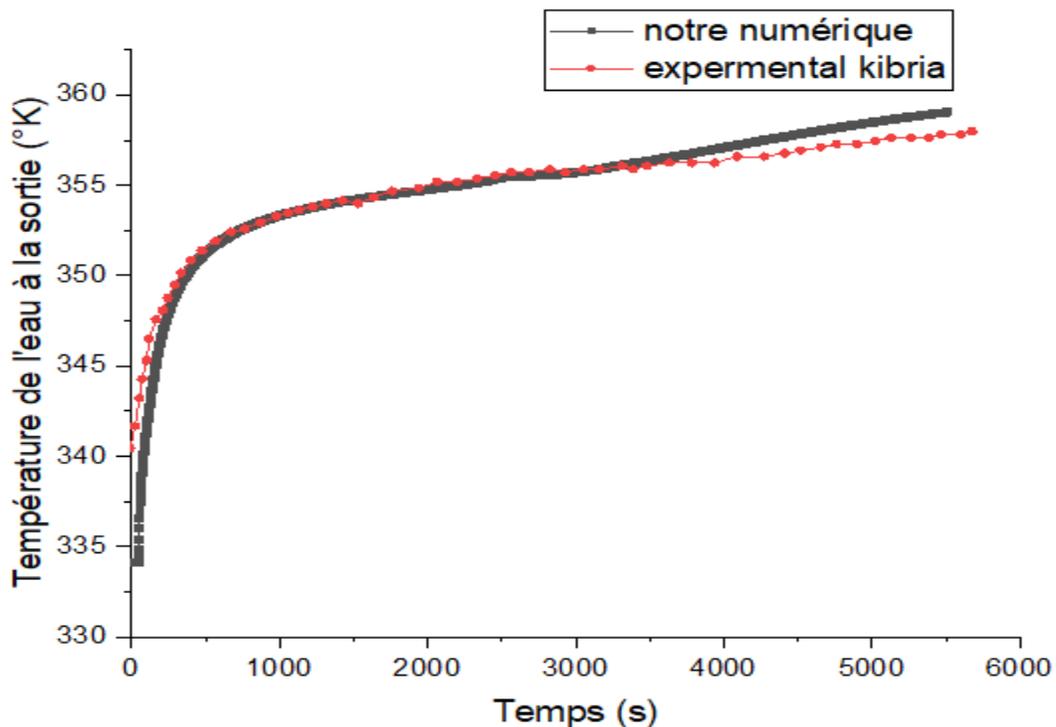
La validation du présent modèle a été effectuée par la comparaison des contours isothermes et l'évolution temporelle de la température avec les mesures expérimentales pour lesquelles la géométrie du système, les propriétés des matériaux et les conditions aux limites ont été les mêmes.

#### IV.3.1 Validation du système MCP seul:

Dans ce cas, le présent modèle a été validé sous les conditions aux limites suivantes:

- Un débit massique de l'eau de 0.072kg/min à l'entrée de tube et température  $T=88^{\circ}\text{C}$ .
- Les parois de l'échangeur sont adiabatiques

La Figure IV.2 illustre l'évolution temporelle de la température moyenne de HTF à la sortie pendant 6000 secondes. comparée avec les résultats expérimentaux de kibria [56], d'où une bonne concordance a été obtenue. ce qui nous permet de vérifier la validité de notre modèle



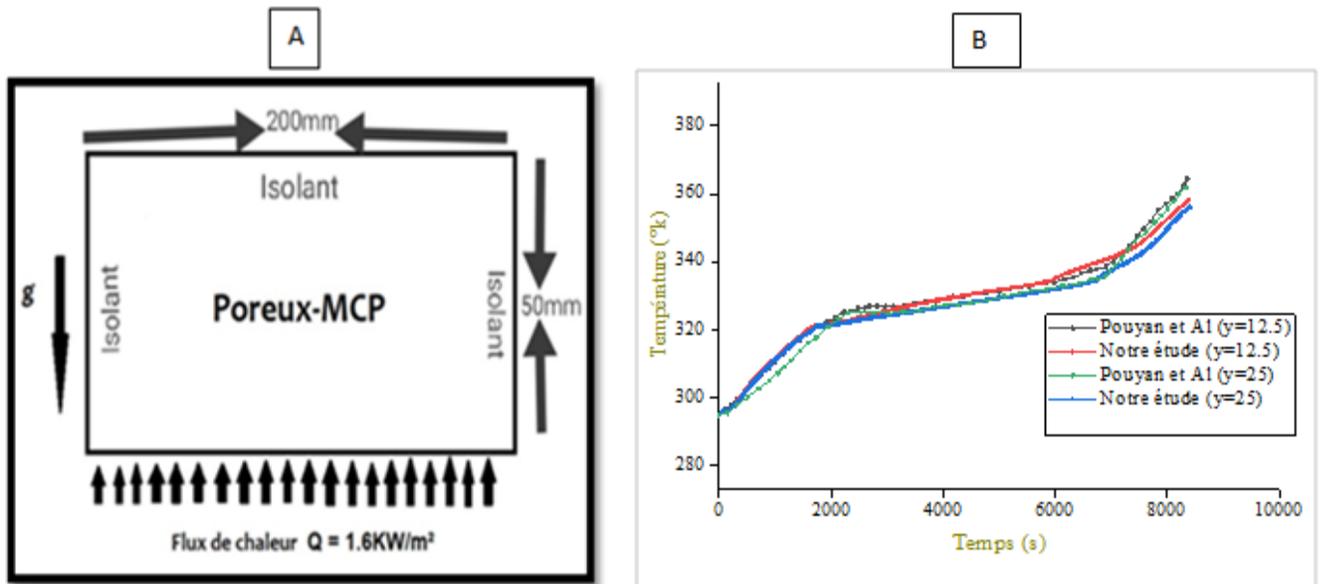
**Figure IV.2 :** Comparaison entre les températures de sortie prédites par le présent modèle et les données de(kibria) [56],

### IV.3.2 Validation du système MCP/mousse métallique:

Pour maîtriser le modèle milieu poreux immergé dans le MCP on a choisi un model de (Pouyant et Al) [62] où Le schéma du domaine physique est illustré sur la figure (IV.3.A). Dans le système, le MCP/MCP poreux est intégré dans une enceinte rectangulaire à parois adiabatiques, et un flux de chaleur est mis en œuvre au bas du système. Pour les dimensions de (200 × 50mm).

Le matériau du contenant ainsi que le milieu poreux est considéré comme du cuivre avec une conductivité thermique de 387,6 W/m K. Le flux de chaleur est de 1.6 KW/m<sup>2</sup>.

La Figure (IV.3.B) présente la comparaison entre nos résultats numériques et les résultats numériques de (Pouyant et Al) [62] dans le cas de la présence de mousse métallique avec MCP pour une durée de 8400 secondes. Les résultats montrent un bon accord entre les résultats numériques de (Pouyant et Al) [62], et notre numériques, ce qui nous permet de valider notre modèle ; la figure montre l'évolution de la température en fonction de temps en cinq localisations différentes qui ont été pris par pouyon. La vérification de température de domaine a été faite au milieu pour (Y=12.5 ; Y=25 ).



**Figure IV.2 :** Comparaison entre les températures de sortie prédites par le présent modèle et les données de(kibria)

## IV.4 Convergence des calculs

Une fois que l'utilisateur a entré le critère de convergence dans le code "ANSYS Fluent", toutes les itérations cesseront lorsque les résidus calculés seront inférieurs à cette valeur. Cette valeur est personnalisée pour établir le niveau de précision souhaité pour la solution approchée par le code de calcul (Fluent 16.0). La figure (IV.4) montre la convergence des résidus vers la valeur fixe. Dans ce cas, une valeur de  $10^{-6}$  a été utilisée.

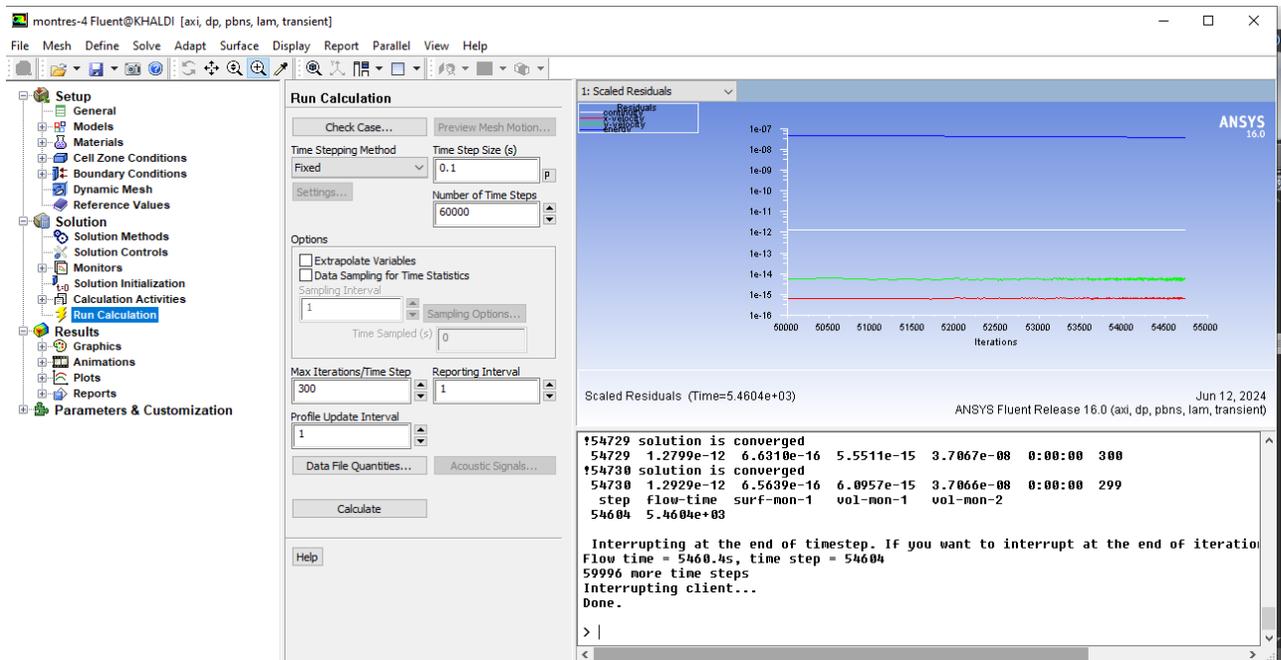


Figure IV.4 : Tracés des courbes de résidus.

### IV.4.1 Étude paramétrique:

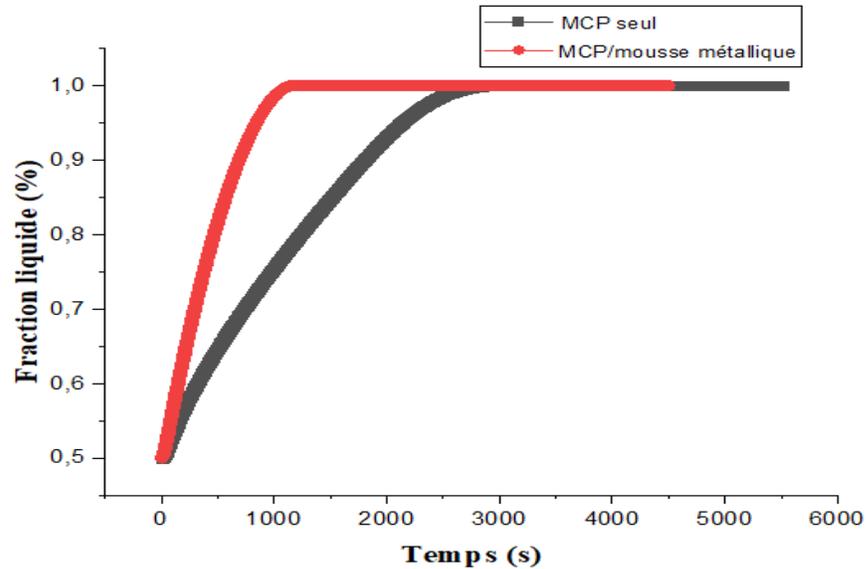
Dans ce qui suit, nous allons présenter nos résultats obtenus par prédiction numérique. Une étude paramétrique a été effectuée pour voir l'influence de plusieurs paramètres sur la qualité de stockage thermique.

## IV.5 Effet du poreux-MCP par rapport au MCP seul :

Pour analyser comment la conductivité thermique de la mousse métallique affecte la cinétique du changement de phase, nous avons examiné un cas de mousse avec une porosité (0,95) et une densité de pores (20 PPI), Notre enquête s'est concentrée sur le suivi d'évolution de

la fraction liquide produite au cours de la fusion (la charge) en fonction du temps, la température de MCP .

### IV.5.1 Fraction liquide



**Figure IV.5:** La fraction liquide à différents moments pour le système : MCP seul, le système Poreux-MCP

La Figure (IV.5) montre l'évolution de la liquéfaction de PCM lors de la charge thermique, on remarque que la l'ajout de milieu poreux au sein de PCM influe d'une manière remarquable sur la valeur de la fraction liquide tel que le PCM prend moins de temps pour se liquéfier en présence de la mousse métallique .

IV.5.2 Contours de Température :

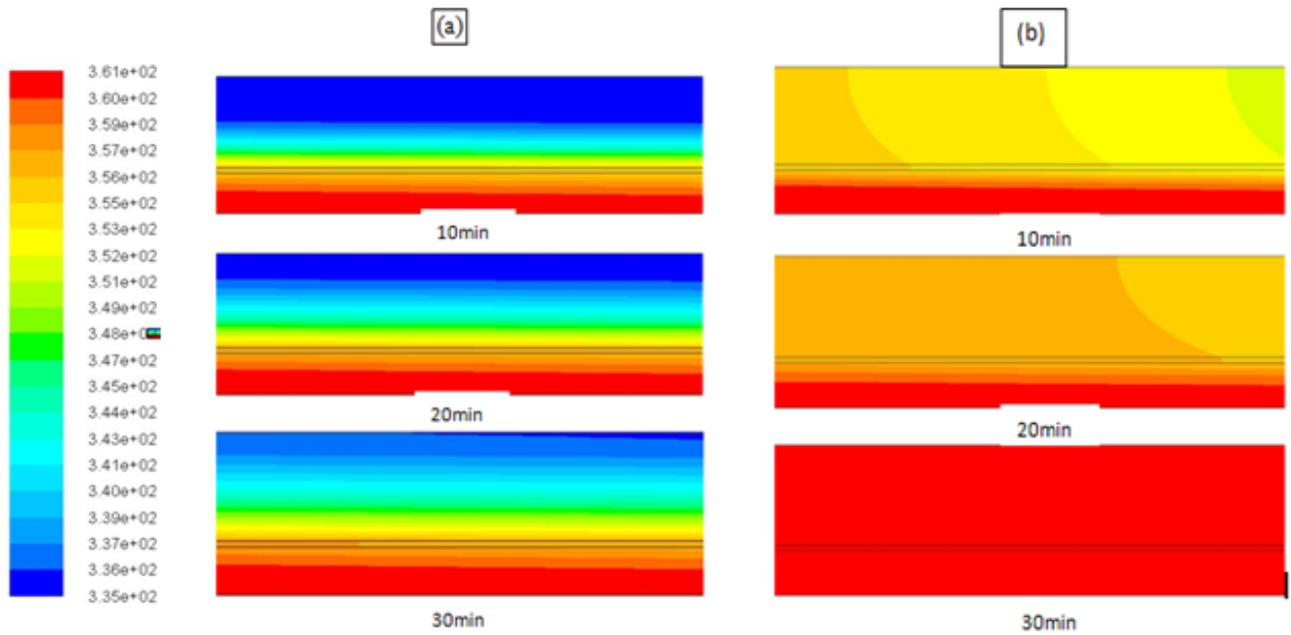


Figure IV.6: contours de température à différents moments pour le système : (a) MCP seul, (b) le système Poreux-MCP.

IV.5.3 Contours de fraction liquide :

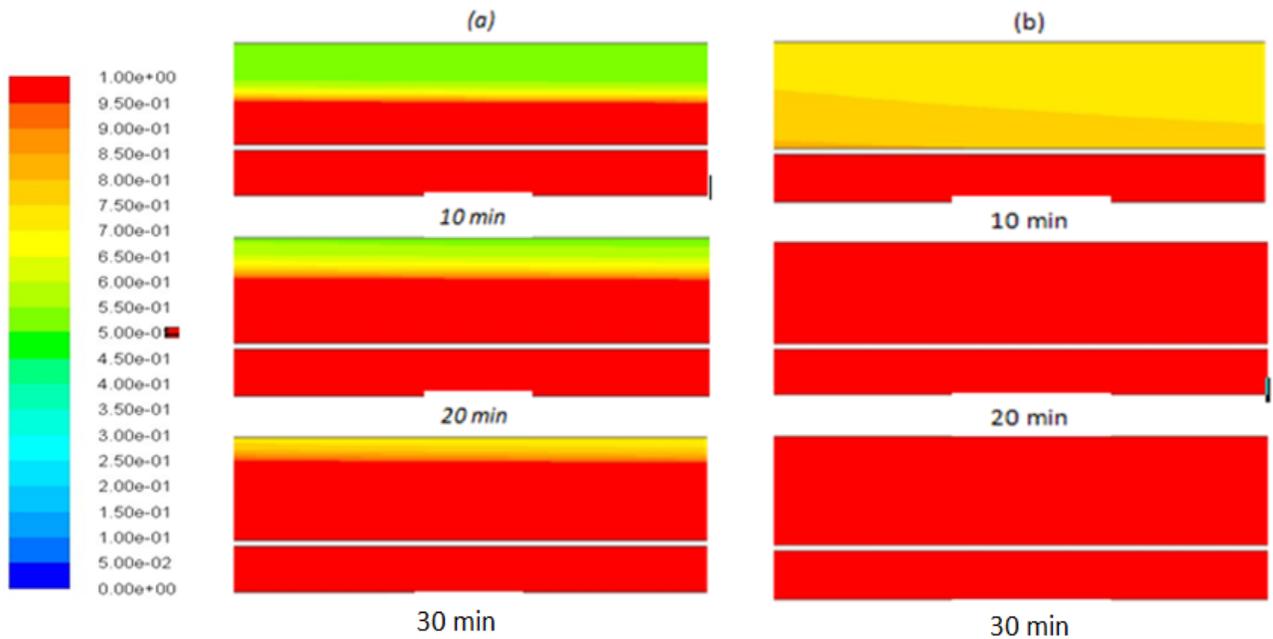
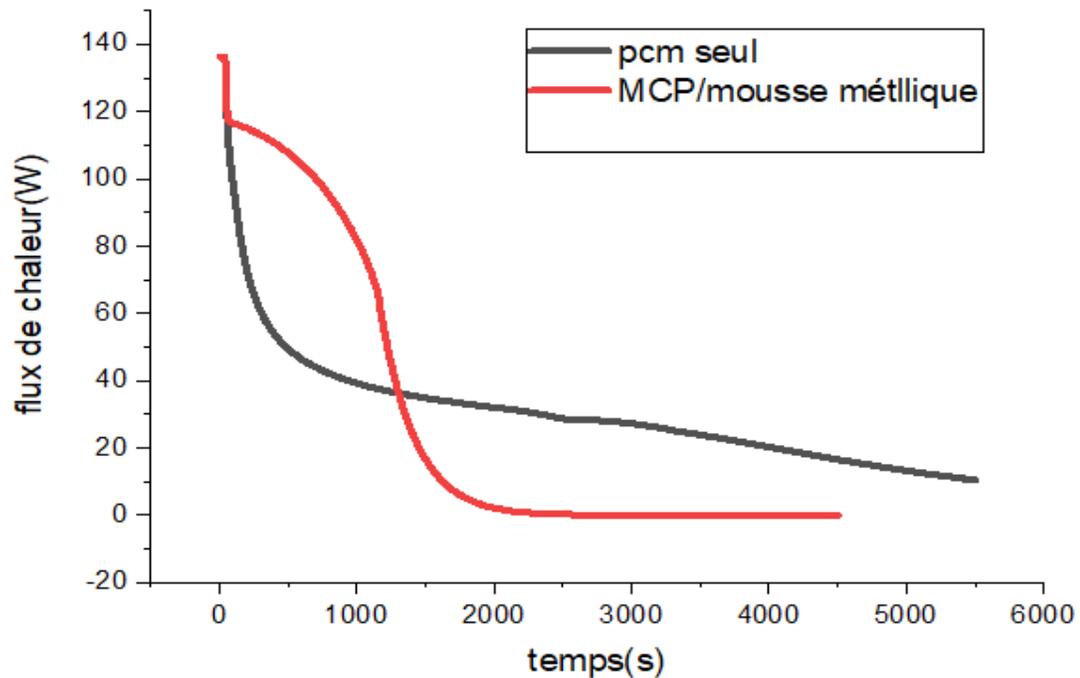


Figure IV.7: La fraction liquide à différents moments pour le système : (a) MCP seul, (b) le système Poreux-MCP.

D'après les résultats obtenus, il est évident que la conductivité thermique des mousses joue un rôle crucial dans le processus de transfert de chaleur pendant que le MCP subit une solidification et une fusion. Les résultats indiquent que la cinétique de fusion se produit à un rythme plus rapide dans le composite cuivre/MCP contrairement au composite nickel/MCP. Il est évident que le MCP présent dans la mousse de cuivre est complètement fondu après environ 1000 secondes, par rapport au pcm seul qui atteint la fusion totale environ 3000s. Ces résultats conduisent à la conclusion que la cinétique de stockage et de récupération est fortement dépendante de la conductivité thermique de la matrice.

#### IV.5.4 Flux thermique



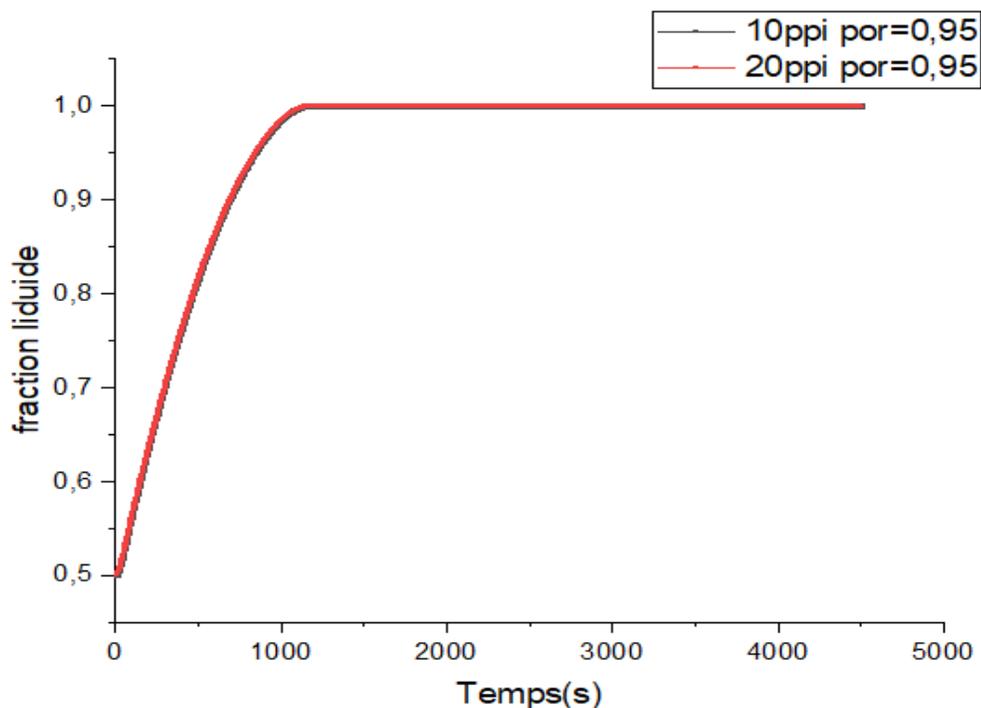
**Figure IV.8:** Evolution de le flux thermique instantané donnée par l'eau pendant le processus de charge

Figure IV.8 montre la puissance instantanée donnée par l'eau pendant le processus de charge. Comme on le voit, la puissance thermique pendant les processus de charge n'est pas constante dans le temps. En d'autres termes, au début de processus, le taux de transfert de chaleur est plus élevé

ainsi que le gradient de température entre l'eau et le PCM est la plus grande qui est moteur de l'échange thermique, puis la puissance thermique diminue progressivement à mesure que la température du PCM se rapproche de la température de l'eau. Comme prévu, en présence de la mousse métallique on peut avoir une charge rapide par rapport le MCP seul.

#### IV.6. Effet de la densité des pores sur le changement de phase

Afin de vérifier l'effet de la densité des pores, nous avons considéré la mousse poreuse (0,95). Deux densités poreuses différentes ont été sélectionnées pour cette étude : 10 pores par pouce (PPI) et 20 PPI. La figure montre l'évolution temporelle de la partie liquide du MCP en fonction de la densité poreuse. Les résultats ont montré que la densité des pores a un faible effet sur la fusion MCP, mais il est perceptible qu'il y a une augmentation de la fraction liquide avec une densité accrue des pores. En fait, la densité des pores plus élevés correspond à une surface plus grande, permettant un échange d'énergie plus efficace entre la mousse métallique et MCP.



**Figure IV.9:** La fraction liquide à différents moments pour deux densités de pores (10 et 20ppi).

### IV.7 Effet du type de tube

Pour analyser comment le type de tube affecte la cinétique de changement de phase, nous avons examiné trois types de tubes (cuivre, aluminium et nickel) comme le montre la figure( IV.10).

Notre enquête s'est concentrée sur le suivi des changements de température et des fractures de liquide au fil du temps

Tableau IV.1: Propriétés thermophysiques des métaux utilisés

Propriétés	Cuivre	Aluminium	Nickel
Masse volumique( $kg \cdot m^{-3}$ )	8978	2719	8900
Chaleur spécifique ( $j \cdot kg^{-1} \cdot k^{-1}$ )	381	871	460.6
Conductivité thermique ( $W \cdot m^{-1} \cdot k^{-1}$ )	387.6	202.4	91.74

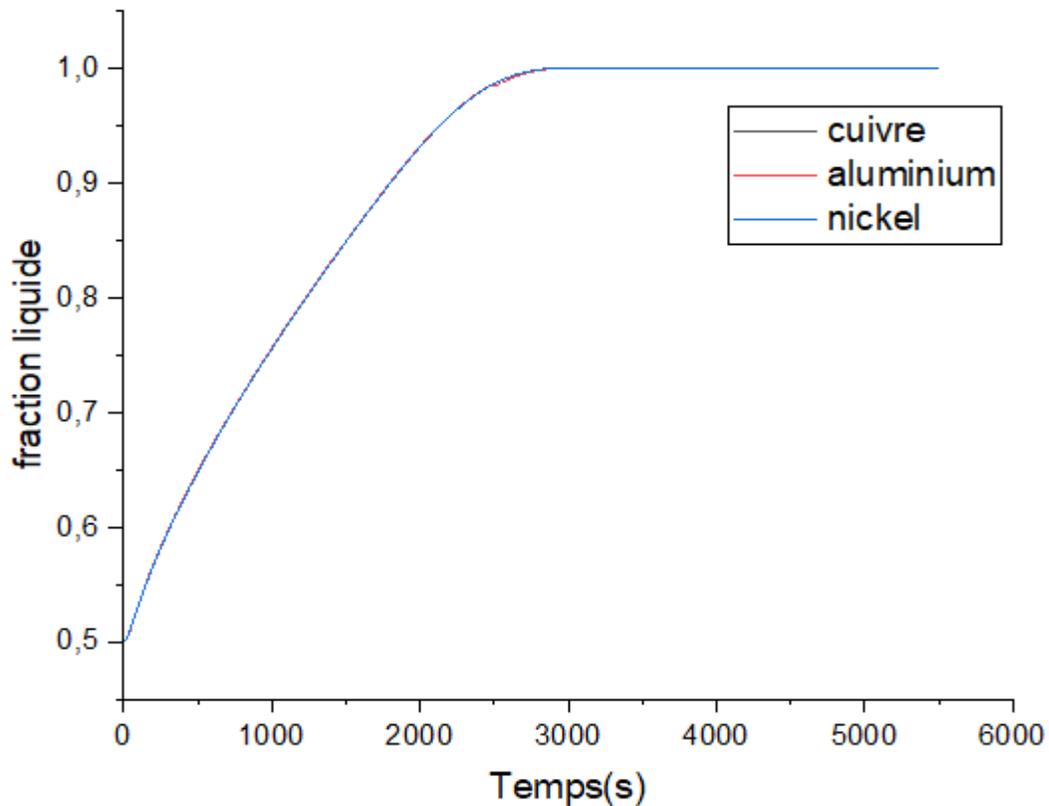
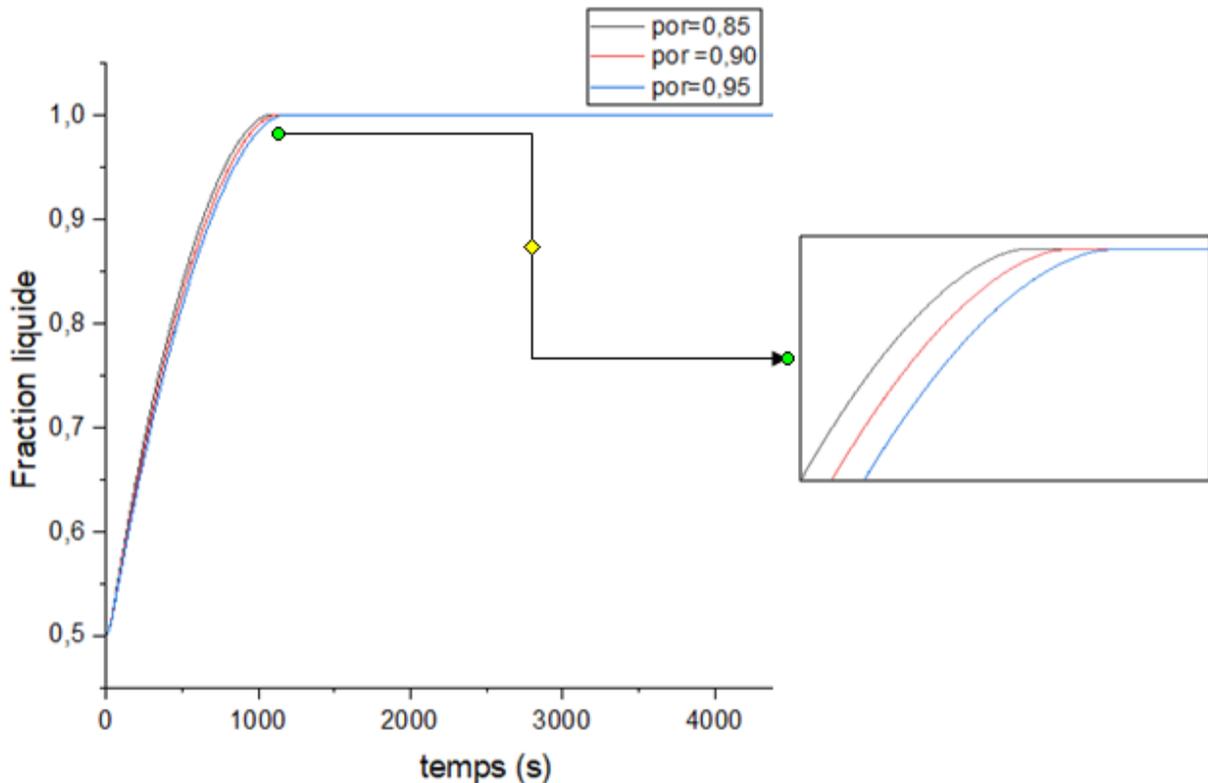


Figure IV.10:La fraction liquide à différents moments pour différents de tubes

A travers la courbe graphique réalisée après simulation on observe une grande compatibilité entre les différents tubes sur la fraction liquide et dont on déduit que le type de tube n'a aucun effet sur la fraction liquide

#### IV.8 Effet du la porosité sur le changement de phase

Afin d'examiner l'impact de la densité des pores nous avons considéré une mousse avec densité des pore de (20 PPI). Nous avons sélectionné trois porosités différentes pour cette étude : 0.95, 0.90 et 0.85. Figure (IV.10) présente l'évolution temporelle de la fraction liquide du MCP en fonction de temps pour les trois porosités différentes. Les résultats ont démontré que la porosité de milieu a une faible influence sur la fusion du MCP mais on remarque que il y a une augmentation de temps de fusion à mesure que la porosité augmente. En effet, une porosité plus élevée correspond à des grands pores donc une faible matrice solide, Ce qui diminue l'échange d'énergie entre la mousse métallique et le MCP.



**Figure IV.11:** La fraction liquide à différents moments pour trois porosités différentes (0.85, 0.90 et 0.95).

# **CONCLUSION ET PERSPECTIVES**

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale

Dans ce travail, le sujet du stockage de chaleur sous-jacent a été traité par la cire de paraffine et comme il est faible conductivité thermique, on a tenté d'améliorer le transfert de chaleur et d'augmenter la conductivité thermique de la paraffine en examinant l'effet du type de tube intérieur et en ajoutant de la mousse métallique (avec un type, densité de pores différente et pores différents)

Après la validation de notre maillage (Quadratique uniforme) (500x64) et les conditions aux limites, les résultats obtenus montre que :

➤ la cire de paraffine pur peut absorbe des quantités importantes de l'énergie thermique pendant sa transformation de l'état solide a l'état liquide mais il prend un temps plus longe a cause de sa faible conductivité thermique.

➤ L'utilisation de mousses métalliques s'avère être une solution très efficace pour améliorer le transfert de chaleur dans les MCP (Matériaux à Changement de Phase).

➤ La fusion et la solidification du MCP sont très sensibles à la conductivité thermique des mousses.

➤ La fusion et la solidification sont plus rapides pour une densité des pores plus élevée.

➤ La fusion et la solidification sont plus rapides pour une porosité plus élevée.

➤ L'amélioration du processus de stockage thermique avec l'addition de la mousse métallique dans le MCP.

➤ L'amélioration du processus de stockage thermique en changeant le tube intérieur

En conclusion, le développement de notre composant de stockage MCP a le potentiel de contribuer à répondre aux futures demandes énergétiques, ce qui en fait l'une des options de stockage d'énergie viables.

**REFERENCES**

**BIBLIOGRAPHIQUES**

## Références Bibliographique

---

- [1] Boutaoui Meriem. “Simulation Numérique Du Stockage Thermique Par Chaleur Latente Dans Une Capsule Elliptique”. MA thesis. Université M’hamed Bougara - Boumerdes, 2016.
- [2] SOUAD KHEDACHE. “elaboration de nouveaux composites pour l’amélioration de l’inertie thermique des matériaux de construction”. In: ().
- [3] I. Dinçer and M. A. Rosen. ““Thermal Energy Storage (TES) Methods”. in Thermal Energy Storage, 2010.
- [4] Alexander Geissler et al. “chapter fourteen Germany : Understanding G-DRGs”. In: 2013. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:197867240>.
- [5] B. Settou A. Benhamza. “Simulation numérique d’un capteur solaire plan utilisant des matériaux à changement de phase”. Université KASDI Merbah d’ Ouargla, 2016.
- [6] Guezei Abbassi. “Étude Numérique Des Transferts De Chaleur Et De Masse Lors De La Fusion D’un Matériau À Changement De Phase”. MA thesis. Université Larbi Ben M’hidi - Om-el-bouaghi, 2018.
- [7] Guerraiche Djemaa. “Contribution À L’étude Des Transferts Thermiques Lors De La Solidification D’un Liquide Dans Un Capteur Solaire”. PhD thesis. Université Mustapha Ben Boulaid - Batna 2, 2020.
- [8] S. Hongois. “Stockage de chaleur inter-saisonnier par voie thermo-chimique pour le chauffage solaire de la maison individuelle”. L’Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2011.
- [9] Deffass Meriem. “Intégration des matériaux à changement de phase (MCPs) comme système de stockage de la chaleur”. In: (July 2021).
- [10] Ben Xu, Peiwen Li, and Cholik Chan. “Application of phase change materials for thermal energy storage in concentrated solar thermal power plants: A review to recent developments”. In: *Applied Energy* 160.C (2015), pp. 286–307. DOI: 10.1016/j.apenergy. 2015 .0. URL: <https://ideas.repec.org/a/eee/appene/v160y2015icp286 - 307.html>.
- [11] S. Ben Jabrallah. “Les Matériaux à changement de phase”. L’Institut d’énergétique et des Transferts Thermique et Massique (Tunis).
- [12] K. Azzouz. “modélisation dynamique d’un système frigorifique domestique couple à un matériau à changement de phase”. MA thesis. 2007.
- [13] A. Lane. George. *Solar Heat Storage: Latent Heat Materials*, 1986.
- [14] Ben Xu, Peiwen Li, and Cholik Chan. “Application of phase change materials for thermal energy storage in concentrated solar thermal power plants: A review to recent developments”. In: *Applied Energy* 160.C (2015), pp. 286–307. DOI: 10.1016/j.apenergy. 2015 .0. URL: <https://ideas.repec.org/a/eee/appene/v160y2015icp286 - 307.html>.
- [15] S. Ben Jabrallah. “Les Matériaux à changement de phase”. L’Institut d’énergétique et des Transferts Thermique et Massique (Tunis).
- [16] K. Azzouz. “modélisation dynamique d’un système frigorifique domestique couple à un matériau à changement de phase”. MA thesis. 2007.

## Références Bibliographique

---

- [17] A. Lane. George. *Solar Heat Storage: Latent Heat Materials*, 1986
- [18] Serguei Kunik. “ Étude numérique et expérimentale du mécanisme de lubrification eX-Poro-HydroDynamique(XPHD)”. Thèse de doctorat dirigée par Fatu, Aurelian et Bouyer, Jean Mécanique des solides, des matériaux, des structures et des surfaces Poitiers 2018. PhD thesis. 2018. URL : <http://www.theses.fr/2018POIT2264>.
- [19] Cheik SECK « analyse et modélisation du comportement thermique d'un système de préchauffage d'air neuf pour l'habitat » intégrant un matériau à changement de phase, université d'Artois.
- [20] S. Safia. Etude de la convection bidiffusive dans un milieu poreux anisotrope.
- [21] B. Lyes. Étude numérique de la convection mixte en milieu poreux dans un canal contenant des composants électroniques. Thèse de doctorat en Génie mécanique. Université de Constantine1, 2014.
- [22] M. Kaviany, Principles of heat transfer in porous media, 2nd edition, Springer-Verlag New York, 1995.
- [23] R. Younsi. Simulation numérique du transfert de chaleur et de masse en milieux fluides et poreux. Thèse de doctorat en Physique. Université de Sciences et de la Technologie, Houari Boumediene, 2002.
- [24] C. Danquigny. Etude expérimentale du transfert de masse en milieu poreux hétérogène. Thèse de doctorat de l'université de Louis Pasteur de Strasbourg, 2003.
- [25] A. Delache, Etude analytique et numérique des instabilités spatio-temporelles des écoulements de convection mixte en milieu poreux: comparaison avec l'expérience. Thèse de doctorat de l'université des Sciences et Technologie de Lille, 2005.
- [26] Nayak KC, Saha SK, Srinivasan K, et al. A numerical model for heat sinks with phase change materials and thermal conductivity enhancers. *Int J Heat Mass Transfer* 2006; 49: 1833–1844.
- [27] Liu Z, Yao Y and Wu H. Numerical modeling for solid–liquid phase change phenomena in porous media: shell-and-tube type latent heat thermal energy storage. *Appl Energy* 2013; 112:1222–1232.
- [28] Nield DA and Bejan A. *Convection in porous media*. New York, NY: Springer International, 2017.
- [29] Mesalhy O, Lafdi K, Elgafy A, et al. Numerical study for enhancing the thermal conductivity of phase change material (PCM) storage using high thermal conductivity porous matrix. *Energy Convers Manag* 2005; 46: 847–867.
- [30] Zhang P, Xiao X, Meng ZN, et al. Heat transfer characteristics of a molten-salt thermal energy storage unit with and without heat transfer enhancement. *Appl Energy* 2015; 137:758–772.
- [31] Mahdi JM and Nsofor EC. Melting enhancement in triplex-tube latent heat energy storage system using nanoparticles-metal foam combination. *Appl Energy* 2017; 191: 22–34.
- [32] Xu HJ, Xing ZB, Wang FQ, et al. Review on heat conduction, heat convection, thermal radiation and phase change heat transfer of nanofluids in porous media: fundamentals and applications. *Chem Eng Sci* 2019; 195: 462–483

## Références Bibliographique

---

- [33] Calmidi VV and Mahajan RL. The effective thermal conductivity of high porosity fibrous metal foams. *J Heat Transfer* 1999; 121: 466–471.
- [34] Al-abidi AA, Bin Mat S, Sopian K, et al. CFD applications for latent heat thermal energy storage: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2013; 20: 353–363.
- [35] Yang H, Zhao M, Gu ZL, et al. A further discussion on the effective thermal conductivity of metal foam: an improved model. *Int J Heat Mass Transfer* 2015; 86: 207–211.
- [36] Bhattacharya A, Calmidi VV and Mahajan RL. Thermophysical properties of high porosity metal foams. *Int J Heat Mass Transfer* 2002; 45: 1017–1031.
- [37] Boomsma K and Poulidakos D. Corrigendum for the paper: K. Boomsma, D. Poulidakos, “On the effective thermal conductivity of a three-dimensionally structured fluid-saturated metal foam” [*International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44 (2001) 827–836]. *Int J Heat Mass Transfer* 2011; 54: 746–748.
- [38] Boomsma K and Poulidakos D. On the effective thermal conductivity of a three dimensionally structured fluid-saturated metal foam. *Int J Heat Mass Transfer* 2001; 44: 827–836.
- [39] Žukauskas A. Heat transfer from tubes in crossflow. In: James P. Hartnett, Thomas F. Irvine, (eds) *Advances in heat transfer*. Elsevier, 1972; 8: 93–160.
- [40] Cheng W-L, Li W-W, Nian Y-L, et al. Study of thermal conductive enhancement mechanism and selection criteria of carbon-additive for composite phase change materials. *Int J Heat Mass Transfer* 2018; 116: 507–511.
- [41] M. Lacroix, numerical simulation of a shell-and-tube latent heat thermal energy storage unit. *Solar Energy*, Vol. 50, N° 4, pp. 357-36, 1993.
- [42] A. Erek, phase change around a finned tube, *Mühendislik Bilimleri Dergisi, Journal of Engineering Sciences* 9 (1) 15-21, 2003.
- [43] Radouane ElBahjaoui, Hamid El Qarnia et El Khadir Lakhal « Etude numérique d'un élément de stockage d'énergie par chaleur latente de fusion chauffé par un fluide en écoulement pulsé », Université Cadi Ayyad, Faculté des sciences Semlalia, Département de physique, 2013.
- [44] M. Bechiri, K. Mansouri, Analytical solution of heat transfer in shell-and-tube latent thermal storage system. *Renewable Energy*, Vol. 74, pp. 825–838, (2015).
- [45] X. Xiao, P. Zhang, M. Li, Preparation and thermal characterization of paraffin/metal foam composite phase change material, *Appl. Energy*, 112 (2013), 1357–1366
- [46] X. Xiao, P. Zhang, M. Li, Effective thermal conductivity of open-cell metal foams impregnated with pure paraffin for latent heat storage, *Int J Therm Sci*, 81 (2014), 94–105.
- [47] A. Mallow, O. Abdelaziz, S. Graham, Thermal charging performance of enhanced phase change material composites for thermal battery design, *Int. J. Therm. Sci*, 127 (2018), 19–28.
- [48] G. Righetti, R. Lazzarin, M. Noro, S. Mancin. Phase change materials embedded in porous matrices for hybrid thermal energy storages: experimental results and modeling, *Int. J. Refrig*, 106 (2019), 266–77.
- [49] P. Zhang, ZN. Meng, H. Zhu, YL. Wang, SP. Peng. Melting heat transfer characteristics of a

## Références Bibliographique

---

- composite phase change material fabricated by paraffin and metal foam. *Appl Energy* 185 (2017), 1971–83.
- [50] H-Q. Jin, L-W. Fan, M-J. Liu, Z-Q. Zhu, Yu Z-T. A pore-scale visualized study of melting heat transfer of a paraffin wax saturated in a copper foam: effects of the pore size, *Int. J. Heat. Mass. Transf* 112 (2017), 39–44
- [51] T.X. Li, D.L. Wu, F. He, R.Z. Wang, Experimental investigation on copper foam/ hydrated salt composite phase change material for thermal energy storage, *Int. J. Heat Mass Transf*, 115 (2017), 148–157.
- [52] H. Zheng, C. Wang, Q. Liu, Z. Tian, X. Fan, Thermal performance of copper foam/ paraffin composite phase change material, *Energy Convers. Manag.*, 157 (2018), 372–381.
- [53] Meng, P. Zhang, et al, « Experimental and numerical investigation of a tube-in-tank latent thermal energy storage unit using composite PCM », *Applied Energy* ; (2017) : 190, p 524– 539.
- [54] Basu, B. and A. Date, *Numerical modelling of melting and solidification problems—A review*. *Sadhana*, 1988. **13**(3): p. 169-213
- [55] Banaszek .J, D.R., Rebow .M et El-sagir .F, *Experimental study of solid-solid change in a spiral thermal energy storage unit*. *Applied thermal engineering*, 1999. **19**: p. 1253-1277.
- [56] Kibria, M. A., Anisur, M. R., Mahfuz, M. H., Saidur, R., Metselaar, I. H. S. C. "Numerical and experimental investigation of heat transfer in a shell and tube thermal energy storage system." *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 53, pp. 71-78. 2014.
- [57] Pouyan Talebizadeh Sardari et al. (2019) 'Numerical modelling of phase change material melting process embedded in porous media: Effect of heat storage size', *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 234(3), pp. 365–383. doi:10.1177/0957650919862974.
- [58] I. ANSYS, ANSYS FLUENT Getting Started Guide, 2011.
- [59] J.-L. Godin, «DOCPLAYER,» 2015. [En ligne]. Available: <https://docplayer.fr/782722-Figure-3-1-lancement-du-gambit.html#>.
- [60] B. BOUHACINA, Simulation numérique du comportement dynamique et thermique d'un échangeur de chaleur bi tubulaire muni d'ailettes destiné pour le stockage de l'énergie solaire., TLEMCEN : UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-TLEMCEN , 2015.
- [61] Mohamed Lamine BENLEKKAM, Driss NEHARIB, Nassira CHERIET. Numerical investigation of latent heat thermal energy storage system Investigation numérique d'un système de stockage thermique par chaleur latente. *RECUEIL DE MÉCANIQUE VOL. 3N°001* (2018) 229–235.
- Majid, G., Mohammad, J.H., Masoume, R., Rasool, B., 2019. Nano-enhancement of phase change material in a shell and multi-PCM-tube heat exchanger. *J. Energy Storage* 22, 88–97

# RESUMES

Les matériaux à changement de phase ( MCP ) sont des matériaux qui ont démontré leur efficacité dans le stockage de l'énergie thermique. Ils permettent de substituer au stockage par chaleur sensible un stockage par chaleur latente qui nécessite un volume et une masse bien moindres pour la même quantité d'énergie thermique, mais ces matériaux ont une faible conductivité thermique.

Dans ce mémoire, nous présentons le sujet du stockage de chaleur dans le MCP (cire de paraffine) et étudions comment améliorer le stockage thermique en utilisant :

MCP/milieu poreux:

- Un type de mousse métallique (mousse de cuivre)
- Mousse de cuivre avec différentes valeurs de densité des pores (10PPI et 20PPI )
- Mousse de cuivre avec différentes valeurs de porosité (0.85 ,0.9 ,0.95)

MCP seul

- le tube intérieur avec différents matériaux (cuivre, d'aluminium et de Nickel)

A` l'aide du programme de modélisation numérique (Fluent 16.0), une simulation de processus de fusion de cire de paraffine mélangée à` des mousses métalliques . dans Ont été réalisées dans un tube de 2D est à` parois adiabatiques considérée comme le domaine de calcul , pour les dimensions La longueur du tube de cuivre est de 1 m de long et le diamètre intérieur et extérieur du tube sont de 10,8 mm et 12,0 mm respectivement. Le diamètre intérieur de l'unité est de 36,0 mm comme . En analysant et en comparant les résultats obtenus.

# Abstract :

Phase change materials ( MCP ) are materials that have demonstrated their efficiency in thermal energy storage. They make it possible to substitute latent heat storage for sensitive heat storage, which requires much less volume and mass for the same amount of thermal energy, but these materials have a low thermal conductivity.

In this thesis, we present the subject of heat storage in MCP (paraffin wax) and study how to improve thermal storage by using:

MCP/porous medium:

- A type of metal foam (copper foam)
- Copper foam with different pore density values (10PPI and 20PPI)
- Copper foam with different porosity values (0.85 ,0.9 ,0.95)

PCM alone

- the inner tube with different materials (copper, aluminum and nickel)

Using the numerical modeling program (Fluent 16.0), a simulation of the process of melting paraffin wax mixed with metal foams. in Were made in a tube of 2D is with adiabatic walls considered as the calculation range, for the dimensions The length of the copper tube is 1 m long and the inside and outside diameter of the tube are 10.8 mm and 12.0 mm respectively. Theinside diameter of the unit is 36.0 mm as . By analyzing and comparing the results obtained.

## ملخص:

مواد تغيير الطور (PCMs) هي مواد ثبت فعاليتها في تخزين الطاقة الحرارية، إذ أنها تجعل من الممكن استبدال التخزين بالحرارة المعقولة بتخزين الحرارة الكامن الذي يتطلب حجما وكتلة أصغر بكثير لنفس الكمية من الطاقة الحرارية ، لكن هذه المواد لها موصلية حرارية منخفضة.

في هذه المذكرة، نقدم موضوع تخزين الحرارة في MCP (شمع البارافين) ونحقق في كيفية تحسين التخزين الحراري باستخدام:

PCM / وسط مسامي:

- نوع من الرغوة المعدنية (رغوة النحاس)
- رغوة نحاسية ذات قيم كثافة مسامية مختلفة (PPI10 و PPI20)
- رغوة نحاسية ذات قيم مسامية مختلفة (0.85 ، 0.9 ، 0.95)

MCP فقط

- أنبوب داخلي بمواد مختلفة (نحاس وألمنيوم ونيكل)

باستخدام برنامج النمذجة العددية (Fluent 16.0) ، محاكاة لعملية ذوبان شمع البارافين الممزوج بالرغوي المعدنية. في D2 تعتبر الجدران الكاظمة للحرارة مجال الحساب ، للأبعاد يبلغ طول الأنبوب النحاسي 1 متر والقطر الداخلي والخارجي للأنبوب 10.8 مم و 12.0 مم على التوالي. القطر الداخلي للوحدة هو 36.0 مم. من خلال تحليل ومقارنة النتائج التي تم الحصول عليها.