

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 : Énergétique

Thème

Etude numérique des performances de stockage thermique à l'aide de plusieurs matériaux à changements de phase et une mousse métallique.

Préparé par :

HAMAL WAFAA

KAMLA SARAH

Soutenu publiquement le : 21 /06 / 2023, devant le jury composé de:

M. BEY Mohamed	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn-Khaldoun)	Président
M. MEKROUSSI Sai	Professeur (Univ.Ibn-Khaldoun)	Examineur
M. HAMMOU Mahmoud	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn-Khaldoun)	Examineur
M. KHALDI Sabrina	Maître Assistante "A" (Univ.Ibn-Khaldoun)	Encadrant

Année universitaire : 2022 -2023



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

"رب أوزعني أن أشكر نعمتك
التي أنعمت عليّ وعلى والديّ
وأن أعمل صالحاً ترضاه
وأصلح لي في ذريّتي
إنّي تبنت إليك و إنّي من المسلمين"
صدق الله العظيم



REMERCIEMENT

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. BEY Mohamed**, 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. HAMMOU Mahmoud** 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



*Je dédie ce modeste travail
A ma très chère mère source
d'inspiration dans ma vie.
A mes très chères sœurs et
mon frère chacun son nom.
A toute ma grande famille.
A ma binôme et sa famille.
A tous mes chers-es amis-es.
A tous ceux qui m'ont aidé
et encouragé.*

Wafaa



Dédicace



*Je dédie ce modeste travail en
signe de respect, et de
remerciement :*

A mes très chers parents.

A mes frères et ma sœur.

A ma binôme et sa famille.

A ma copine Maroua.

*A tous ceux qui ont participé
de près ou de loin à la
réalisation de ce modeste
travail.*

Sarah

NOMENCLATURES

Nomenclatures

<u>Abréviation</u>	
MCP	Matériaux à Changement de Phase.
PCM	Phase Change Material.
HTF	Fluide à Haute Température (Heat Transfer Fluid).
CFD	Dynamique des fluides computationnelle (Computational Fluid Dynamics).
EG	Graphite Expansé.
TES	Thermal Energy Storage.
HTF	Heat Transfer Fluid.
LTE	Local thermal equilibrium.
LTNE	Local thermal non equilibrium.
GNP	Nanoparticule en graphine.
CAO	Conception assistée par ordinateur.
MWTHX	Modified Webbed Tube Heat Exchanger.
TTHX	Triple Tube Heat Exchanger.
WTHX	Webbed Tube Heat Exchanger.
LHS	Latente Heat Storage.
AL	Aluminium.
Cu	Cuivre.
Ni	Nickel.

<u>Symboles</u>	<u>Définition</u>	<u>Unité</u>
C_f	<i>Coefficient du Forchheimer</i>	(J/kg K)
C_p	Chaleur spécifique	[J.kg ⁻¹ .k ⁻¹]
h_{sf}	Coefficient du transfert de chaleur interstitiel	[W/m ² .K]
a_{sf}	<i>Surface spécifique</i>	[m ⁻¹]
v	Vitesse	[m/s]
V	Volume	[m ³]
d_l	Diamètre ligamentaire du milieu poreux.	[m]
d_p	Taille des pores	[m]
h_{ref}	Enthalpie sensible à la température de référence.	[J/kg]
k_e	Conductivité thermique effective.	[W/m.K]
k_f	Conductivité thermique du fluide (PCM).	[W/m.K]
k_{fe}	Conductivité thermique effective du fluide (PCM).	[W/m.K]
k_s	Conductivité thermique du solide (matériau poreux)	[W/m.K]
k_{se}	Conductivité thermique effective du solide	[W/m.K]
λ	Fraction liquide	[-]
k	Perméabilité du milieu poreux.	[m ²]
L_f	Chaleur latente de fusion.	[J/kg]
ω	Densité des pores.	[PPI]
T	Température dimensionnel	[-]
T_f	Température du fluide.	[°K]
T_s	Température du solide.	[°K]
T_{ref}	Température de référence.	[°K]
Q	Flux de chaleur.	[W]
M	Masse.	[Kg]

P	Pression.	[Pa]
G	Accélération de la pesanteur.	[m.s ⁻²]
H	Hauteur de la cavité.	[m]
Nu	Nombre de Nusselt.	[-]
H	Enthalpie spécifique.	[Jkg ⁻¹]
u, v	Composant de vitesse dimensionnel.	[m.s ⁻¹]
x, y	Cordonnées dimensionnel.	[m]
X, Y	Cordonnées adimensionnel.	[-]

<i>Symboles grecs</i>		
ε	Porosité.	[-]
α	Diffusivité thermique.	[M ² .s ⁻¹]
Δ	Variation.	[-]
β	Coefficient d'expansion thermique.	[k ⁻¹]
θ	Température adimensionnelle.	[-]
ν	Viscosité cinématique.	[m ² .s ⁻¹]
μ	Viscosité dynamique.	[kg m ⁻¹ .s ⁻¹]
φ	Fraction volumique des nanoparticules.	[-]
ρ	Masse volumique.	[kg.m ⁻³]
λ	Conductivité thermique.	[W/m. k]

<u>Indices</u>	
f, s	fluide et solide.
nf	Nanofluide.
eff	Effective.
ref	Référence.
<u>Groupements adimensionnels</u>	
$N_u = h D_h / \lambda_f$	Nombre de Nusselt.
$Pr = \mu C_p / \lambda_f$	Nombre de Prandtl.
$D_a = K / D_h^2$	Nombre de Darcy.
Gr	Nombre de Grashof .

Liste des tableaux

<i>Tableau 1. 1: Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20 °C</i>	9
<i>Tableau 1. 2: Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur.</i>	12
<i>Tableau 1. 3: Propriétés thermophysiques de certains MCP.</i>	14
<i>Tableau 2. 1: Les propriétés thermo-physiques de différents matériaux (Mouassi Ammar, 2012) :</i>	43
<i>Tableau 4. 1: Propriétés physiques du RT 58.</i>	65
<i>Tableau 5. 1: Propriétés thermophysiques des mousses métalliques.</i>	75
<i>Tableau 5. 2: Propriétés thermophysiques du fluide de base et de nanoparticule.</i>	80

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : L'homme et l'idée du stockage.....1
Figure 2 : Consommation d'énergie primaire par source (prévisions de DNV GL).....2

CHAPITRE 1

Figure 1. 1: Classification des systèmes de stockage de l'énergie thermique.....5
Figure 1. 2: Principales techniques de stockage de l'énergie thermique.6
Figure 1. 3: Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état.....7
Figure 1. 4: Le principe du stockage de l'énergie par adsorption/désorption.10
Figure 1. 5: Critères de choix d'une technologie de stockage.11
Figure 1. 6: Quelque matériau à changement de phase : pochettes, sphères, tubes, plaquettes.13
Figure 1. 7: Classification des MCP proposée par Abhat.13
Figure 1. 8: Visualisation de la fusion d'une paraffine.....15
Figure 1. 9: Molécule d'acide stéarique (Modèle structurel de molécule et de formule chimique).....16
Figure 1. 10: Principe de fonctionnement des MCP.....19
Figure 1. 11: Sac isotherme avec plaques eutectiques (solution de transport pour échantillons biologiques).....21
Figure 1. 12: Récipients transporter sang et organes qui contiennent MCP.....22
Figure 1. 13: Pour que les murs retiennent la chaleur ou la fraîcheur.22
Figure 1. 14: Modèle de mur contenant une plaque de plâtre-MCP.....23
Figure 1. 15: Rideaux à MCP.....24
Figure 1. 16: Réfrigérateur isolé par MCP.....25
Figure 1. 17: L'utilisation des MCP dans les textiles.25
Figure 1. 18: Conditionnement des MCP *Figure 1. 19*: Nodule.....27
Figure 1. 20: (a) Conditionnement en sac plastique, (b) Conditionnement en briquette plastique.....27
Figure 1. 21: Vue au MEB de microcapsules renfermant des paraffines.28

CHAPITRE 2

Figure 2. 1: Exemples des milieux poreux.....30
Figure 2. 2: Modèle série de la conductivité thermique effective.....32
Figure 2. 3: Modèle parallèle de la conductivité thermique effective.....33

Figure 2. 4: Représentation schématique du volume élémentaire représentatif.34

Figure 2. 5: Milieu poreux non consolidé35

Figure 2. 6: Milieu poreux consolidé.35

Figure 2. 7: Nanofluides vus au microscope électronique.41

Figure 2. 8: Nanoparticule (Ag) Figure 2. 9: Nanoparticule (TiO₂)42

Figure 2. 10: Exemples de nanofluides aqueux et opaques avec seulement 1 % de nanoparticules de diverses natures.43

Figure 2. 11: (a) Mousses métalliques stochastiques en cuivre, (b) Régulière en aluminium.52

Figure 2. 12: Unité de stockage avec MCP multiples : exemple de combinaison utilisée par F. Dinter.53

CHAPITRE 3

Figure 3. 1: Evolution du nombre des publications internationales et des citations des systèmes du stockage par chaleur latente de 2000 à 2019.54

Figure 3. 2: (A) Schéma de l'unité de stockage d'énergie thermique latente à tube, (B) modèle physique pour calculs numériques55

Figure 3. 3: Schéma de principe de l'unité de stockage de chaleur latente.56

Figure 3. 4: (a) échangeur de chaleur à triple tube (b) échangeur de chaleur à tubes palmés (c) échangeur de chaleur à tubes palmés modifiés.56

Figure 3. 5: Domaines de calcul avec les conditions aux limites indiquées.57

Figure 3. 6: Protocole de préparation des composites mousses métalliques /MCP.58

Figure 3. 7: Modèle du STHE avec Nano-PCM (a : dispositif de stockage d'énergie thermique , b) STHE.60

CHAPITRE 4

Figure 4. 1: Le schéma du modèle physique ainsi que les conditions aux limites.64

Figure 4. 2: Maillage du domaine.64

Figure 4. 3: Test indépendant du pas de temps.67

Figure 4. 4: Les températures moyennes de différents emplacements verticaux pour un système MCP uniquement.69

Figure 4. 5: Les températures moyennes de différents emplacements verticaux pour un système Poreux-MCP.70

Figure 4. 6: La fraction liquide moyenne à différents moments pour le système MCP uniquement.70

Figure 4. 7: La fraction liquide moyenne à différents moments pour le système Poreux-MCP.....71

Figure 4. 8: Evolution temporelle de la fraction liquide : (a) résultats de notre simulation (b) résultats pour l'enceinte rectangulaire.72

CHAPITRE 5

Figure 5. 1: Tracés des courbes de résidus.73

Figure 5. 2: La fraction liquide à différents moments pour le système : (a) MCP seul, (b) le système Poreux-MCP.74

Figure 5. 3: La fraction liquide à différents moments pour le système : (a) MCP/mousse de Cuivre, (b) MCP/mousse d'Aluminium, (c) MCP/mousse de Nickel.....75

Figure 5. 4: Température à différents moments pour le système : (a) MCP/mousse de Cuivre, (b) MCP/mousse d'Aluminium, (c) MCP/mousse de Nickel.....77

Figure 5. 5: La fraction liquide a différentes moments pour trois densités de pores (10, 20 et 30PPI).78

Figure 5. 6: Fraction liquide à différents moments pour le système MCP/mousse de Cuivre : (a) 10PPI, (b) 20PPI, (c) 30PPI.79

Figure 5. 7: Fraction liquide pour différentes moments pour le système :81

Figure 5. 8: stockage thermique en différents cas de MCP : T_{melt} , Q et Q82

SOMMAIRE

Remerciement	
Dédicaces	
Nomenclatures	i
Liste des tableaux	v
Liste des figures	vi
Sommaire	ix
Introduction	1
Chapitre 1 Généralités sur MCP et stockage d'énergie thermique	
1.1 Introduction.....	4
1.2 Stockage de l'énergie	4
1.3 Classification des systèmes de stockage d'énergie thermique	4
1.4 Différentes techniques de stockage thermique	6
1.4.1 Stockage thermique latent (STL)	6
1.4.2 Stockage thermique sensible, STS	8
1.4.3 Stockage Thermochimique	9
1.5 Critères de choix et de la conception d'un système de stockage	10
1.6 Comparaison des différents types de stockage d'énergie thermique	12
1.7 Les matériaux à changement de phase	13
1.7.1 La classification des MCP	13
1.7.2 Classe de MCP	18
1.7.3 Principe de fonctionnement de MCP	19
1.7.4 Le choix d'un MCP	20
1.7.5 Les applications des MCP pour le stockage de l'énergie thermique	21
1.7.6 Méthodes de conditionnement des MCP dans les applications de stockage thermique	26
Conclusion	28
Chapitre 2 Les procédés utilisés pour l'amélioration de stockage thermique par MCP	
Introduction	29
2.1 Milieu poreux.....	29
2.1.1 Propriétés d'un milieu poreux.....	30
2.1.2 Porosité	30
2.1.3 Perméabilité	31
2.1.4 Surface spécifique	31
2.1.5 Conductivité thermique effective	31
2.1.6 Volume élémentaire représentatif (V.E.R)	33
2.2 Classification des milieux poreux	34
2.2.1 Milieu poreux non consolidé	34
2.2.2 Milieu poreux consolidé	35
2.3 Modèles d'écoulement dans les milieux poreux	35
2.3.1 Modèle de Darcy	35
2.3.2 Modèle de Darcy-Brinkman	36
2.3.3 Modèle de Brinkman-Wooding	36
2.3.4 Modèle de Forchheimer	36

2.3.5	Modèle de Darcy-Brinkman-Forchheimer	37
2.3.6	Model d'équilibre	37
2.3.7	Model de non équilibre	37
2.4	Généralités sur les nanofluides	40
2.4.1	Définition de nanofluide	41
2.4.2	Types des nanoparticules	42
2.4.3	Préparation des nanofluides	44
2.4.4	Les propriétés thermo physiques des nanofluides.....	44
2.4.5	Domaine d'application	48
2.4.6	Les avantages des nanofluides	49
2.4.7	Les inconvénients des nanofluides	50
2.5	Progrès dans l'amélioration de la conductivité thermique des MCPs	50
2.5.1	Amélioration de la conductivité thermique globale	51
2.5.2	Augmentation du flux transféré par utilisation de MCP multiples	52
Chapitre 3 Recherche bibliographique		
3	Introduction	54
3.1	Quelques travaux sur les MCPs uniquement	54
3.2	Quelques travaux sur les MCPs/mousse métallique	57
3.3	Quelques travaux sur les MCPs/Nanofluides	59
Conclusion		61
Chapitre 4 Modélisation mathématique		
4	Introduction	62
4.1	Définition du programme Fluent.....	62
4.2	Définition du programme Gambit	63
4.3	Modèle physique et Formulation mathématique.....	63
4.3.1	Modèle physique	63
4.4	Description mathématique	65
4.4.1	Hypothèses	65
4.5	Modélisation numérique	66
4.6	Formulation mathématique	67
4.6.1	Equation de continuité	67
4.6.2	Équation de la quantité de mouvement	67
4.6.3	Les équations gouvernantes Pour le Nano-fluide	68
4.7	Validation du model	69
Chapitre 5 Résultats et discussion		
Introduction		73
5.1	Convergence des calculs.....	73
5.2	Effet du poreux-MCP par rapport au MCP seul	74
5.3	Effet du type de la mousse sur le changement de phase.....	75
5.5	Effet de différents systèmes de MCP	82
Conclusion générale et perspectives		84
Références bibliographiques		86
Résumé		

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale

Tout au long de l'histoire, les humains ont stocké de l'énergie sous forme de chaleur grâce à des méthodes de base. L'une de ces méthodes consiste à utiliser le soleil pour chauffer une pierre, qui peut ensuite être utilisée pour la cuisson ou le chauffage (figure1).



Figure 1: L'homme et l'idée du stockage[1].

Les défis actuels rencontrés dans l'industrie de l'énergie tournent autour du stockage de l'énergie. Il peut s'agir d'optimiser les ressources énergétiques ou d'en favoriser l'accès. 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.

Les méthodes de stockage de l'énergie dépendent du type d'énergie considéré. 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. Selon la figure 2, la consommation mondiale d'énergie augmente régulièrement depuis plusieurs décennies [1]. Cette croissance perpétuelle de la consommation d'énergie a conduit à l'émission d'une quantité considérable de gaz à effet de serre.

Au cours des prochaines décennies, on prévoit une augmentation significative de la demande énergétique. Selon [2], cette demande augmentera de 46,9 % entre 2018 et 2050 en raison de la croissance de la population et de l'économie. Compte tenu de ces prévisions, les sources d'énergie renouvelables semblent être une solution viable car elles peuvent aider

à répondre aux besoins énergétiques mondiaux croissants tout en respectant les restrictions environnementales. L'inconvénient d'utiliser certains types de sources d'énergie réside dans leur génération sporadique et irrégulière.

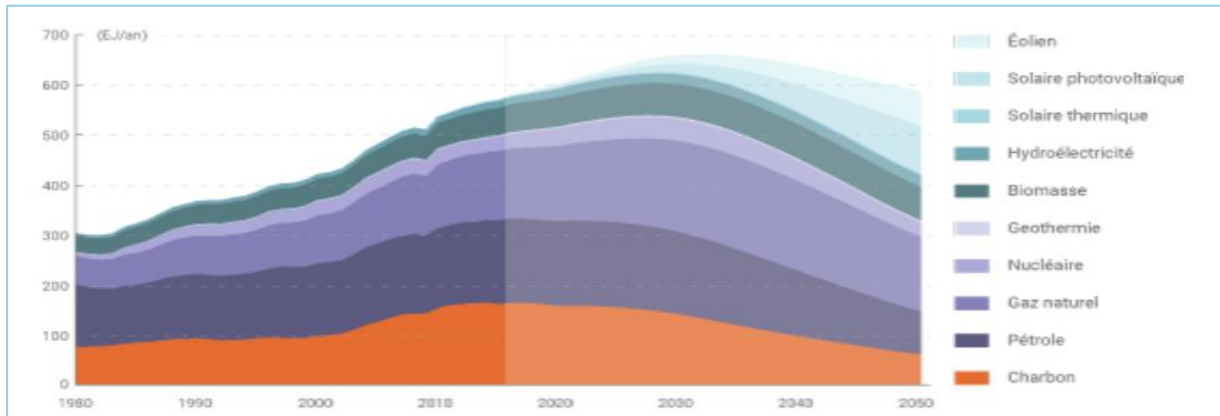


Figure 2: Consommation d'énergie primaire par source (prévisions de DNV GL)[3]

Pour résoudre ce problème, le stockage de l'énergie est devenu un sujet de grand intérêt car il a le potentiel d'atténuer ces lacunes. Une solution possible à ce problème est l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) qui subissent des transitions solide-liquide. 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.

La mise en œuvre des MCP est observée dans une multitude d'industries, allant de la construction au stockage de l'énergie solaire, ainsi que dans le refroidissement des composants électroniques, les systèmes de climatisation et l'industrie textile....ect. Cependant, la complexité du phénomène de changement de phase solide-liquide crée des obstacles à leur généralisation. Le phénomène de changement est lié à la dynamique des transferts de chaleur et de masse, ainsi qu'à la distribution spatio-temporelle des évolutions. De plus, le comportement unique des MCP lors des changements de phase introduit une singularité significative dans le modèle des transferts thermiques.

Les cires de paraffine 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 thermoconductrices 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.

L'ajout de nanoparticules au liquide de base modifie ses propriétés de diffusion, notamment sa conductivité thermique et sa viscosité.

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 (RT58) rempli dans une enceinte rectangulaire.

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). Les nano-fluides et leurs classements ainsi que leurs procédures de fabrication et leurs domaines d'application. Enfin, Les différentes méthodes d'amélioration de la conductivité thermique des MCP et l'intensification du transfert de chaleur lors de changement de phase.
- ❖ Le troisième chapitre une revue bibliographique sur quelques études et travaux effectués dans le domaine.
- ❖ Le quatrième 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.
- ❖ On rassemble dans le chapitre 5 les différents résultats obtenus et leurs interprétations.
- ❖ En fin, nous terminons ce mémoire par une conclusion générale et des perspectives pour des avenir études.

CHAPITRE

1

*Généralités sur MCP et stockage
d'énergie thermique.*

1.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à une étude bibliographique sur les matériaux à changement de phase « MCPs » et sur les composites mousses métalliques/MCPs destinés au stockage de la chaleur thermique. Les modes du stockage, les types des matériaux à changement de phase, leurs propriétés ainsi que leurs critères de sélection sont énoncés. Les inconvénients des matériaux à changement de phase sont également cités.

1.2 Stockage de l'énergie

Dans le paysage actuel, le stockage de l'énergie est essentiel pour surmonter les défis liés à l'optimisation et à l'accessibilité de l'énergie. Des mécanismes de stockage performants permettent une meilleure gestion de la production et de la consommation d'énergie, limitant ainsi le gaspillage.

L'énergie peut être préservée lorsque sa production dépasse l'utilisation, et utilisée plus tard pendant les périodes de forte demande. Cette fonctionnalité facilite également la satisfaction des demandes d'énergie qui restent constantes face à une production d'énergie intermittente ou fluctuante, en particulier dans le cas des sources renouvelables. Les techniques de stockage d'énergie varient selon la source.

Les combustibles fossiles, tels que le charbon, le gaz et le pétrole, servent de réserves naturelles dans leurs réservoirs respectifs. Ceux-ci peuvent être extraits, isolés et déplacés sans effort vers d'autres emplacements pour être utilisés.

Le stockage des énergies intermittentes est un processus plus complexe du fait de l'implication de vecteurs énergétiques comme l'électricité, la chaleur ou l'hydrogène, rendant indispensables des systèmes de stockage dédiés.

1.3 Classification des systèmes de stockage d'énergie thermique

La technologie de stockage d'énergie thermique peut être catégorisée de différentes manières en fonction du paramètre considéré. Selon la plage de température, les systèmes de stockage relèvent du "stockage de chaleur" ou du "stockage de froid". Pendant ce temps, sur la base de la durée de stockage, les deux classes sont "stockage à long terme" et "stockage à court terme". En ce qui concerne l'état du matériau de stockage, les quatre principales catégories sont le "stockage de chaleur sensible", le "stockage de chaleur latente", le "stockage de chaleur thermo-chimique" et le "stockage par sorption".

Il existe également deux autres classifications pour les systèmes de stockage d'énergie thermique : actif et passif.

Le stockage actif fait référence au mouvement du matériau de stockage dans un système, tandis que dans un système de stockage d'énergie thermique passif, également appelé régénérateur, le matériau de stockage reste stationnaire. Ici, l'énergie thermique voyage à travers un fluide caloporteur et est ensuite délivrée au matériau de stockage à travers un échangeur. La structure de l'échangeur est située dans le matériau de stockage [4].

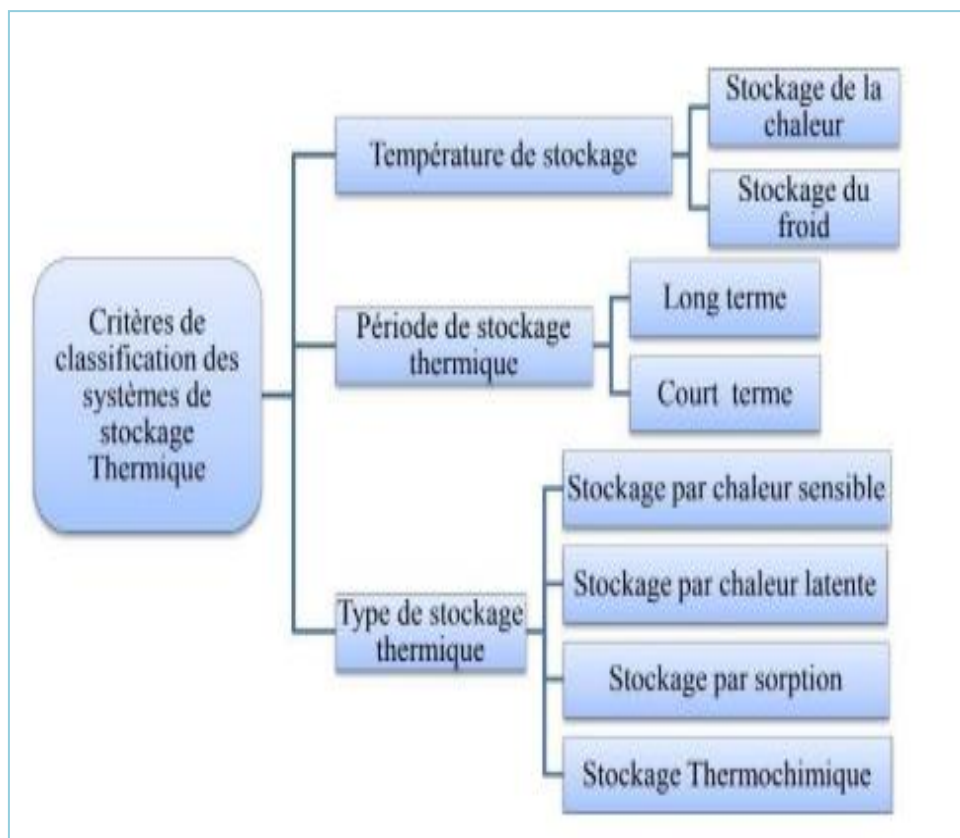


Figure 1. 1: Classification des systèmes de stockage de l'énergie thermique [5]

L'énergie thermique est la fusion des énergies potentielles et cinétiques hébergées dans les atomes et molécules constitutifs d'une substance. Les vibrations atomiques et moléculaires génèrent cette énergie, qui peut être conservée sous forme de variation de l'énergie interne d'un matériau, y compris la chaleur thermochimique et latente sensible, ou dans un mélange des facteurs susmentionnés.

1.4 Différentes techniques de stockage thermique

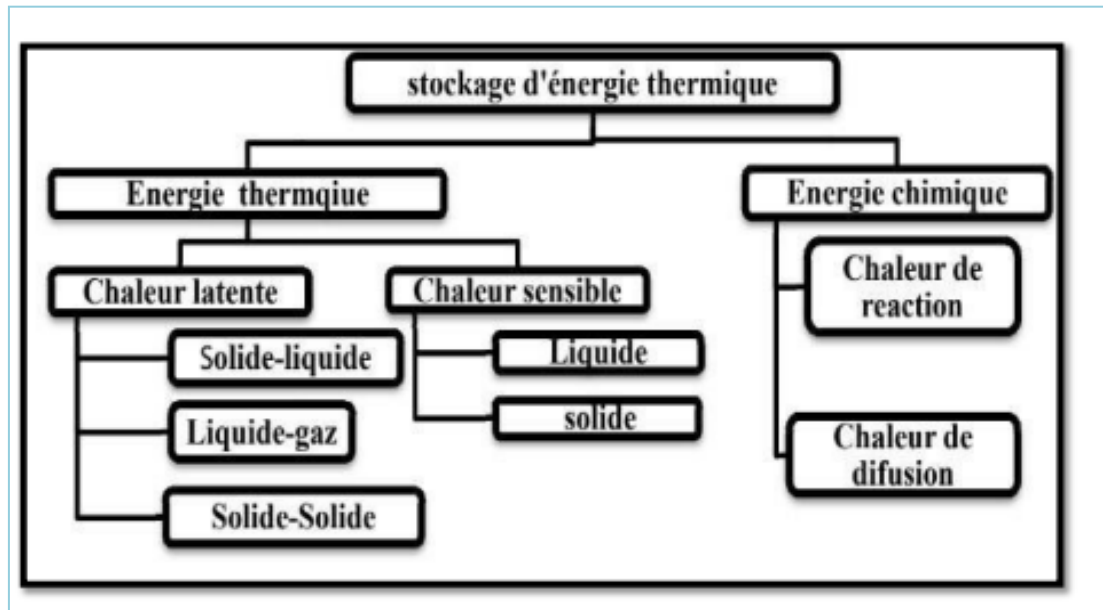


Figure 1. 2: Principales techniques de stockage de l'énergie thermique [6].

1.4.1 Stockage thermique latent (STL)[7]

Lorsque la matière passe d'un état à un autre, de la chaleur latente est libérée. Ce phénomène est également impliqué dans les changements allotropiques. Au cours de la fusion, de la chaleur est fournie à la substance, ce qui fait augmenter l'énergie potentielle des molécules et abandonner leur position d'équilibre, plutôt que d'augmenter leur vitesse. Par conséquent, la température reste constante, correspondant à la température de transition de phase.

Pour un changement d'état comme la fusion, la quantité de chaleur nécessaire s'exprime par :

$$Q = m \times (h_f - h_i) = m \times \Delta h_f \quad [1- 1]$$

Où Δh_f est l'enthalpie spécifique de fusion.

Généralement, il faut porter le matériau de sa température initiale T_i à sa température de fusion T_f et l'on écrit :

$$Q = m \times (h_f - h_i) = m \times C_p \times (T_f - T_i) + m \times \Delta h_f \quad [1- 2]$$

De manière analogue, pour un corps pur, il existe une courbe de variation de température. Avant d'atteindre le point de fusion, une augmentation linéaire de la température dans le temps est évidente pendant le chauffage.

La température reste constante tout au long de la transition d'état. Si T_f est la température de changement de phase d'un corps pur qui passe de la température T_1 à la température T_2 , avec $T_1 \leq T_f \leq T_2$ alors l'énergie stockée lors de cette transformation est :

$$\Delta H = \int_{T_i}^{T_f} m \times c_{ps}(T) dt + m \times L_f + \int_{T_i}^{T_f} m \times c_{pL}(T) dt \quad [1- 3]$$

$C_{ps}(T)$: chaleur spécifique du corps à l'état solide.

$C_{pL}(T)$: chaleur spécifique du corps à l'état liquide.

L_f : chaleur latente de changement de phase.

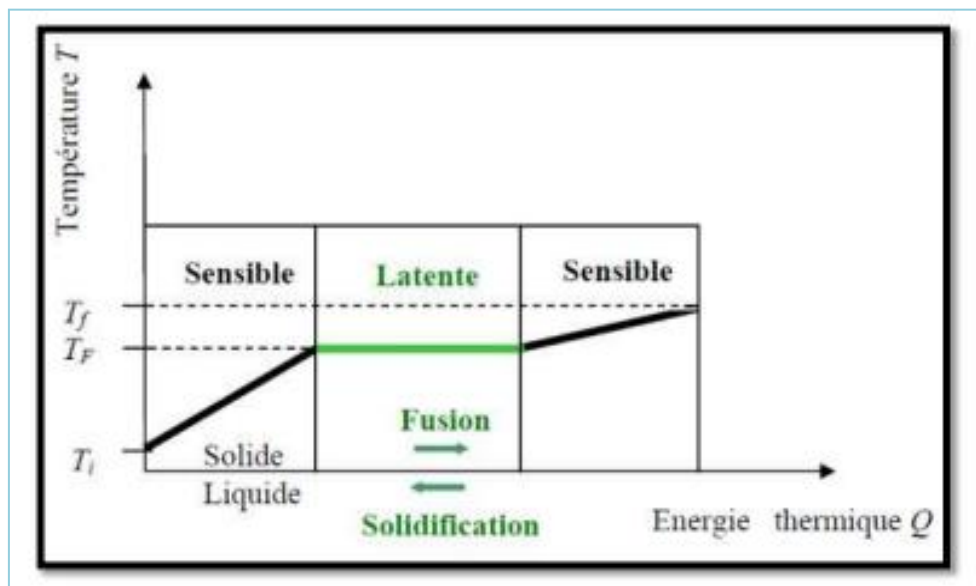


Figure 1. 3: Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état [7].

La chaleur latente possède plusieurs avantages, notamment [7]:

- La température à laquelle des substances pures ou des composés définis subissent un changement de phase presque constant.
- L'ampleur de la capacité de stockage est importante.
- L'utilisation du stockage de chaleur latente élimine efficacement les problèmes de surchauffe saisonnière car il possède une masse minimale.

- Les matériaux utilisés dans la plage de température du bâtiment pour un confort thermique optimal démontrent une capacité supérieure de stockage de chaleur.
- Par rapport aux matériaux de stockage de chaleur sensibles, ils peuvent retenir entre 5 et 14 fois plus de chaleur.

Les limites de la technologie de stockage de chaleur latente incluent :

Pour exploiter l'enthalpie de changement d'état lors de la congélation ou de la fusion du milieu, un stockage de chaleur latente est utilisé. Alternativement, il peut tirer parti de la chaleur sensible pour chauffer le solide jusqu'à ce qu'il fonde. Dans les deux cas, le processus nécessite :

- Un réceptacle conçu pour accueillir des matériaux en fonction de leurs caractéristiques inhérentes.
- L'altération de phase est intimement liée à la fluctuation de volume
- La transition entre les phases a eu lieu dans les paramètres de température nécessaires.
- Surface d'échange et de transfert d'énergie thermique.

1.4.2 Stockage thermique sensible, STS

Dans le processus de stockage de chaleur sensible, l'énergie thermique est accumulée en élevant la température d'un liquide ou d'un solide. Cette méthode permet plusieurs cycles de stockage et de récupération de chaleur sans aucune complication, car la température du matériau de stockage correspond à la quantité d'énergie stockée. Pourtant, le volume considérable du support de stockage nécessaire peut être considéré comme un inconvénient de ce système [7,8].

La capacité d'un support de stockage, les fluctuations de température et la masse du matériau de stockage déterminent la quantité de chaleur stockée dans ce processus. La chaleur sensible peut être stockée en utilisant des matériaux tels que des roches, des cailloux, des briques, du sable, de la terre, de l'air, de l'eau et de l'huile [9,10]. En supposant que la pression reste constante, il est possible de conserver une quantité d'énergie égale à la modification d'enthalpie lorsque l'on chauffe une substance liquide ou solide de masse m et de capacité calorifique spécifique $C(T)$ de sa température initiale T_1 à T_2 .

Pour calculer cette quantité d'énergie calorifique, on applique l'équation suivante :

$$\Delta H = H_{\text{finale}} - H_{\text{initiale}} = \int_{T_1}^{T_2} m \times c_p(T) dt \quad [1- 4]$$

Si la chaleur spécifique peut être considérée comme constante dans l'intervalle de températures entre T1 et T2 on a :

$$\Delta H = m \times C_p \times (T_1 - T_2) \quad [1- 5]$$

Donc la quantité d'énergie stockée est proportionnelle à l'écart de température. Et on a deux cas :

- Si $T_2 > T_1$ on parlera de stockage du chaud.
- Si $T_2 < T_1$ on parlera de stockage du froid.

Le tableau suivant présente certaines caractéristiques des matériaux utilisés pour le stockage de chaleur sensible :

Tableau 1. 1: Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20 °C [10].

Matériaux	Densité [kg /m ³]	Chaleur spécifique [J/Kg .K]	Capacité thermique volumétrique [J /m ³ .K]
Argile	1458	879	1.28
Briques	1800	837	1.51
Grés	2200	712	1.57
Bois	700	2390	1.67
Betton	2000	880	1.76
Verre	2710	837	2.27
Aluminium	2710	896	2.43
Ferre	27900	452	3.57
Acier	7840	465	3.68
Eau	988	4182	4.17

1.4.3 Stockage Thermochimique [10]

L'énergie thermochimique fait référence à la chaleur absorbée ou libérée lors d'une réaction chimique endothermique ou exothermique. La capacité de stockage d'énergie

thermochimique est liée à l'énergie présente dans les liaisons des composés chimiques qui participent à des réactions chimiques réversibles. Cela se traduit par une capacité de stockage de chaleur relativement élevée en raison de la rupture et de la recombinaison des liaisons moléculaires dans de telles réactions.

La capacité de stockage de chaleur dans cette méthode est particulièrement élevée, car elle est obtenue par la rupture et la reformation de liaisons moléculaires au sein d'une réaction chimique réversible.

Le stockage d'énergie thermo-chimique peut être réalisé de plusieurs manières, par exemple par l'utilisation d'un caloduc chimique ou d'une pompe à chaleur chimique. Cependant, cette approche est nettement plus complexe que le simple stockage de chaleur sensible et latente. Pour une mise en œuvre réussie, la réaction chimique doit être réversible, tandis que les composés chimiques utilisés doivent être à la fois non toxiques et non corrosifs [9].

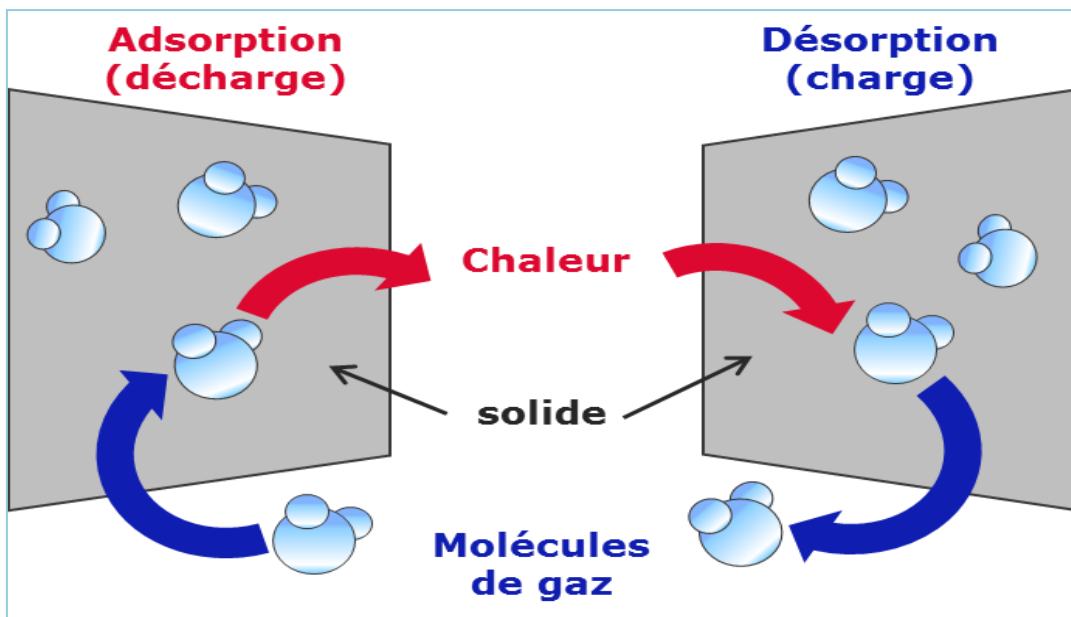


Figure 1. 4: Le principe du stockage de l'énergie par adsorption/désorption[9].

1.5 Critères de choix et de la conception d'un système de stockage

Les critères de conception d'un système de stockage sont nombreux et leur importance relative est directement liée à la technologie de la centrale et au mode de fonctionnement

souhaité. La quantité d'énergie stockée et restituée, est un point clé, d'autres critères doivent être pris en compte, qu'ils soient économiques [11] :

- Coût du matériau de stockage.
- Coûts d'investissement liés à l'encombrement du système de stockage.
- Le prix de l'échangeur de chaleur.

Ou bien techniques :

- Une quantité concentrée d'énergie par masse ou volume ;
- Excellente conductivité thermique;
- L'échange efficace de chaleur entre le fluide de travail et le matériau de stockage est crucial. De plus, la durabilité mécanique et chimique du matériau de stockage doit être assurée.
- Il est essentiel d'assurer la compatibilité chimique entre la chaleur/le fluide de travail, l'échangeur de chaleur et le matériau de stockage.
- La capacité du matériau de stockage à être inversé pour plusieurs cycles de charge et de décharge.
- Il y a une dissipation de chaleur minimale.
- Contrôle/commande du procédé maîtrisé.
- Lors de la création et de la détermination de la taille d'une unité de stockage, il est crucial de prendre en compte tous ces facteurs.

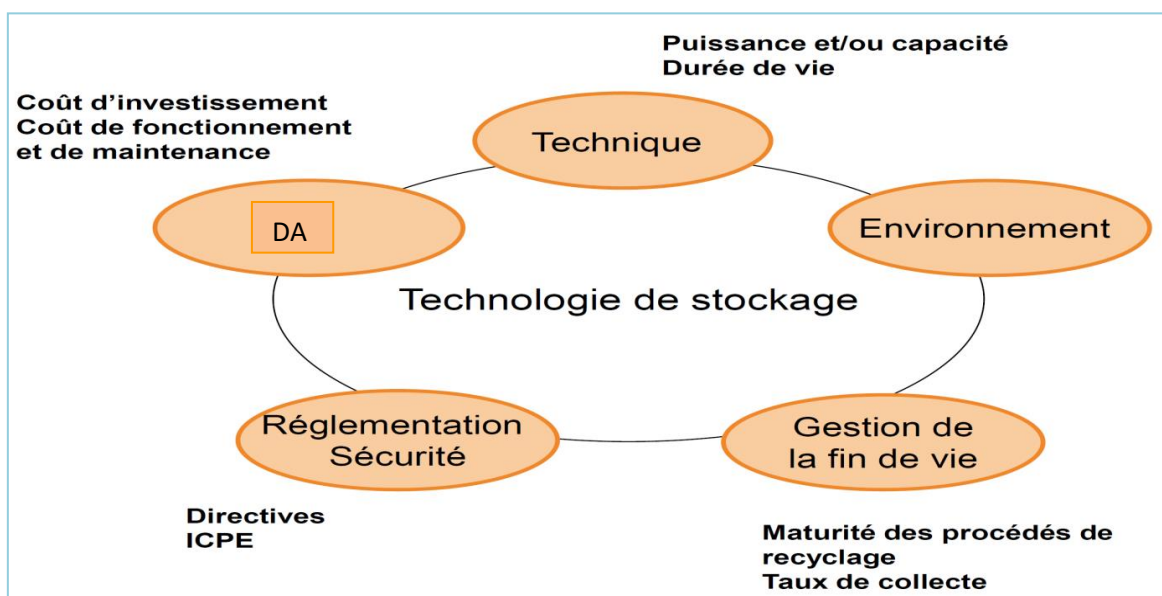


Figure 1. 5: Critères de choix d'une technologie de stockage[11].

1.6 Comparaison des différents types de stockage d'énergie thermique

Le Tableau 1.2 répertorie les caractéristiques des trois systèmes de stockage d'énergie thermique présentés.

Six paramètres fondamentaux ont été choisis : la densité énergétique, la température de stockage, la durée de stockage, le transport de l'énergie, la maturité du système et la complexité de mise en œuvre du système.

Tableau 1. 2: Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur.[12]

		Stockage par chaleur sensible	Stockage par chaleur latente	Stockage par voie thermo-chimique
Densité énergétique	Volumétrique	Faible 15-60 $KWh.m^3$	Moyenne 50-100 $KWh.m^3$	Elevée 100-600 $KWh.m^3$
	massique	Faible 0.02-0.03 $KWh.kg^{-1}$	Moyenne 0.05-0.1 $KWh.kg^{-1}$	Haute (0.5-1) $KWh.kg^{-1}$
Température de stockage		Température de l'étape de charge	Température de l'étape de charge	Température de l'étape de charge ou température ambiante
Durée de stockage		Limitée (Pertes thermiques)	Limitée (Pertes thermiques)	Théoriquement illimitée
Transport de l'énergie		Faible distance	Faible distance	Distance théoriquement illimitée (Kato et al, 2006)
Maturité		Echelle industrielle (20MWe)	Echelle pilote (100KWth)	Echelle laboratoire (1-5kWth)
Technologie		simple	Moyenne	Complexe

1.7 Les matériaux à changement de phase

Les matériaux à changement de phase ou MCP, sont capables d'absorber ou de libérer de l'énergie thermique lorsqu'ils passent d'un état physique à un autre. Plus précisément, ces substances stockent la chaleur pendant le processus de fusion et la libèrent pendant la solidification. Bien que de nombreux MCP aient une température de fusion comprise entre 0 et 120°C, seuls ceux ayant des propriétés thermodynamiques, cinétiques et chimiques spécifiques répondant à certains critères peuvent être utilisés comme matériaux de stockage.

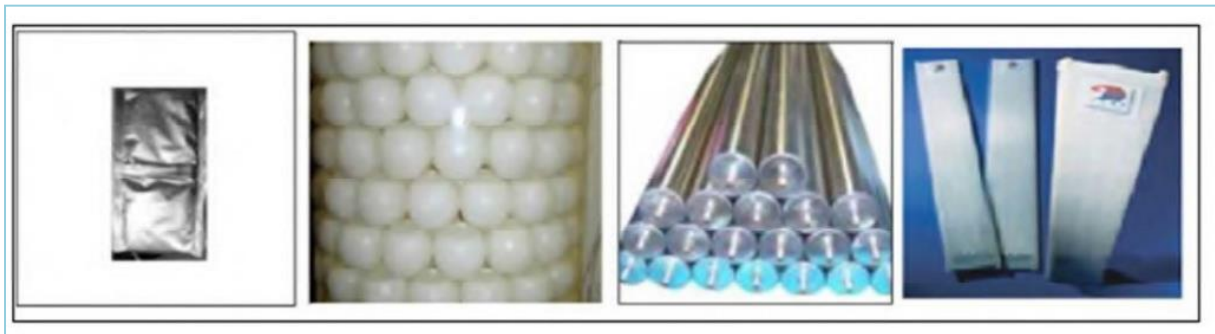


Figure 1. 6: Quelque matériau à changement de phase : pochettes, sphères, tubes, plaquettes [12].

1.7.1 La classification des MCP

Les matériaux à changement de phase sont composés de divers composés et mélanges, chacun avec des profils chimiques uniques. Ce qui les unit est leur capacité de chaleur latente supérieure lors du changement de phase et la plage de température optimale requise pour de telles transitions.

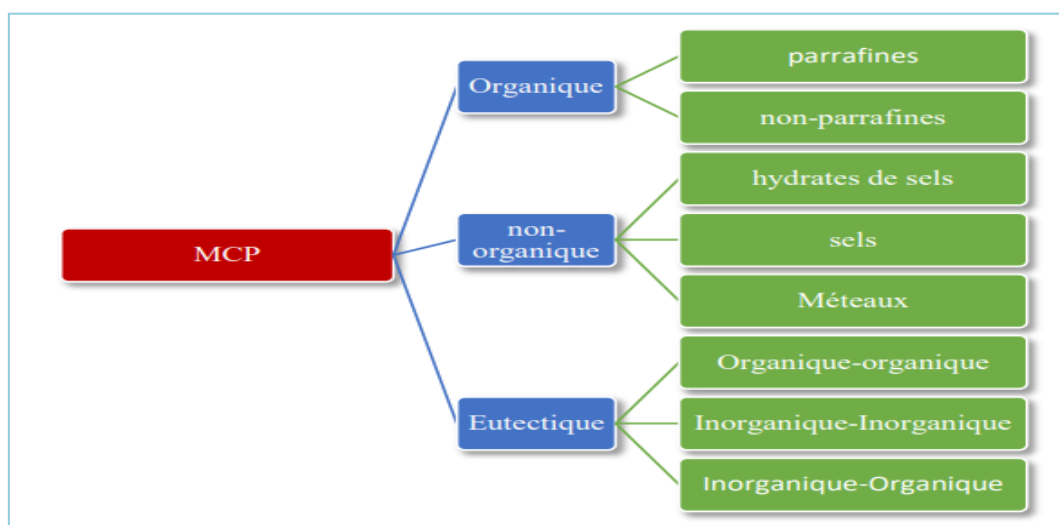


Figure 1. 7: Classification des MCP proposée par Abhat [13].

Substances utilisées pour le stockage d'énergie par changement de phase à des fins thermiques, il est crucial d'avoir une substance avec à la fois une chaleur latente et une conductivité thermique élevées. Fonctionnant efficacement et s'adaptant bien même avec un sous-refroidissement minimal, assurant une fusion optimale. Pour être idéal, le matériau doit non seulement être abordable, mais chimiquement inerte, non dangereux et résistant à la corrosion. Au cours de quatre décennies de recherche, les sels et les cires hydratées ont été les options les plus examinées. Eutectiques constitués de composés organiques et inorganiques, ainsi que de paraffine et d'acides gras [14].

Tableau 1. 3: Propriétés thermophysiques de certains MCP [15].

Matériaux		Température de fusion (°C)	Enthalpie de fusion (kj/kg)
MCPs organiques	Eau	0	333.6
	Stéarate de butyle	19	140
	L'acide caprique laurique	21	143
MCPs inorganiques	$KF \cdot 4H_2O$	18.5	231
	$Mn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	25.8	125.9
	$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	32	251
MCPs eutectiques	$66.6\% C_aCL_2 \cdot 6H_2O + 33.3\% MgCL_2 \cdot 6H_2O$	25	127
	$48\% C_aCL_2 + 4.3\% NaCL + 47.3\% H_2O$	26.8	188
	$47\% C_a(NO_3)_2 \cdot 4H_2O + 53\% Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	30	136

1.7.1.1 Les Composés organique

1.7.1.1.1 La paraffine

Les paraffines appartiennent à la famille des hydrocarbures entièrement saturés, avec une formule moléculaire de (C_nH_{2n+2}) . Ils présentent des points de fusion variables et ont une densité d'environ 900 kg/m³. Les paraffines sont un choix populaire pour les applications à basse température (-10 à 100°C) parmi les matériaux à changement de phase solide-liquide (MCP). Leur chaleur latente dépend de la masse molaire et de la température, les chaînes d'hydrocarbures plus longues produisant des températures de fusion et une chaleur latente plus élevées. Cet attribut offre une polyvalence dans la sélection du MCP le plus approprié pour chaque cas d'utilisation [16].

Dans cette catégorie, on peut citer notamment :

Les paraffines n-Hexadecane $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{CH}_3$ ($T_{\text{fusion}} = 22 \text{ }^\circ\text{C}$),

n-Nonacosane $\text{CH}_3\text{-}[\text{CH}_2]_{27}\text{-CH}_3$ ($T_{\text{fusion}} = 63,4 \text{ }^\circ\text{C}$) ou encore le nTriacotane $\text{C}_{30}\text{H}_{62}$ ($T_{\text{fusion}} = 65,4 \text{ }^\circ\text{C}$) [5].

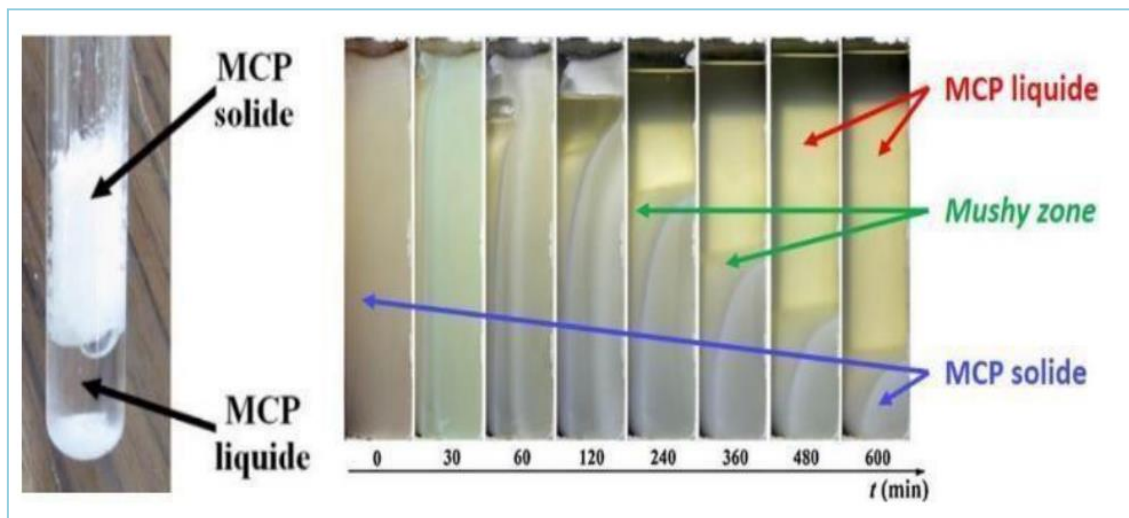


Figure 1. 8: Visualisation de la fusion d'une paraffine[16].

1.7.1.1.2 Les acides gras

Les acides gras sont identifiés par leur composition chimique, qui est $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COOH}$. Ils présentent une enthalpie de changement de phase particulièrement élevée qui varie avec un spectre de température de 40 à 150°C selon la longueur de leur chaîne carbonée.

L'acide stéarique $\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$, l'acide sébacique $\text{C}_{10}\text{H}_{18}\text{O}_4$ et l'acide palmitique $\text{C}_{16}\text{H}_{32}\text{O}_2$ sont les acides gras les plus couramment utilisés comme MCP. Avec une température de fusion de 57,5°C, 132°C et 61-63°C, respectivement, ce sont les meilleurs choix dans ce spectre.

Avec une chaleur de fusion similaire aux paraffines et une surfusion minimale, les acides gras subissent une altération de volume comparable. Heureusement, ils sont facilement dérivés d'huiles végétales et animales et fournissent un approvisionnement biosourcé fiable [16].

Les auteurs ont observé un problème de consistance des acides gras une fois qu'ils ont dépassé leur point de fusion [17]. La détérioration éventuelle de la substance pourrait potentiellement résulter de sa transformation en vapeur lors de son état liquide, plutôt que d'une dégradation réelle du produit [16].

1.7.1.1.3 Alcools de sucre

Appartenant à la famille des polyols, les alcools de sucre sont des composés organiques qui présentent des valeurs d'enthalpie de changement de phase élevées. Avec une densité d'environ 1500 kg/m³, ces composés ont une densité énergétique incroyablement élevée [16].



Figure 1. 9: Molécule d'acide stéarique (Modèle structurel de molécule et de formule chimique)[16].

Un inconvénient communément reconnu des alcools de sucre est leur tendance à la surfusion, permettant un stockage inter-saisonnier [18]. En permettant au MCP liquide de rester sous le point de solidification, il conserve sa chaleur. Pourtant, cette condition métastable empêche le dégagement de chaleur à la température de changement d'état prévue [16].

Avantages des MCPs organiques

- Il y a une absence de ségrégation de phase.
- Reste chimiquement stable.
- La quantité de surfusion est insignifiante.
- Cet attribut facilite l'intégration dans n'importe quel système de stockage de chaleur.
- Minimalisme environnemental.
- Entièrement recyclable avec zéro déchet.
- Montre une faible sensibilité au processus de fusion et de solidification.

Inconvénients des MCPs Organiques

- Ce matériau présente une faible conductivité thermique, allant de 0,18 à 0,25 W/mK.
- Expansion à grande échelle.

- Combustible.
- Les sels hydratés sont comparativement moins chers que leurs homologues coûteux.

1.7.1.2 Les composés inorganiques

La classification des matériaux inorganiques est basée sur trois catégories : les métaux, les hydrates de sel et les sels.

1.7.1.2.1 Les sels, les hydrates de sels

L'utilisation de ces matériaux pour le stockage thermique à haute température est fascinante, principalement en raison de leur plage de température de fusion de 250 à 1680°C et de leurs chaleurs latentes de fusion allant de 68 à 1040 kJ/kg.

Les sels présentent un avantage distinct par rapport aux composés organiques en ce sens qu'ils connaissent une expansion volumique nettement inférieure d'environ 7%. [19]

Les hydrates de sel ont l'avantage d'être rentables par rapport aux composés organiques, ce qui les rend populaires pour le stockage latent. Certains de ces sels peuvent même présenter un léger effet de surfusion. Cependant, leurs propriétés corrosives rendent difficile la conception de réservoirs de stockage. De plus, le pouvoir oxydant des sels les rend incompatibles avec les huiles thermiques, qu'il convient d'éviter en tant que fluide caloporteur. Enfin, quelques sels présentent des problèmes de stabilité thermique, leurs propriétés pouvant s'altérer avec le temps [19].

1.7.1.2.2 Les métaux

Les métaux peuvent être utilisés comme MCP grâce à leur conductivité thermique élevée par rapport aux autres types de MCP. Aussi, leur chaleur latente très élevée mais également leur stabilité à long terme. Toutes ces caractéristiques permettent un stockage rapide de la chaleur avec une faible expansion volumique [16]. Malheureusement, Leur utilisation est encore à un stade de recherche et ils ne sont pas encore sérieusement envisagés pour une application industrielle en raison de la contrainte de masse [20]. De plus, ils présentent aussi des problèmes de corrosion [16].

Parmi les métaux on peut citer notamment le Potassium K ($T_{fusion} = 63.2 \text{ °C}$), le Bi₅₈ Sn₄₂ ($T_{fusion} = 138 \text{ °C}$) ou encore le Lithium Li ($T_{fusion} = 186 \text{ °C}$) [14].

Avantages des MCPs Inorganiques

- Disponibilité.
- Grande chaleur de fusion.
- Bon marché.
- Ininflammables.

Inconvénients des MCPs Inorganiques

- Ségrégation.
- La réduction de l'efficacité est corrélée aux processus répétés de fusion et de solidification.
- La surfusion, un processus dans lequel un liquide est refroidi en dessous de son point de congélation sans se solidifier, est un phénomène fascinant. C'est un nom qui décrit la tendance d'une substance à se détériorer ou à s'user en raison de réactions chimiques avec son environnement.
- Les cycles thermiques sont associés à la déshydratation.

1.7.1.3 Les Composés eutectiques

Les substances constituées de plusieurs MCP purs sont appelées MCP eutectiques. Typiquement, ces matériaux sont une combinaison de MCP organiques et inorganiques, soit :

- organique-organique,
- organique-inorganique,
- inorganique-inorganique.

Les avantages des MCP eutectiques sont doubles

Ils présentent un point de fusion précis semblable à celui des substances pures et possèdent des chaleurs latentes volumétriques légèrement supérieures à celles des composés organiques purs. Cependant, le manque de données disponibles sur les propriétés thermiques et l'utilisation industrielle limitée sont les deux principaux inconvénients de ces matériaux [21,22]

1.7.2 Classe de MCP

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

1.7.2.1 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 confère une stabilité inégalée dans le temps, donnant lieu à un cycle remarquable [23].

1.7.2.2 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 [24].

1.7.3 Principe de fonctionnement de MCP

Les MCPs utilisent la chaleur latente pour réguler les températures dans un seuil défini. Une fois que les températures dépassent une limite spécifique, les liaisons moléculaires de la substance se brisent, provoquant une réaction endothermique où le matériau passe de l'état solide à l'état liquide tout en absorbant la chaleur. Lorsque la température diminue, le matériau émet de l'énergie et se solidifie à nouveau.

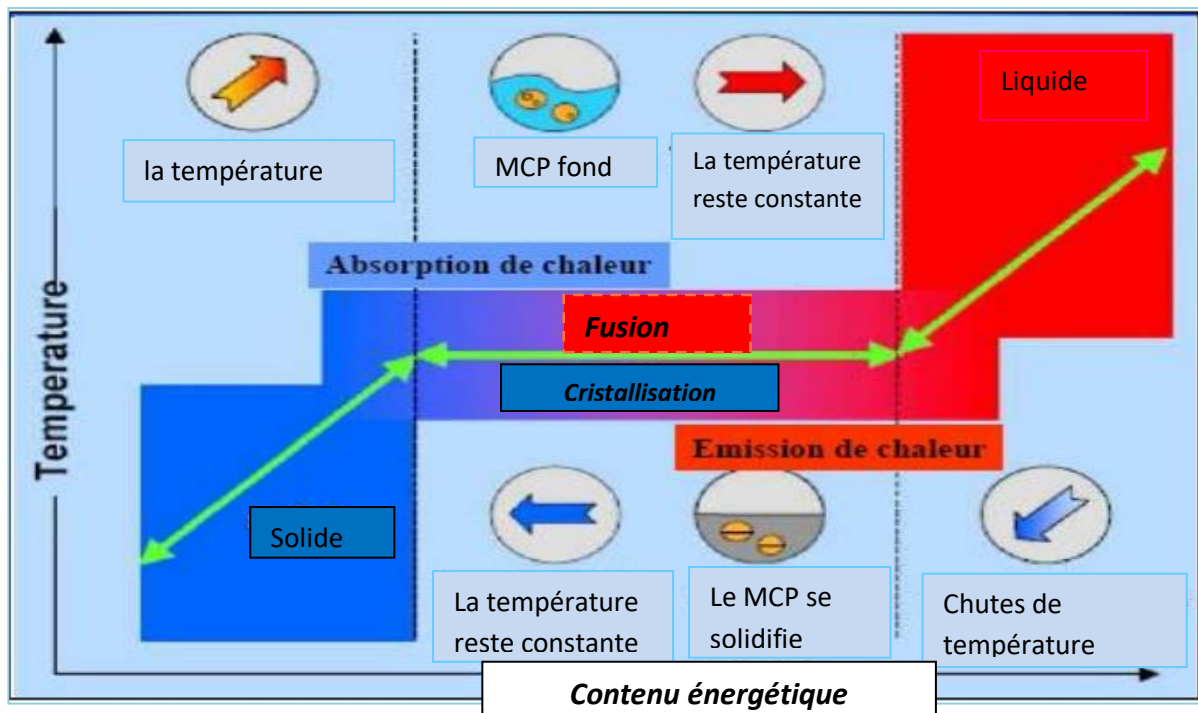


Figure 1. 10: Principe de fonctionnement des MCP [25].

1.7.4 Le choix d'un MCP

Pour faciliter la sélection d'un MCP approprié pour une application spécifique, un ensemble de critères sera établi [26] :

1.7.4.1 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.

1.7.4.2 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.

1.7.4.3 Considérations cinétiques

- Dynamique de charge et de décharge rapide.
- Évitez 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 cycles thermiques.
- Compatibilité avec les matériaux du réservoir de stockage pour chaque phase pour éviter tous les problèmes de corrosion, de réactivité chimique ou électrochimique.

1.7.4.4 Considérations chimiques

- Stabilité chimique des objets dans le temps et les niveaux de température.

- Bon taux de cristallisation et ininflammable et non toxique.

1.7.4.5 Considérations économiques

- Coût raisonnable et bonne disponibilité de stockage.

1.7.5 Les applications des MCP pour le stockage de l'énergie thermique

1.7.5.1 Le transport des produits alimentaires

Les MCP sont utilisés dans diverses industries telles que l'agroalimentaire, la pharmacie et le médical pour contrôler efficacement les fluctuations de température subies par les denrées périssables, les médicaments et d'autres composants délicats. L'une des applications les plus notables des MCP est le transport d'échantillons de sang. Ces matériaux sont généralement livrés dans des "sacs en plastique" compacts et sont stratégiquement positionnés à proximité du produit, assurant une conservation optimale [27, 4].



Figure 1. 11: Sac isotherme avec plaques eutectiques (solution de transport pour échantillons biologiques).

1.7.5.2 Applications médicales

Dans le domaine médical, l'une des principales applications est le transport de sang et d'organes. Travailler avec des conteneurs à cette fin est similaire à ceux expliqués précédemment.

D'autres applications médicales peuvent être des compresses chaudes ou froides pour traiter la douleur localisée dans le corps [8].



Figure 1. 12: Récipients transporter sang et organes qui contiennent MCP[8].

1.7.5.3 Les applications des MCP dans le bâtiment

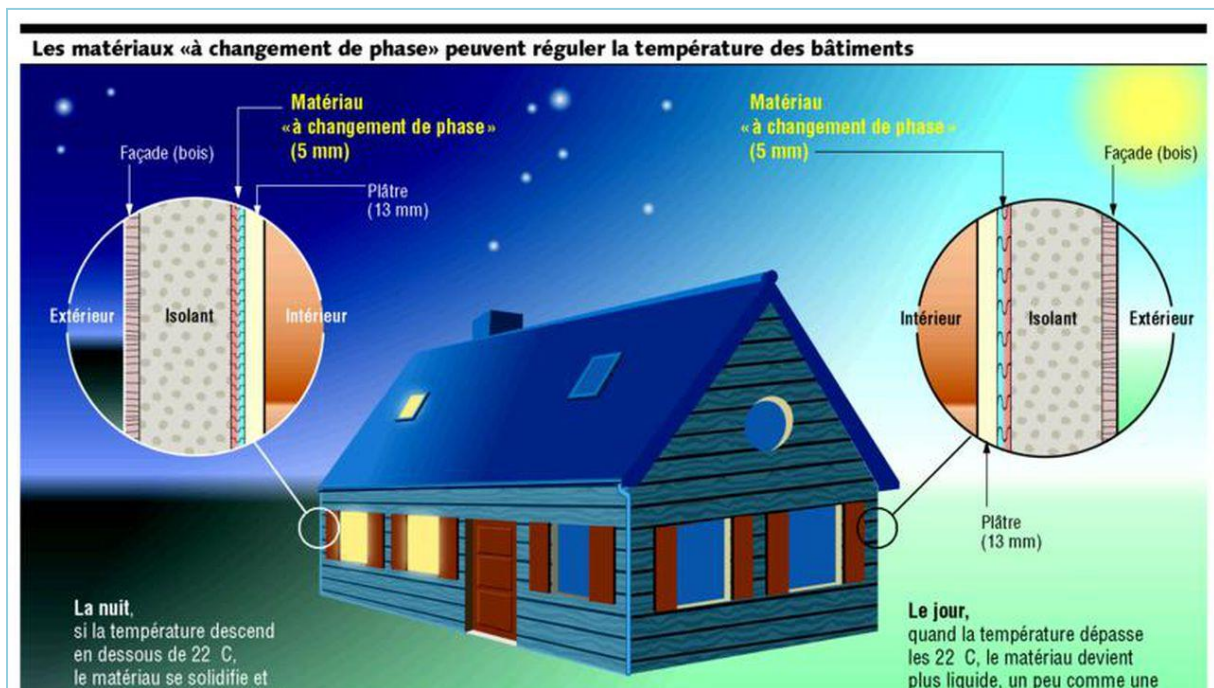


Figure 1. 13: Pour que les murs retiennent la chaleur ou la fraîcheur[28].

1.7.5.3.1 Les plaques de plâtres-MCP

Les plaques de plâtre-MCP consistent généralement en un matériau de construction léger et en MCP.

Le panneau de gypse est généralement fabriqué en trempant le panneau de gypse dans du MCP ou en ajoutant du MCP lors de la fabrication du panneau de gypse. Ces plaques de plâtre MCP sont fixées aux murs dans un sandwich composé d'isolant, de polystyrène et de plâtre MCP [29].

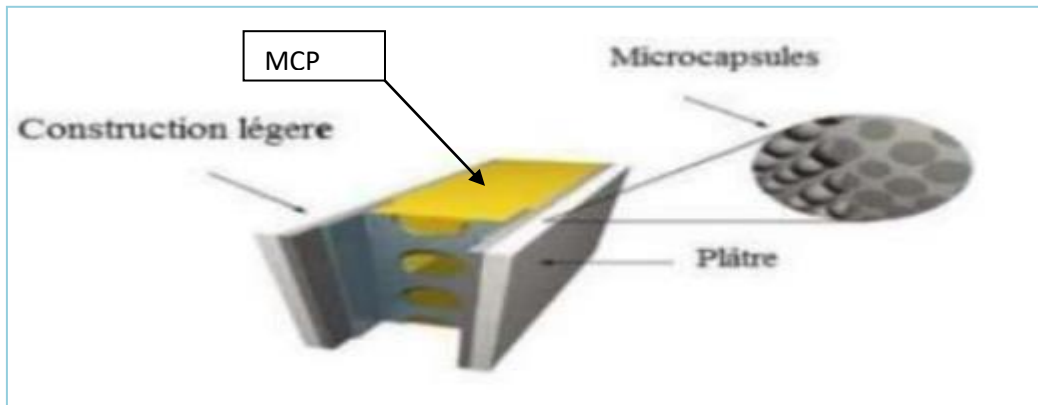


Figure 1. 14: Modèle de mur contenant une plaque de plâtre-MCP [29].

1.7.5.3.2 Les murs trombes à base de MCP

Divers MCP ont été testés pour déterminer lequel affiche une efficacité thermique optimale dans un mur de trombe, en fonction du MCP utilisé.

La recherche a démontré que les murs de trombe utilisant la technologie MCP nécessitent moins d'espace entre le mur et la couche de verre ou de plastique par rapport aux murs de trombe traditionnels. De plus, ils sont considérablement plus légers que leurs homologues traditionnels.

1.7.5.3.3 Les MCP dans les rideaux

Le confort résidentiel peut également être amélioré en testant des rideaux à base de matériaux à changement de phase micro-encapsulés (MCP). Ces rideaux fonctionnent sur le principe simple de laisser les fenêtres ouvertes pour permettre aux rideaux d'absorber le rayonnement solaire.

Les MCPs fusionnent ensuite, conduisant à un intérieur rafraîchissant. À l'inverse, pendant les jours nuageux et le refroidissement nocturne, les rideaux libèrent de la chaleur accumulée, ce qui provoque la solidification des MCPs, réchauffant ainsi la pièce [8].



Figure 1. 15: Rideaux à MCP[8].

1.7.5.4 Dans certain système de refroidissement

Les recherches actuelles indiquent que la conservation des aliments domestiques présente des défis importants pour maintenir des températures appropriées dans les réfrigérateurs [30], ainsi que l'efficacité énergétique de ces équipements [31]. Ainsi, la résolution de ces problèmes est primordiale pour atteindre deux objectifs : assurer la sécurité alimentaire et réduire la consommation d'électricité des ménages.

Des solutions doivent donc être recherchées pour répondre à ce double besoin. L'intégration de matériaux à changement de phase (MCP) dans les réfrigérateurs domestiques est une solution nouvelle et rentable qui résout deux problèmes majeurs à la fois [32]. En incorporant 10 litres de ce matériau dans les parois d'un réfrigérateur-congélateur, il peut collecter suffisamment d'énergie pour maintenir des températures de produit constantes pendant plus de 14 heures, éliminant ainsi le besoin de redémarrages fréquents du système de refroidissement [33].

En utilisant ces matériaux à inertie thermique renforcée, la fréquence des démarrages et des arrêts peut être réduite, limitant ainsi les pics de consommation électrique [34]. De plus, des heures de fonctionnement spécifiques peuvent être priorisées pendant la journée pour maintenir la stabilité de la température, ce qui conduit finalement à une meilleure conservation des aliments [32].

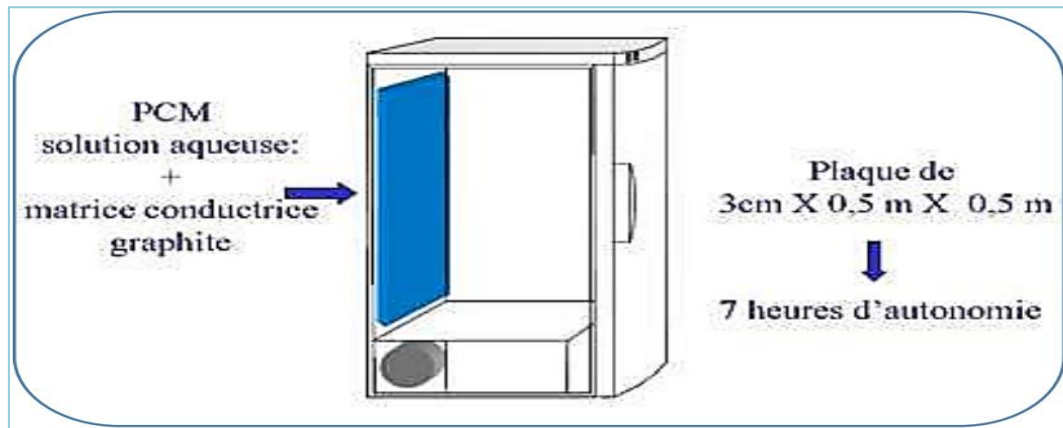


Figure 1. 16: Réfrigérateur isolé par MCP [32].

1.7.5.5 Fabrication des vêtements

Des packs de matériaux à changement de phase, contenant des additifs de sulfate de sodium et de l'eau, sont incorporés dans les vêtements pour créer des vêtements dotés de capacités avancées d'absorption de la chaleur. À environ 30 °C, ces matériaux passent d'un état solide à un état liquide, absorbant efficacement la chaleur. Les méthodes de refroidissement, qui varient en nature et en application, visent principalement à réduire la température corporelle et ses fonctions physiologiques associées, y compris les fonctions liées à la peau et aux muscles [35].

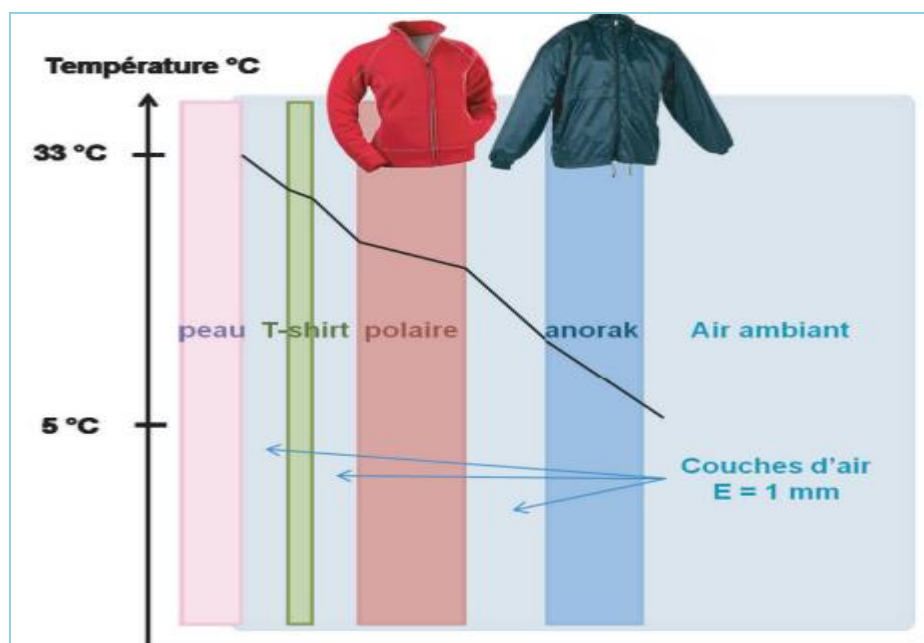


Figure 1. 17: L'utilisation des MCP dans les textiles[35].

1.7.5.6 Stockage de l'énergie thermique

Les MCP sont capables de stocker de l'énergie en passant d'une phase solide à une phase liquide, appelée fusion, puis en libérant de la chaleur par un passage de la phase liquide à la phase solide appelée solidification. Un MCP couramment utilisé à cette fin est l'acétate de sodium tri hydraté, qui fond à environ 58°C. Il est utilisé dans des conteneurs spécialisés qui peuvent être transportés par camion pour recueillir la chaleur produite par les incinérateurs de déchets ménagers. L'énergie est ensuite transmise à des stations équipées à une température d'environ 50°C [36].

1.7.6 Méthodes de conditionnement des MCP dans les applications de stockage thermique

Pour que les MCP soient utilisés efficacement dans les dispositifs et systèmes de stockage thermique, des exigences spécifiques doivent être respectées lors de leur processus de conditionnement.

Le matériau du contenant doit être en harmonie avec le MCP et ne doit pas subir d'oxydation, de ramollissement ou toute autre forme de dégradation. Il est impératif que le contenant d'emballage assure une étanchéité irréprochable lors du passage du MCP du solide au liquide. Cette transition réduit la viscosité, entraînant une augmentation substantielle du taux de fuite.

Pour contenir le matériau à changement de phase sous forme liquide, le conteneur doit être suffisamment résistant pour s'adapter à l'expansion et à la modification du volume du MCP. Si le conteneur ne peut pas supporter de tels changements, il peut se rompre.

Il existe deux techniques pour conditionner les MCP (I.O. Salyer, A. K. Sircar), 1990[37], et 1993 [4].

1.7.6.1 La macro-encapsulation [38]

Les conteneurs peuvent être constitués d'un assortiment de matériaux, y compris des sacs, des bouteilles en plastique et des bouchons de formes et de tailles variées.

Les sphères ou nodules en plastique (comme le montre la figure 1. 19) sont utilisées dans divers procédés industriels. Ces nodules sont disponibles en trois diamètres différents de 77-78 et 98 mm et sont utilisés à différentes températures. Les nodules à faible changement d'état (-3 à -15 °C), les nodules à température intermédiaire (-3 à 15 °C) et les nodules à température de stockage de glace (0 °C) sont fabriqués pour des exigences de

température spécifiques. De plus, certains nodules spéciaux peuvent avoir des températures de changement d'état de 27°C et plus.

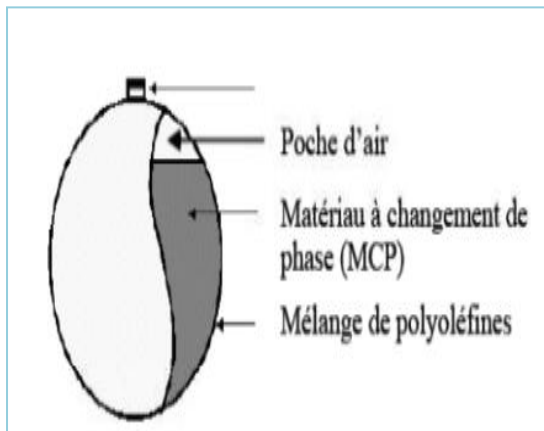


Figure 1. 18: Conditionnement des MCP
Dans un module cristophia.

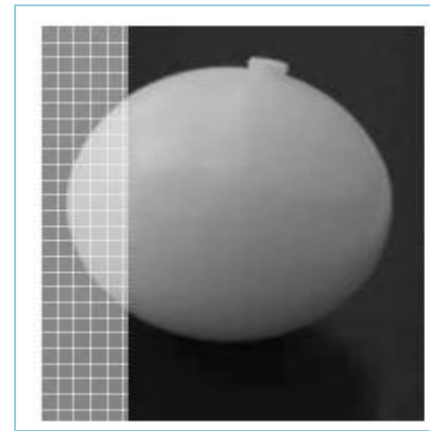


Figure 1. 19: Nodule.



(a)



(b)

Figure 1. 20: (a) Conditionnement en sac plastique, (b) Conditionnement en briquette plastique.

1.7.6.2 La micro- encapsulation

La micro-encapsulation implique le confinement de minuscules gouttelettes liquides ou solides dans un revêtement solide mesurant entre 1 et 1000 μm de diamètre, obtenu par des moyens chimiques ou physiques.

Le séchage par pulvérisation, la centrifugation, l'utilisation de lit fluidisé et les techniques de revêtement multiples constituent les processus physiques impliqués.

Les procédés chimiques impliquent diverses techniques d'encapsulation in situ, y compris les polycondensations inter-faciales qui donnent naissance à des polymères d'enveloppe comme les polyamides ou les polyuréthanes, et la précipitation, qui se produit en raison de la polycondensation des résines aminées, entre autres.

Les chercheurs Hawlader et al [39]. Ont mené une série d'expériences et de simulations pour évaluer l'efficacité et les capacités des paraffines enfermées dans un agent de liaison (HCHO). Ils ont analysé le taux d'encapsulation (rapport noyau sur revêtement) et la capacité de stockage d'énergie de ces paraffines. De plus, des tests de cyclage thermique ont été effectués pour démontrer que les capsules conservaient leur profil géométrique et leur capacité de stockage même après avoir été cyclées 1000 fois.

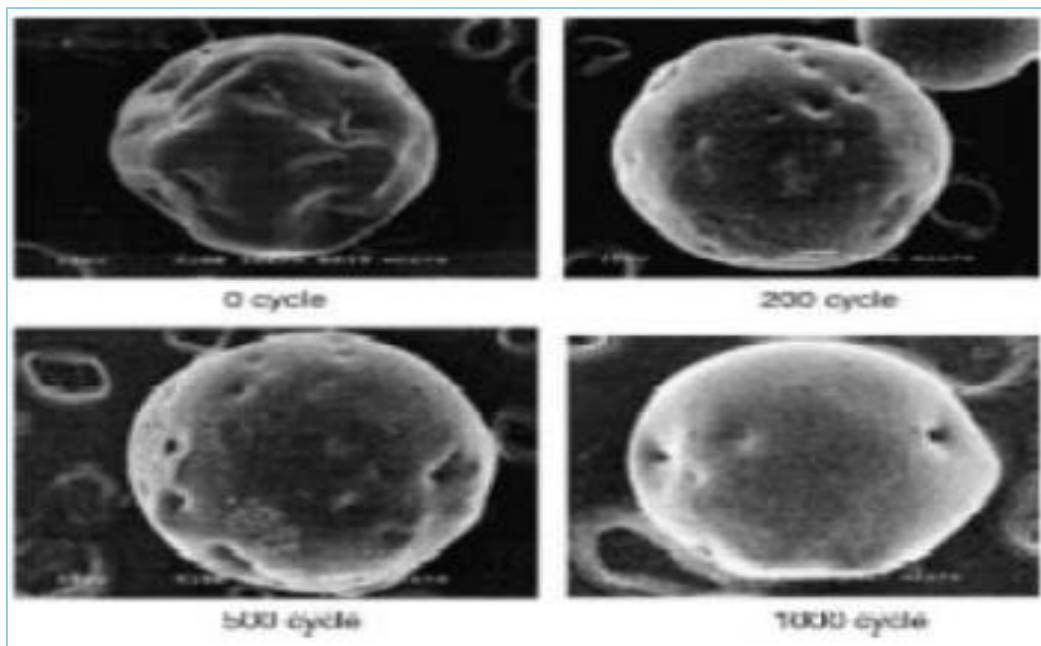


Figure 1. 21: Vue au MEB de microcapsules renfermant des paraffines [39].

Conclusion

Ce chapitre se penche sur les techniques de stockage de chaleur et donne un aperçu des matériaux à changement de phase. On a identifié une large gamme de MCP avec des applications dans divers domaines, en plus de souligner les avantages de chaque famille de matériaux. La section met également en évidence les défis associés à leur utilisation.

CHAPITRE

2

*Les procédés utilisés pour l'amélioration
de stockage thermique par MCP*

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 des fibres. Cela permet de transférer plus efficacement l'énergie thermique vers et depuis les MCP.

Il est également possible d'optimiser la taille des particules de MCP pour améliorer la surface de contact avec le matériau de stockage. Enfin, il est possible de concevoir des systèmes de stockage qui utilisent plusieurs couches de MCP pour augmenter la densité d'énergie globale.

2.1 Milieu poreux

Un matériau poreux est caractérisé par une charpente solide avec des vides interconnectés. Ces cavités, appelées pores, peuvent être agencées de manière structurée ou non.

Lorsque les zones vides d'un milieu poreux sont remplies d'une phase constante de fluide ou de gaz, le milieu est considéré comme complètement saturé [40]. Les matériaux poreux peuvent être trouvés sous diverses formes dans les environnements naturels et industriels [41].

- Matrices solides lâches non compactées constituées de grains (piles de billes, panneaux de fibre de verre, sable,....etc.).
- Matrices solides compactes et fermes (ex. roches, bois,....etc.).

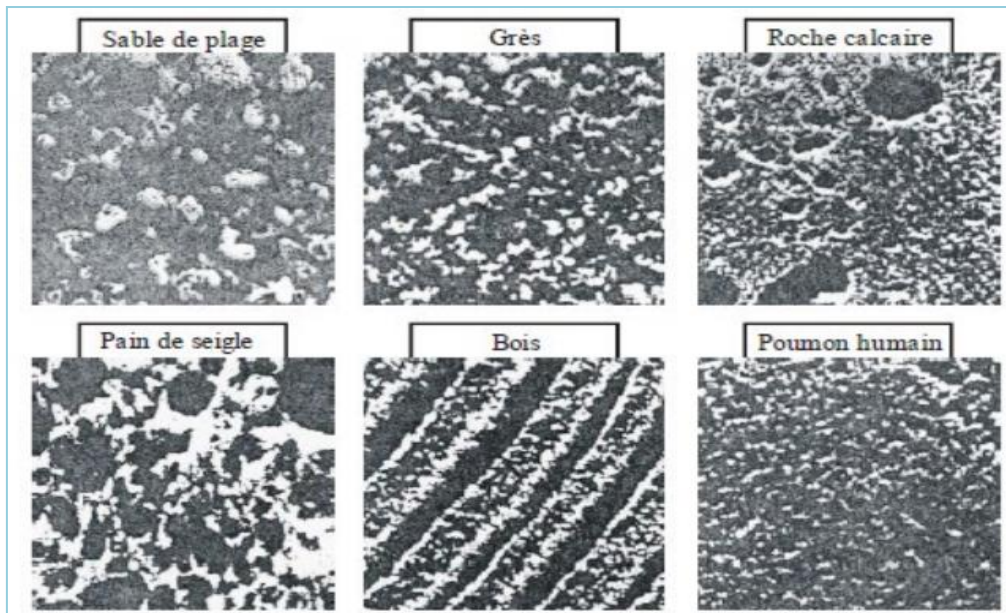


Figure 2. 1: Exemples des milieux poreux [41].

2.1.1 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: [41]

2.1.2 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 ϕ 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 ε est définie comme suit [42] :

$$\varepsilon = \frac{V_f}{V} = \frac{V_f}{V_s+V_f} \quad [2- 1]$$

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.

2.1.3 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 [43]. 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:

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

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 Kozney –Carmen devient comme suit :

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

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

2.1.4 Surface spécifique

Comme la porosité, la surface spécifique [42] est une propriété géométrique importante du milieu poreux. On peut définir la surface spécifique comme a_{sf} le rapport entre l'aire de la surface totale de l'interface fluide -solide A_{sf} et le volume de l'échantillon, soit :

$$a_{sf} = \frac{A_{sf}}{V} \quad [2- 4]$$

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

2.1.5 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[42]. (Fig. 2.2)

$$\frac{1}{K_c} = \frac{\varepsilon}{K_f} + \frac{1-\varepsilon}{K_s} \quad [2- 5]$$

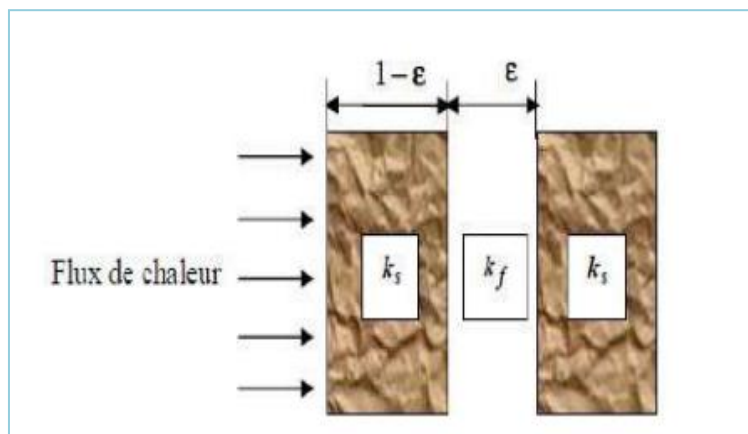


Figure 2. 2: Modèle série de la conductivité thermique effective[42].

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. 2.3).

$$K_e = (1 - \varepsilon)K_s + \varepsilon K_f \quad [2- 6]$$

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

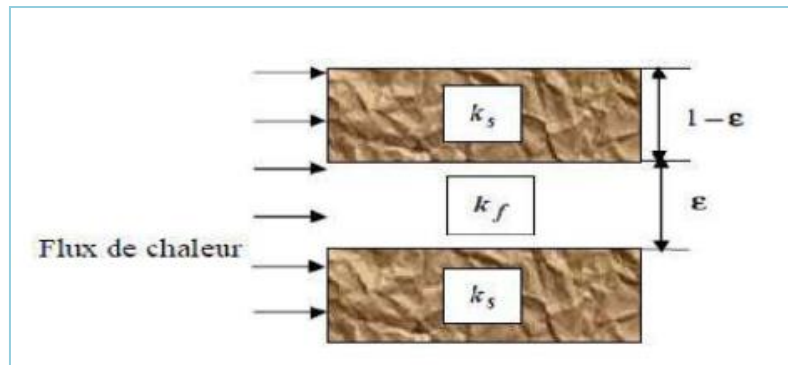


Figure 2. 3: Modèle parallèle de la conductivité thermique effective[42].

2.1.6 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 [44].

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 (2.4), 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 [45].

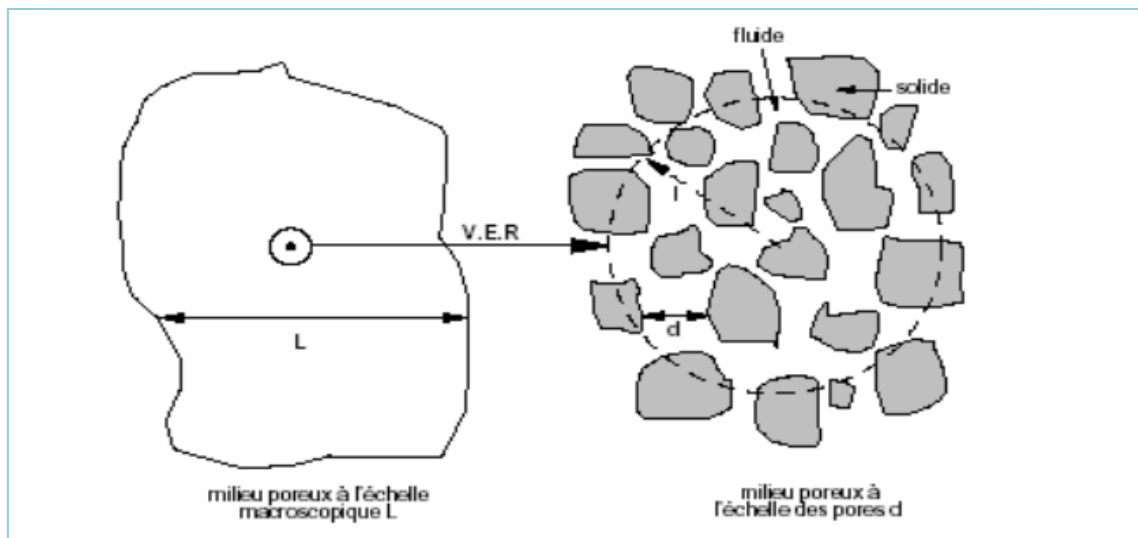


Figure 2. 4: Représentation schématique du volume élémentaire représentatif [45].

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

- Dans la plupart des cas, les dimensions du V.E.R 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.

2.2 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 :

2.2.1 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.

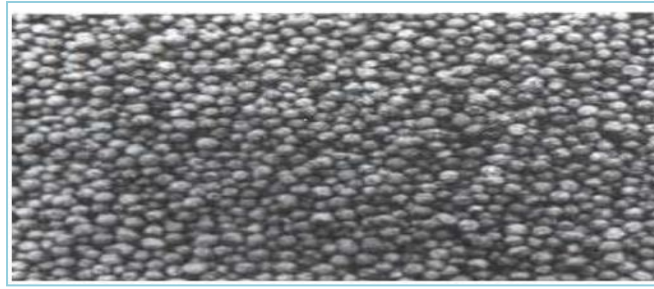


Figure 2. 5: Milieu poreux non consolidé[45].

2.2.2 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.

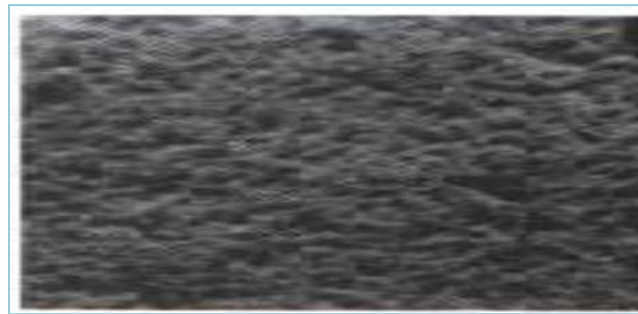


Figure 2. 6: Milieu poreux consolidé[45].

2.3 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.

2.3.1 Modèle de Darcy

Darcy [46] a proposé une loi expérimentale en 1856 pour expliquer le mouvement des fluides uniformes dans les matériaux poreux. Cette loi s'exprime comme suit :

$$\overline{\nabla P} = -\frac{\mu}{k} \vec{V} \quad [2- 7]$$

Où \vec{V} est la vitesse de filtration, μ 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 :

2.3.2 Modèle de Darcy-Brinkman

En 1947, Brinkman a développé la loi de Darcy[47] en incorporant une composante reflétant le paramètre de diffusion visqueuse dans l'équation de Stokes.

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

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

2.3.3 Modèle de Brinkman-Wooding

Wooding [47] 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.

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

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.

2.3.4 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 :

$$\overline{\nabla P} = -\frac{\mu}{k} \vec{V} + \frac{\rho \cdot F}{\sqrt{k}} |\vec{V}| \vec{V} \quad [2- 10]$$

Où F est la constante adimensionnelle de Forchheimer.

2.3.5 Modèle de Darcy-Brinkman-Forchheimer

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

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

2.3.6 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 [48]

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

Où k_e est calculé comme la moyenne volumique des conductivités thermiques du matériau de matrice poreuse et MCP, est donnée comme [49] :

$$k_e = (1 - \varepsilon)k_s + \varepsilon k_f \quad [2- 13]$$

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.

2.3.7 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 [51,52] dérivé d'abord par Vafai et Tien" puis modifié par Cheng et Hsu".[50]

$$\begin{aligned} \frac{\rho_f}{\varepsilon} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\rho_f}{\varepsilon^2} (\vec{V} \cdot \nabla u) &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu_f}{\varepsilon} (\nabla^2 u) \\ -A_m \frac{(1-\lambda)^2}{\lambda^3 + 0.001} u - \left(\frac{\mu_f}{K} + \frac{\rho_f C |u|}{\sqrt{K}} \right) u & \quad [2- 14] \\ \frac{\rho_f}{\varepsilon} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\rho_f}{\varepsilon^2} (\vec{V} \cdot \nabla v) &= -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\mu_f}{\varepsilon} (\nabla^2 v) \end{aligned}$$

$$-A_m \frac{(1-\lambda)^2}{\lambda^3 + 0.001} v - \left(\frac{\mu_f}{K} + \frac{\rho_f C |u|}{\sqrt{K}} \right) v - \rho_f g \beta \varepsilon (T - T_{ref}) \quad [2-15]$$

Sur le côté droit de l'équation de quantité de mouvement, les seconds termes appartiennent à la résistance visqueuse, et le troisième terme est l'équation de Kozeny-Carman, où A_m est supposé égal à $10^5 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{s}$ tel que recommander dans plusieurs études. Les quatrième et cinquième termes comptent de l'extension de la loi de Darcy pour expliquer les effets non-Darcy. En raison de la direction de l'accélération gravitationnelle dans la direction y négative, L'approximation de Boussinesq est ajoutée comme sixième terme par $\rho_f g \beta \varepsilon (T - T_{ref})$ [53].

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 [55] qui a été obtenue à partir d'expériences comme suit [54] :

$$K = 0.00073 d_p^2 (1 - \varepsilon)^{-0.224} \left(\frac{d_l}{d_p} \right)^{-1.11} \quad [2-16]$$

Le deuxième terme est un terme de perte inertielle, où C est déterminé comme [54]:

$$C = 0.00212 (1 - \varepsilon)^{-0.132} \left(\frac{d_l}{d_p} \right)^{-1.63} \quad [2-17]$$

Et d_l est le diamètre du ligament ou de la cellule donné comme [53]:

$$d_l = 1.18 d_p \sqrt{\frac{1-\varepsilon}{3\pi}} \left(\frac{1}{1 - e^{-(1-\varepsilon)/0.04}} \right) \quad [2-18]$$

Les caractéristiques du milieu poreux sont définies par trois paramètres dont le ε , ω 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 [53]:

$$d_p = 0.0254 (\text{m}) / \omega (\text{PPI}) \quad [2-15]$$

Ou PPI signifie partie par pouce.

Les équations d'énergie pour le solide et le fluide sont données comme [50]:

***Pour le MCP :**

$$\varepsilon \rho_f \left(C_f + L \frac{d\lambda}{dT_f} \right) \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f C_f (\vec{V} \cdot \nabla T_f) = K_{fe} \nabla^2 T_f - h_{sf} A_{sf} (T_f - T_s) \quad [2-16]$$

***Pour le milieu poreux :**

$$(1 - \varepsilon)\rho_s C_s \left(\frac{\partial T_s}{\partial t}\right) = K_{se} \nabla^2 T_s - h_{sf} A_{sf} (T_s - T_f) \quad [2- 17]$$

Dans l'équation de l'énergie, L est défini sur la base de la température du fluide, du solidus et du liquidus [56]:

$$\lambda = \frac{\Delta H}{L} \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{Si } T < T_{\text{solidus}} \\ 1 & \text{Si } T > T_{\text{liquidus}} \\ \frac{T - T_{\text{solidus}}}{T_{\text{liquidus}} - T_{\text{solidus}}} & \text{Si } T_{\text{solidus}} < T < T_{\text{liquidus}} \end{array} \right\} \quad [2- 22]$$

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

$$H = h + \Delta H \quad [2- 18]$$

Où h est défini comme :

$$H = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T C_p dt \quad [2- 24]$$

Et ΔH 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 [55, 57, 58]. 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[60] puis corrigé en 2011[59]. Dans ce modèle, la forme générale de la conductivité thermique effective est définie comme [60, 59]:

$$K_{\text{eff}} = \frac{1}{\sqrt{2}(R_A + R_B + R_C + R_D)} \quad [2- 25]$$

Où :

$$R_A = \frac{4\sigma}{(2e^2 + \pi\sigma(1-e))K_s + (4 - 2e^2 - \pi\sigma(1-e))K_f} \quad [2- 19]$$

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

$$R_C = \frac{\sqrt{2}-2e}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 K_s + (2-\sqrt{2}\pi\sigma^2)k_f} \quad [2-28]$$

$$R_D = \frac{2e}{e^2k_s + (4-e^2)k_f} \quad [2- 20]$$

Où $e = 0.339$

Et :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sqrt{2}\left(2 - \left(\frac{3\sqrt{2}}{4}\right)e^3 - 2\varepsilon\right)}{\pi(3 - 2\sqrt{2}e - e)}} \quad [2- 30]$$

Ensuite, la conductivité thermique effective du fluide et le solide est calculé à partir de l'équation [2- 21] comme :

$$k_{fe} = k_{eff}/k_s=0 \quad [2- 31]$$

$$k_{se} = k_{eff}/k_f=0 \quad [2- 32]$$

Coefficient de transfert thermique local [61]:

$$R_e = \rho_f \sqrt{u^2 + v^2} d_l / (\varepsilon \mu_f) \quad [2-33]$$

$$h_{sf} = \begin{cases} \frac{0.76R_e^{0.4} Pr^{0.37} k_{mcp}}{d_l} \text{ pour } 0 < R_e \leq 40 \\ \frac{0.52R_e^{0.5} Pr^{0.37} k_{mcp}}{d_l} \text{ pour } 40 < R_e \leq 1000 \\ \frac{0.26R_e^{0.6} Pr^{0.37} k_{mcp}}{d_l} \text{ pour } 1000 < R_e \leq 20000 \end{cases} \quad [2- 34]$$

Où :

A_{sf} est donné par [62]:

$$A_{sf} = \frac{3\pi d_l (1 - e^{-(1-\varepsilon)/0.04})}{0.59 d_p^2} \quad [2- 35]$$

2.4 Généralités sur les nanofluides

La nanotechnologie a permis d'acquérir des particules aussi petites qu'un nanomètre. Ce progrès a présenté la possibilité d'élever la conductivité thermique en suspendant ces minuscules particules dans un liquide de base.

En 1995, l'expression "nano-fluide" est née au Laboratoire national d'Argonne après la suggestion de Choi. Essentiellement, un nano-fluide est un mélange de nanoparticules et

d'un fluide de base, l'eau, l'huile ou l'éthylène glycol (EG) étant les fluides de base les plus courants [63].

2.4.1 Définition de nanofluide

Les nanofluides sont constitués d'un liquide de base dans lequel sont intégrées des suspensions de nanoparticules colloïdales. Ces nanoparticules, de tailles nanométriques, confèrent à la solution ses propriétés uniques.

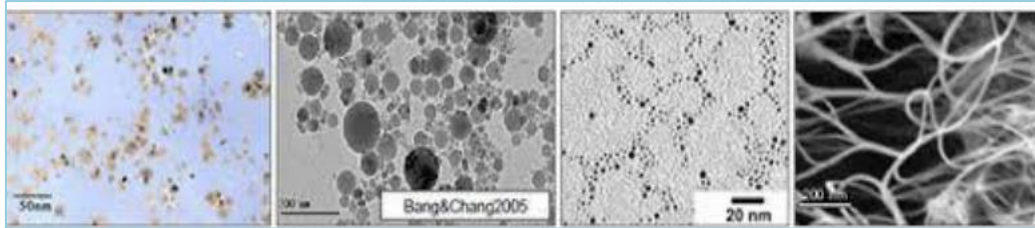


Figure 2. 7: Nanofluides vus au microscope électronique[64].

La gamme de nanoparticules utilisées dans la création de nanofluides est vaste et comprend une multitude d'options [64]:

- L'aluminium, Al et l'oxyde d'aluminium, Al₂O₃
- Le cuivre, Cu et l'oxyde de cuivre, CuO.
- L'or, Au.
- L'argent, Ag.
- Les nanotubes de carbone.
- Le dioxyde de titane, TiO₂.

Pour garantir la stabilité d'un nano fluide et éviter toute agrégation, sélectionner le bon liquide de base est crucial. Le choix du fluide dépend du type de nanoparticules utilisées, et les solvants couramment utilisés comprennent :

- L'eau,
- L'éthylène et le propylène glycol,
- Les huiles et autres lubrifiants,

- Le toluène,
- Les bio-fluides

2.4.2 Types des nanoparticules

Quatre catégories distinctes existent pour la classification des nanomatériaux utilisés dans la production de nanofluides.

- Certains exemples de nanoparticules métalliques comprennent l'aluminium (Al), le cuivre (Cu), le fer (Fe) et l'argent (Ag).
- Nanoparticules d'oxyde de céramique, y compris, mais sans s'y limiter, le dioxyde d'aluminium (Al_2O_3), l'oxyde de cuivre (CuO), le dioxyde de titane (TiO_2), l'oxyde de zinc (ZnO) et le dioxyde de silicium (SiO_2).
- Les nanoparticules métalliques constituées de carbure de silicium (SiC) sont appelées nanoparticules de carbure métallique.
- Nanoparticules non métalliques telles que le graphite C et les nanotubes de carbon(CNT).

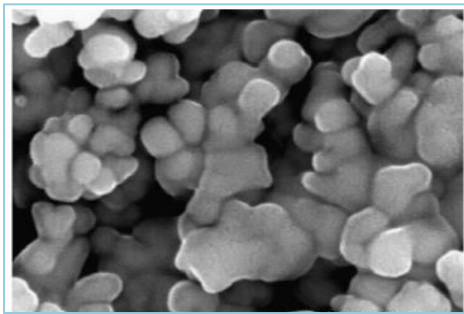


Figure 2. 8: Nanoparticule (Ag) [64]

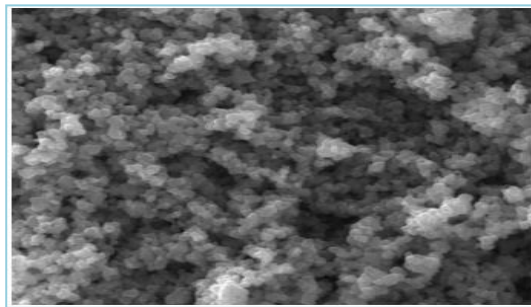


Figure 2. 9: Nanoparticule (TiO_2) [64]

Les nanoparticules les plus largement reconnues prennent la forme de :

- Sphérique,
- Cylindrique,
- Agglomérat.

Dans un sens plus large, le domaine des fractions volumiques examiné comprend :

- 0.1 – 1%
- 1 – 10%
- > 10%

Tableau 2. 1: Les propriétés thermo-physiques de différents matériaux (Mouassi Ammar, 2012) [64]:

	Nanoparticules et fluide de base	K (W/m.k)	$\rho(kg/m^3)$	Cp (J/kg.k)	$\mu(Pa.s)$
Métallique (solides)	Cu	400	8954	383	
	Fe	80.2	7870	447	
	Ni	90.7	8900	444	
	Au	317	19.300	129	
	Ag	42	10.5	235	
Oxyde Métallique (solides)	SiO ₂	1.38	2220	745	
	TiO ₂	8.4	4157	710	
	AL ₂ O ₃	36	3970	765	
	CuO	69	6350	535	
	SiC	490	3160	675	
Liquide non Métalliques	L'eau	0.600	998.2	4183	0.0001003
	Ethylène-glycol (EG)	0.252	1111.4	2349	0.0157

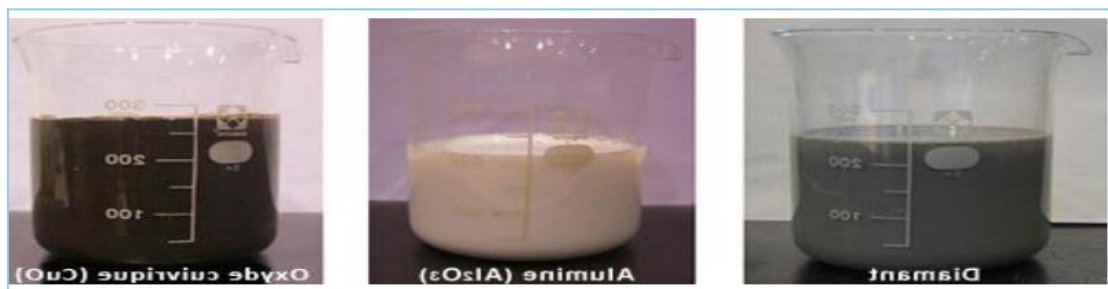


Figure 2. 10: Exemples de nanofluides aqueux et opaques avec seulement 1 % de nanoparticules de diverses natures [65].

2.4.3 Préparation des nanofluides

L'aspect crucial réside dans la production de matériaux finement calibrés et calibrés avec précision. Il n'est pas conseillé d'essayer de les créer à la maison par abrasion du cuivre, par exemple, car le résultat ne serait que des particules micrométriques qui pourraient entraver le fonctionnement du circuit. (Ouadah Sabrina et al.2018).

Il y a deux méthodes principales pour obtenir un nano fluides

En une étape : vaporisation d'un matériau solide sous vide, puis condensation directe de sa vapeur dans le liquide.

En deux étapes : d'abord la fabrication d'une nano poudre sèche, puis mélange et dispersion de celle-ci dans le liquide.

La production de nanoparticules repose sur des processus physiques ou chimiques, qui font tous deux l'objet d'importants efforts de recherche visant à réduire les coûts et à atteindre la granulométrie souhaitée. Malgré ces efforts, une mise en œuvre réussie reste difficile, entraînant souvent des coûts de production élevés. De plus, certaines approches ne sont pas bien adaptées à la production de masse en raison de limitations inhérentes, en particulier les méthodes en une étape. (Ouadah Sabrina et al.2018 et khentoul moussa, 2016).

2.4.4 Les propriétés thermo physiques des nanofluides

Les nanofluides ont des propriétés physiques importantes, qui diffèrent selon les nanoparticules utilisées et le fluide de base. Ses caractéristiques sont :

- ❖ La fraction volumique (φ).
- ❖ Conductivité thermique (K).
- ❖ Viscosité dynamique (μ).
- ❖ La masse volumique (ρ).
- ❖ La chaleur massique (Cp).
- ❖ Coefficient d'expansion volumique (β).

2.4.4.1 La fraction volumique (φ)

$$\varphi = \frac{V_S}{V_T} = \frac{V_S}{V_S + V_F} \quad [2- 36]$$

V_S : Volume de solide (nanoparticules).

V_T : Volume totale (nanoparticules + fluide de base).

2.4.4.2 Conductivité thermique (λ)

La conductivité thermique est une propriété très importante. D'autant plus que cela joue un rôle important dans le transfert de chaleur. Conductivité thermique de l'efficacité de transfert de chaleur montre clairement. La conductivité thermique est définie comme une variation de température et une conductivité thermique différente due à la fracture solide et aux nanofluides, en fonction des nanoparticules. La conductivité thermique est calculée selon deux méthodes suivantes [66]:

2.4.4.2.1 Modèle de Maxwell

Il a supposé que les particules sont séparées d'une distance suffisante conduisant à l'absence d'interaction mutuelle entre elles, pas de contact entre les particules [67].

$$\frac{K_{nf}}{K_f} = \frac{K_S + 2K_f - 2\varphi(K_f - K_S)}{K_S + 2K_f + \varphi(K_f - K_S)} \quad [2- 22]$$

K_{nf} : La conductivité thermique du nanofluide.

K_f : La conductivité thermique du fluide de base.

K_S : La conductivité thermique de la particule solide.

2.4.4.3 La viscosité dynamique (μ)

La viscosité relative est le rapport de la viscosité du nano-fluide (μ_{nf}) sur celle du fluide de base (μ_f). On a plusieurs modèles de la viscosité dynamique d'un nano-fluide comme :

2.4.4.3.1 Modèle d'Einstein [68]

Pour un mélange contenant des suspensions diluées de particules fines sphériques et rigides est la suivante :

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 2.5\varphi) \quad [2- 23]$$

μ_f : La viscosité dynamique du nano fluide.

μ_f : La viscosité dynamique du fluide de base.

φ : La fraction volumique des nanoparticules.

2.4.4.3.2 Modèle de Brinkman [69]

A étendu la formule d'Einstein pour couvrir une large plage de concentrations volumiques.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\varphi)^{2.5}} \quad [2- 24]$$

2.4.4.3.3 Modèle de Batchelor [12]

A montré que la viscosité n'est pas seulement une fonction linéaire, comme l'indique la relation d'Einstein mais une fonction non linéaire de φ .

$$\mu_{nf} = \mu_f(6.5\varphi^2 + 2.5\varphi + 1) \quad [2-40]$$

D'autres relations ont été proposées dans la littérature, limitées à des applications bien précises comme **Maiga et al** [70], à partir de résultats de mesures ont proposé la corrélation suivante :

$$\mu_{nf} = \mu_f(123\varphi^2 + 7.3\varphi + 1) \quad [2- 41]$$

Pack and Cho [71] ont proposé, quant à eux une corrélation pour les nanoparticules Al_2O_3 dispersés dans l'eau donnée par :

$$\mu_{nf} = \mu_f(533.9\varphi^2 + 39.11\varphi + 1) \quad [2- 42]$$

Donc pour notre travail, on a utilisé le modèle de Brinkman qui est le plus utilisé par les chercheurs.

2.4.4.4 La masse volumique (ρ)

La masse volumique des nano fluides est proportionnelle à la fraction volumique en particules et augmente avec l'ajout des nanoparticules. Sont souvent calculés à partir de la loi du mélange, et sont représentés dans la relation suivante [72] :

- La masse volumique de mélange :

$$\rho_{nf} = \frac{m_f+m_s}{v_f+v_s} = \frac{\rho_f v_f + \rho_s v_s}{v_f+v_s} \quad [2- 43]$$

- La masse volumique d'un nano fluide hybride pour une température de référence donnée est calculé par [72]:

$$\rho_{hnf} = (1 - \varphi) \cdot \rho_f + \varphi_1 \cdot \rho_{np1} + \varphi_2 \cdot \rho_{np2} \quad [2- 44]$$

Avec : $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$

ρ_{hnf} : La masse volumique du nano fluide hybride.

ρ_f : La masse volumique du fluide de base.

ρ_{np1} : La masse volumique des nanoparticules 1.

ρ_{np2} : La masse volumique des nanoparticules 2.

φ_1 : La fraction volumique des nanoparticules 1.

φ_2 : La fraction volumique des nanoparticules 2.

2.4.4.5 La chaleur spécifique (Cp)

Pour la détermination de la chaleur spécifique d'un nano fluide hybride il y'a un modèle de A.Takapi et Salehi [72]:

$$\rho_{hnf} \cdot cp_{hnf} = (\varphi_{np1} \rho_{np1} cp_{np1}) + (\varphi_{np2} \rho_{np2} cp_{np2}) + (1 - \varphi) \rho_f cp_f \quad [2- 25]$$

ρ_{hnf} : La masse volumique de nano-fluide hybride.

cp_{hnf} : La chaleur spécifique du nano-fluide hybride.

ρ_f : La masse volumique du fluide de base.

cp_f : La chaleur spécifique du fluide de base.

D'après (Khanafer et al ,2003) :

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\varphi c_p)_f + \varphi(\rho c_p)_s \quad [2- 26]$$

$(\rho c_p)_{nf}$, $(\varphi c_p)_f$, $(\rho c_p)_s$ Désignent respectivement les chaleurs spécifiques du nanofluide, du fluide de base et des nanoparticules

2.4.4.6 Le coefficient d'expansion volumique (β)

Ce paramètre est calculé à partir de cette équation suivante :

$$\beta_{nf} = ((1 - \varphi)\rho_f\beta_f + \varphi \cdot \rho_s\beta_s)/\rho_{nf} \quad [2-47]$$

β_{nf} : Le coefficient de dilatabilité du nano fluide.

β_f : Le coefficient de dilatabilité du fluide de base.

β_s : Le coefficient de dilatabilité des nanoparticules [73].

2.4.5 Domaine d'application

Les fluides infusés de nanoparticules, autrement connus sous le nom de nanofluides, présentent des améliorations remarquables de leurs propriétés avec l'ajout de seulement de petites quantités de nanoparticules. De nombreuses publications ont porté sur les propriétés des nanofluides, soulignant leur potentiel pour améliorer le transfert de chaleur dans divers domaines tels que les applications industrielles, les transports, l'électronique, les réacteurs nucléaires, la biomédecine et l'alimentation. De plus, les nanofluides ont été identifiés comme des fluides intelligents, capables de manipuler le transfert de chaleur en fonction d'exigences spécifiques [74].

2.4.5.1 Applications de refroidissement industriel

En passant de l'eau de refroidissement et de chauffage conventionnelle aux nanofluides, l'industrie américaine pourrait économiser 1 000 milliards de Btu d'énergie. Pendant ce temps, l'adoption de nano-fluides dans les cycles de refroidissement en boucle fermée de l'industrie électrique américaine pourrait préserver 10 000 à 30 000 milliards de Btu par an, suffisamment pour satisfaire les besoins énergétiques de 50 000 à 150 000 foyers. De plus, si des nano-fluides étaient utilisés, la réduction annuelle des émissions serait substantielle : environ 5,6 millions de tonnes métriques de dioxyde de carbone, 8 600 tonnes d'oxydes d'azote et 21 000 tonnes métriques de dioxyde de soufre.

Pour les usines de pneus de Michelin Amérique du Nord, le refroidissement du caoutchouc pendant le traitement est resté un défi important, limitant l'efficacité de nombreux processus industriels [74].

2.4.5.2 Smart Fluides

L'accent mis par l'ère actuelle sur la conservation de l'énergie a attiré l'attention sur nos sources d'énergie propres limitées et sur l'utilisation omniprésente d'équipements alimentés par batterie tels que les ordinateurs portables et les téléphones portables. En conséquence, la gestion intelligente des ressources technologiques est devenue essentielle. Les nanofluides sont un excellent exemple de fluides intelligents qui peuvent remplir efficacement ce rôle[74].

2.4.5.3 Réacteurs nucléaires

Des chercheurs du MIT (Massachusetts Institute of Technology) ont récemment étudié l'utilisation de nano-fluides pour améliorer les performances des centrales nucléaires à réacteur à eau sous pression.

L'étude a évalué la faisabilité de l'utilisation de nano-fluides dans les systèmes de refroidissement nucléaires pour augmenter leur efficacité. Les utilisations potentielles de cette technologie sont nombreuses, allant du fluide de refroidissement primaire des réacteurs à eau sous pression (REP) aux cibles d'accélérateur, aux déflecteurs de plasma, etc.

Le plus grand défi est le flux de chaleur critique qui se produit lorsque des bulles de vapeur se forment et recouvrent les barres de combustible, limitant la génération de vapeur. Cependant, en remplaçant l'eau par des nano-fluides contenant des nanoparticules comme l'alumine, une couche de vapeur est empêchée de se former autour de la tige. Il en résulte une augmentation du CHF, car les nanoparticules repoussent les bulles nouvellement formées, permettant un transfert de chaleur plus efficace [74].

2.4.6 Les avantages des nanofluides

- Une vaste zone d'échange, facilitant le transfert de chaleur entre les fluides et les particules.
- Les particules présentent un mouvement brownien dominant, indiquant une dispersion et une stabilité élevées.
- Pour obtenir une amélioration comparable du transfert de chaleur, une réduction par rapport au liquide pur est nécessaire.
- En minimisant l'accumulation de sédiments, ce système favorise la réduction de taille par rapport à la méthode traditionnelle.

- Des concentrations de particules variables peuvent donner des propriétés ajustables pour différentes applications, telles que la conductivité thermique et la mouillabilité de surface.

2.4.7 Les inconvénients des nanofluides

- La disparité des résultats entre les différents chercheurs.
- Compréhension insuffisante des processus théoriques qui entraînent des modifications de la propriété.
- La représentation des suspensions manque de profondeur et de complexité.
- Assurer la stabilité de la dispersion des nanoparticules.
- L'augmentation de la perte de charge se traduit par une augmentation de la puissance de pompage.
- Une viscosité plus élevée est généralement associée à une chaleur spécifique plus faible.
- Les nanofluides ont un coût exorbitant.
- Défis rencontrés lors de la procédure de fabrication.

2.5 Progrès dans l'amélioration de la conductivité thermique des MCPs

L'inconvénient de l'utilisation des MCP à des fins de stockage, notamment pour la conversion solide-liquide, est leur faible conductivité thermique. Pour décharger avec succès un matériau à changement de phase, la chaleur libérée lors de la solidification doit être transportée de la frontière solide-liquide à travers la couche solide nouvellement formée entourant la surface de transfert vers le fluide caloporteur. Malheureusement, dans de nombreuses applications, le coefficient de transfert global est limité par la faible conductivité thermique du MCP à la décharge - un facteur qui détermine principalement la conception du matériau. Généralement, les MCP ont une faible conductivité thermique d'environ 0,5 W/(mK), ce qui entrave l'échange de chaleur entre le matériau et le fluide. Par conséquent, pour créer un matériau de stockage efficace et à un prix raisonnable, des techniques permettant d'améliorer ses performances thermiques doivent être développées. Plusieurs stratégies ont été suggérées dans la littérature existante pour résoudre ce problème problématique.

Il est donc faisable [75] :

- L'amélioration de la conductivité thermique ou du coefficient d'échange global d'un MCP dans le réservoir nécessite une action.
- La mise en œuvre de technologies innovantes pour initier la convection forcée du MCP autour des surfaces de transfert améliore le coefficient d'échange global.
- L'intégration du MCP dans des capsules ou un échangeur de chaleur augmente la surface d'échange et améliore le transfert de chaleur.

Agir sur le MCP pour améliorer sa conductivité thermique

Il existe deux manières d'agir sur le MCP :

2.5.1 Amélioration de la conductivité thermique globale

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.

2.5.1.1 La mousse métallique

Une mousse métallique est une structure cellulaire constituée d'un solide en métal (souvent en aluminium) remplis de gaz avec des pores comprenant une grande partie du volume. Les pores peuvent être scellés (à cellules fermées) ou interconnecté (mousse à cellules ouvertes) [76].

Mehdi et al ont étudié l'optimisation de solidification de plusieurs MCP, par l'utilisation d'une cascade de mousse en métal et des nano particules dans un échangeur tubes et calandre dans un système de stockage d'énergie. Ils arrivent que la mousse métallique peut accélère le transfert thermique de nombreuse fois et réduit le temps de solidification complète du MCP surtout si elle couplée avec des nanoparticules [11].

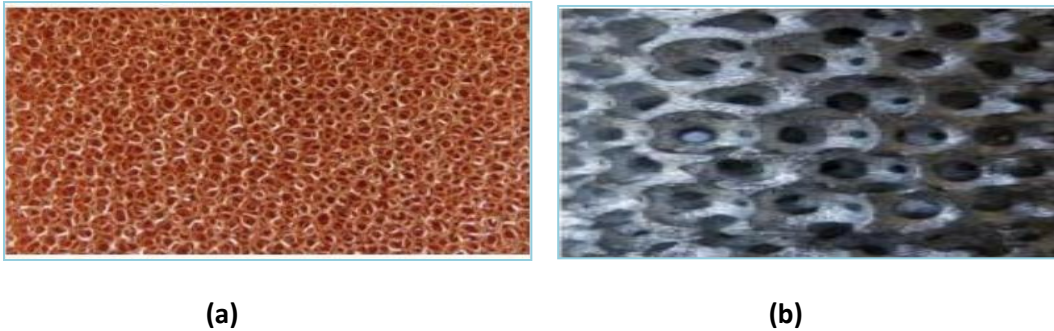


Figure 2. 11: (a) Mousses métalliques stochastiques en cuivre, (b) Régulière en aluminium[11].

2.5.1.2 Dispersion de particules dans le MCP

La conductivité thermique des MCP peut être augmentée considérablement par la dispersion des nanoparticules dans un fluide appelé nano-fluide cette technique est aujourd'hui parmi les sujets d'étude les plus importants. Les nanoparticules les plus utilisées : l'oxyde d'aluminium, Al_2O_3 , l'aluminium, Al, le cuivre, Cu et l'oxyde de cuivre CuO .

Les liquides de base les plus utilisés sont: l'eau, l'éthylène-glycol, EG, les huiles et le Toluène [27].

2.5.2 Augmentation du flux transféré par utilisation de MCP multiples

Une autre technique pour améliorer les performances d'un stockage latent consiste à associer plusieurs MCP qui ont des températures de fusion différentes. Si un seul MCP est utilisé, cette différence de température diminue dans le sens de l'écoulement du fluide caloporteur, car le fluide caloporteur refroidit à mesure que la chaleur est transférée lors d'une charge, ce qui provoque la diminution du flux échangé. Si, au contraire, plusieurs MCP sont placés dans l'unité de stockage dans l'ordre décroissant des températures de fusion, alors la différence de température sera quasi-constante au cours d'une fusion, et ce, même si le fluide caloporteur refroidit le long de l'échangeur. Par conséquent, le flux de chaleur entre le fluide caloporteur et le MCP est presque constant et les performances du système également. Durant une décharge, le fluide caloporteur circule dans le sens inverse et se réchauffe le long de l'échangeur à gradient de température quasi-constant également.

L'utilisation de MCP multiples dans un échangeur tube-calandre est illustrée sur la Figure suivante [29]:

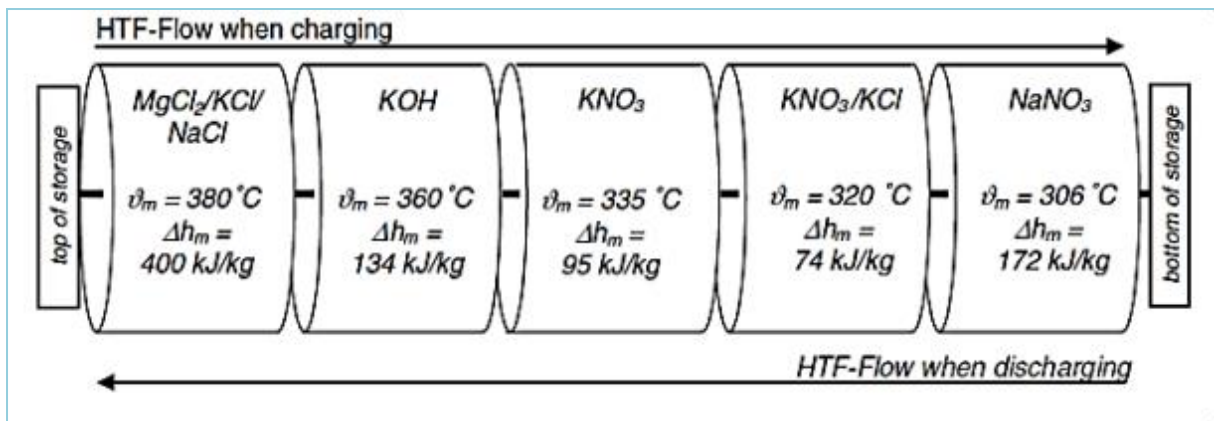


Figure 2. 12: Unité de stockage avec MCP multiples : exemple de combinaison utilisée par F. Dinter [16].

CHAPITRE

3

Recherche bibliographique

Introduction

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 et nano-fluide,

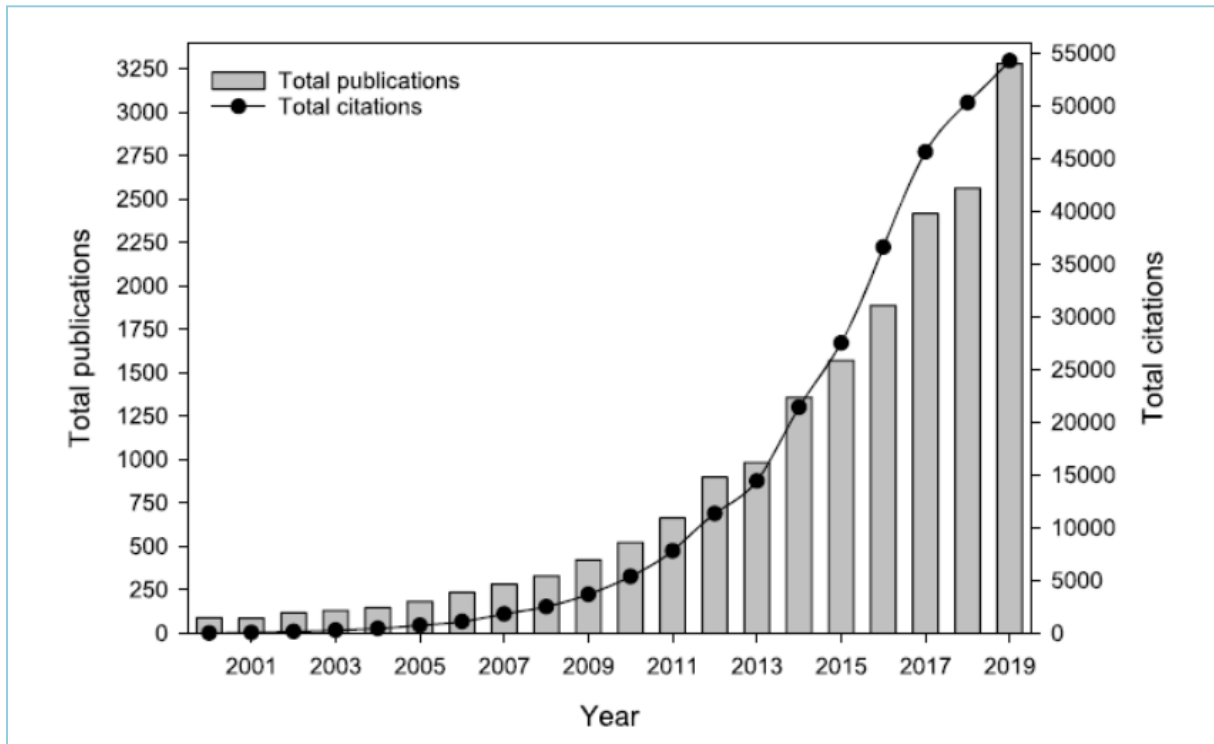


Figure 3. 1: Evolution du nombre des publications internationales et des citations des systèmes du stockage par chaleur latente de 2000 à 2019 [49].

Parmi ces études on citera :

3.1 Quelques travaux sur les MCPs uniquement

F. BENMOUSSA et A. BENZAOU, H. BENMOUSSA (2017) [77] Dans le cadre de l'étude du comportement thermique d'une unité de stockage thermique par chaleur latente constituée de deux tubes concentriques, utilise un matériau à changement de phase nommé MCP, un modèle mathématique basé sur la formulation d'enthalpie est développé, afin d'étudier l'effet de la vitesse d'entrée du fluide caloporteur HTF sur l'évolution de la température et la fraction de fusion du MCP, ainsi que l'évolution de l'énergie total stockée. Les résultats montrent que la variation de la température de MCP passe par trois périodes : période avec changement rapide, période sans changement et période avec changement lent.

Le processus de fusion et de solidification peut être divisé en trois périodes, selon la variation de la fraction de fusion : le premier est la période de stockage/déstockage par chaleur sensible, la deuxième est la période de stockage/déstockage par chaleur latente, la troisième est la période de stockage/déstockage par chaleur sensible. L'augmentation de la vitesse d'entrée du fluide caloporteur a lentement augmenté la variation de la température et la fraction de fusion. La quantité d'énergie stockée pour différente vitesse d'entrée du fluide HTF est la même, sauf le temps nécessaire pour compléter le processus de stockage et déstockage se change.

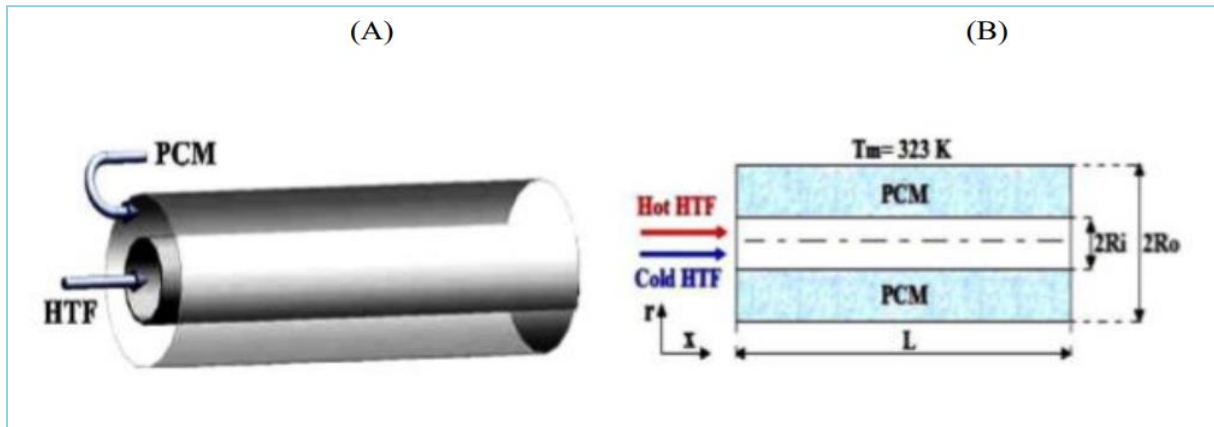


Figure 3. 2: (A) Schéma de l'unité de stockage d'énergie thermique latente à tube, (B) modèle physique pour calculs numériques [78].

M.L. BENLEKKAM et D. NEHARI, N. CHERIET (2018) [79] leur travail représente une étude numérique des performances thermiques d'une unité de stockage thermique par chaleur latente. Cette dernière est composée par deux tubes concentriques ou l'espace annulaire est rempli par un matériau à changement de phase (MCP), tandis qu'un fluide caloporteur (eau) s'écoule dans le tube central. Les calculs sont basés sur une méthode numérique itérative qui adopte une formulation d'enthalpie pour la modélisation du changement de phase solide-liquide. Par la suite, ce modèle a été validé avec résultats expérimentaux et numériques ou une bonne concordance a été obtenue pour les deux cycles de charge et décharge. Une étude paramétrique a été conduit dont le but est de voir l'influence de plusieurs paramètres : la température d'entrée de l'eau (88°C , 75°C et 65°C) et son débit massique (0.072 , 0.8 et 0.1 kg/mn). Les résultats obtenus montrent que la variation de la température d'entrée du fluide caloporteur a grand effet sur les performances thermiques de l'unité de stockage par rapport la variation du débit.

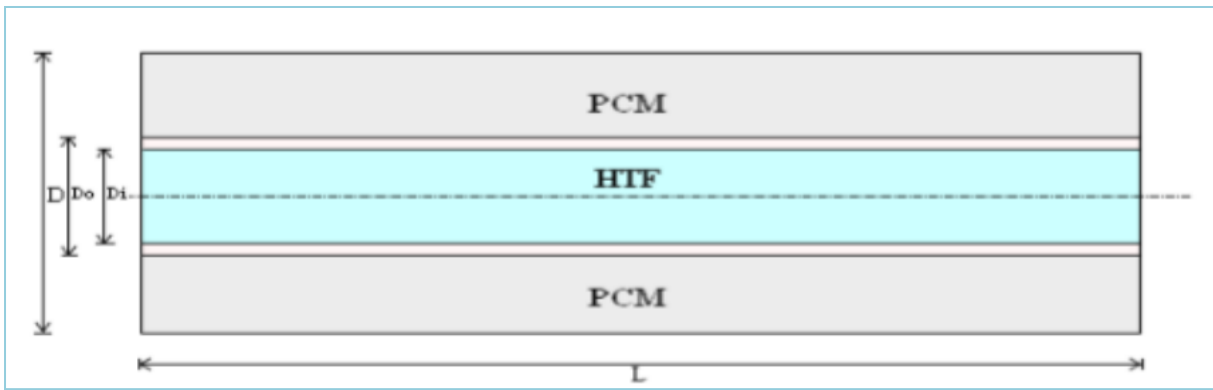


Figure 3. 3: Schéma de principe de l'unité de stockage de chaleur latente [80].

AHMED H.N. et AL. MUDHAFAR (2018) [81] ont réalisé un nouvel échangeur de chaleur à tubes palmés modifiés (MWTHX) qui a été étudié numériquement, pour améliorer les performances thermiques du système de stockage d'énergie thermique (TES) à matériau à changement de phase (MCP). Cet échangeur a été comparé par deux types d'échangeurs de chaleur comme la (figure.1.6) indique, l'échangeur de chaleur à tubes palmés (WTHX) et l'échangeur de chaleur à triple tube(TTHX). Des modèles numériques à deux dimensions ont été développés. Les modèles nous ont permis de simuler les mécanismes de transfert de chaleur par conduction et convection naturelle. Le processus de solidification (décharge) a été surveillé pendant la simulation. Les résultats ont montré que le processus de solidification du MCP accélère de 41 %.

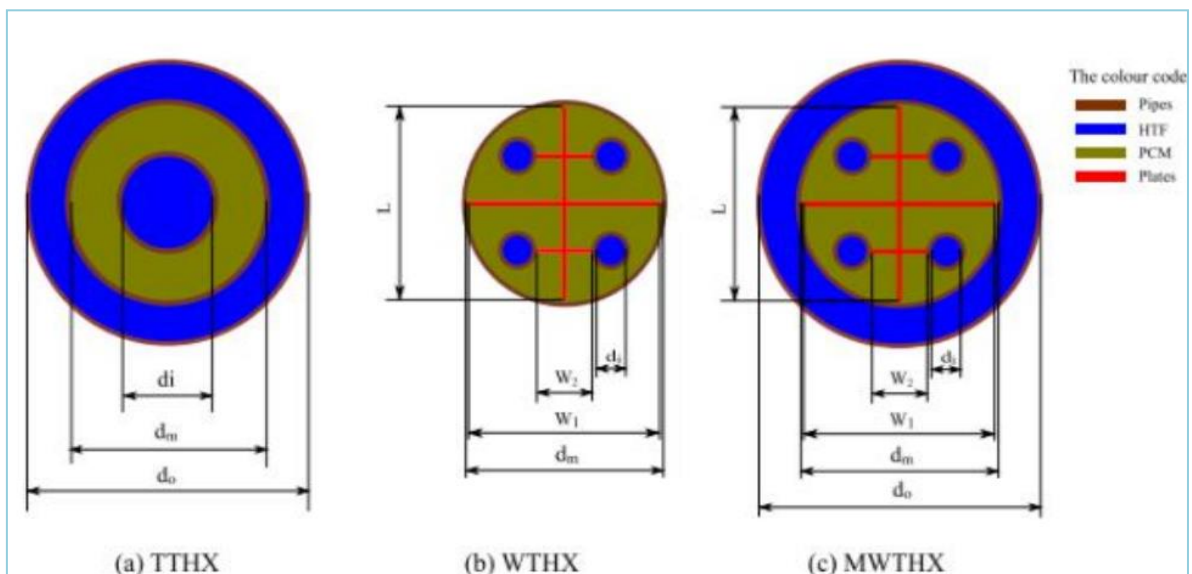


Figure 3. 4: (a) échangeur de chaleur à triple tube (b) échangeur de chaleur à tubes palmés (c) échangeur de chaleur à tubes palmés modifiés [81].

Ainsi que **Ahmed.h et al** [35] ont ensuite comparés les résultats de simulation obtenus à trois types d'échangeurs. Ceux-ci comprenaient : un échangeur de chaleur à tubes et calandre, un échangeur de chaleur à triple tubes (a) et un échangeur de chaleur à une couche d'isolation (b), échangeur à tubes multiples(c) et échangeur de chaleur à tubes palmés(d), sont montés sur la (figure I.6). Dans le model (a) le fluide caloporteur circule à l'intérieur et l'extérieur de tube et pour (b) le fluide s'écoule à l'intérieur de tube et l'échangeur est parfaitement isolé. Des plaques supplémentaires ont été utilisées dans le model (d) pour augmenter la surface de transfert chaleur afin d'améliorer les performances thermiques du MCP et réduire le temps de charge et de décharge du système de stockage d'énergie thermique.

Les résultats obtenus montrent que Le MCP a complètement fondu au bout de 3 heures pour le model (d). Pendant le même intervalle de temps de 3 heures seulement environ 10 %, 30 % et 60 % de MCP est fondu lors de l'utilisation de (b), (c) et (a) respectivement.

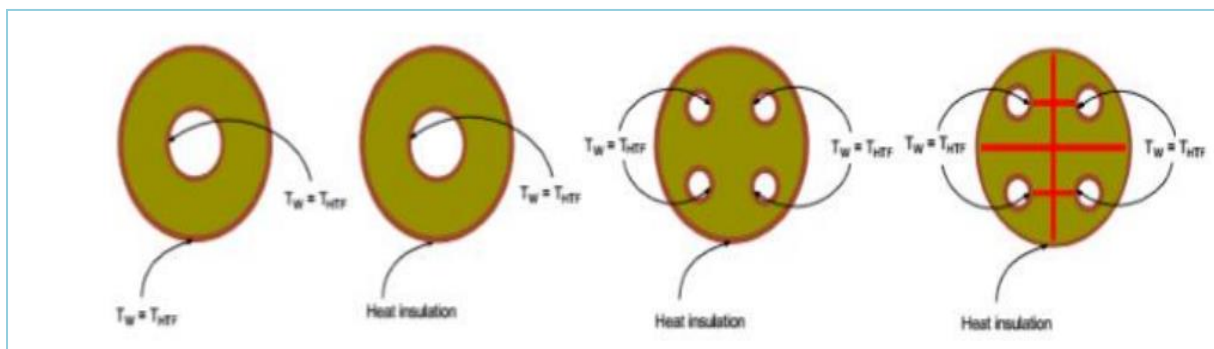


Figure 3. 5: Domaines de calcul avec les conditions aux limites indiquées [81].

3.2 Quelques travaux sur les MCPs/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 employée par **Mallow et al** [82] et **Righetti et al** [83]. 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, les chercheurs ont utilisé une deuxième méthode de préparation, connue sous le nom 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** [78,

80], **Zhang et al** [84] et **Jin et al** [85] 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 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. [78,80]

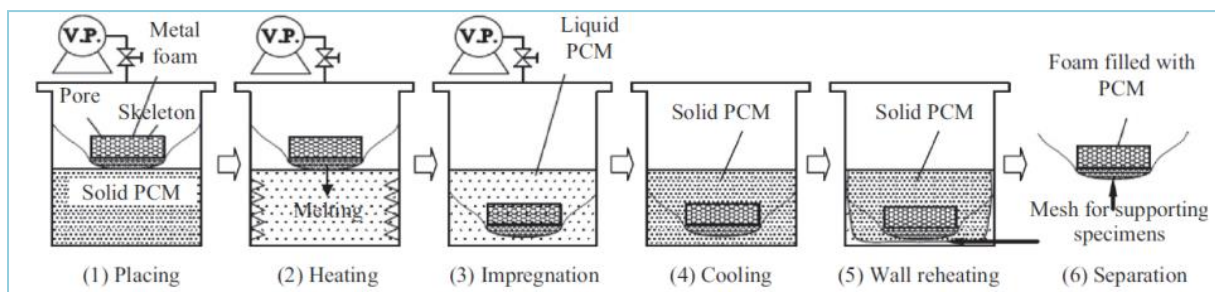


Figure 3. 6: Protocole de préparation des composites mousses métalliques /MCP [78].

Dans une étude menée par **Li et al.** [86], 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 **Zheng et al.** [87], une comparaison a été faite entre la fusion de cire de paraffine ($T_s-L=48,4^\circ\text{C}$) et la fusion de paraffine imprégnée dans une mousse de cuivre (porosité $\varepsilon = 95\%$, diamètre de pores $d_p=5$ PPI). Les résultats ont montré que le temps de fusion du composite mousse de cuivre/paraffine était 20,5 % plus rapide que celui de la paraffine. Cela indiquait que la conductivité thermique du matériau composite était

significativement plus élevée que celle de la paraffine, ce qui se traduisait par un meilleur transfert de chaleur lors de la fusion. De plus, l'étude a démontré que l'utilisation de mousse de cuivre entraînait une distribution de température plus uniforme dans le MCP étudié.

Dans une étude de **Yao et al.** [88], le processus de solidification de la paraffine RT27 avec une température de solidification de 26°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.

3.3 Quelques travaux sur les MCPs/Nanofluides

Nabeel et al. (2013) [89] ont étudié le processus de charge du MCP nano-fluide dans un échangeur de chaleur dans des conditions de flux de chaleur constant. Ils ont rapporté que le transfert de chaleur est amélioré en ajoutant des nanoparticules de CuO dans le MCP, et que les performances thermiques et la capacité de stockage d'énergie du MCP se révèlent plus importantes à une fraction volumique de nanoparticules inférieure.

Majid et al. (2019) [90] ont rapporté que les concentrations de nanoparticules jouent un rôle vital dans l'amélioration du transfert de chaleur et ont recommandé 4 % de nanoparticules de Cu. En utilisant les mêmes nanoparticules (Cu), **Nie et al.** (2021) ont analysé numériquement les caractéristiques de fusion du MCP dans un système à coque verticale. Leurs résultats ont montré que l'ajout de nanoparticules de Cu dans le MCP peut permettre d'obtenir de meilleures performances de fusion.

Jasim et al. (2020) [91] ont avancé que l'application de nanoparticules d'Al₂O₃ améliore efficacement le transfert de chaleur de STHE avec plusieurs MCP, et le taux de changement de phase amélioré en 1996 pour trois MCP, 11 % pour deux MCP et 9,5 % pour un MCP.

Nie et al. (2021) [92] ont analysé numériquement les caractéristiques de fusion du MCP dans un système à coque verticale. Leurs résultats ont montré que l'ajout de nanoparticules de Cu dans le MCP peut permettre d'obtenir de meilleures performances de fusion.

Wu et Al. (2022) [93], 2022 Bien que des recherches antérieures aient étudié le transfert de chaleur et les performances thermodynamiques pour l'incorporation de nanoparticules hybrides dans le MCP, elles se sont concentrées sur le seul aspect de

l'amélioration du transfert de chaleur ou des caractéristiques de stockage thermique, aucun des travaux n'a tenté d'analyser de manière exhaustive l'amélioration synergique de la chaleur.

Les caractéristiques de transfert et de stockage thermique d'un échangeur à calandre à nanoparticules hybrides, tandis que le manque d'aspect synergique peut entraîner un point de performance thermique préjudiciable de STHE dans les applications d'utilisation de l'énergie solaire. À cet égard, le but de la présente étude est d'étudier les caractéristiques de transfert de chaleur et de stockage thermique de STHE avec des nanoparticules hybrides.

Les impacts des types de combinaison de nanoparticules et des rapports de volume de nanoparticules sur le transfert de chaleur et les caractéristiques de stockage thermique de STHE sont étudiés de manière complète, y compris le champ de température et d'écoulement, la fraction de fusion, le stockage d'énergie, la densité de stockage d'énergie et le taux de stockage d'énergie.

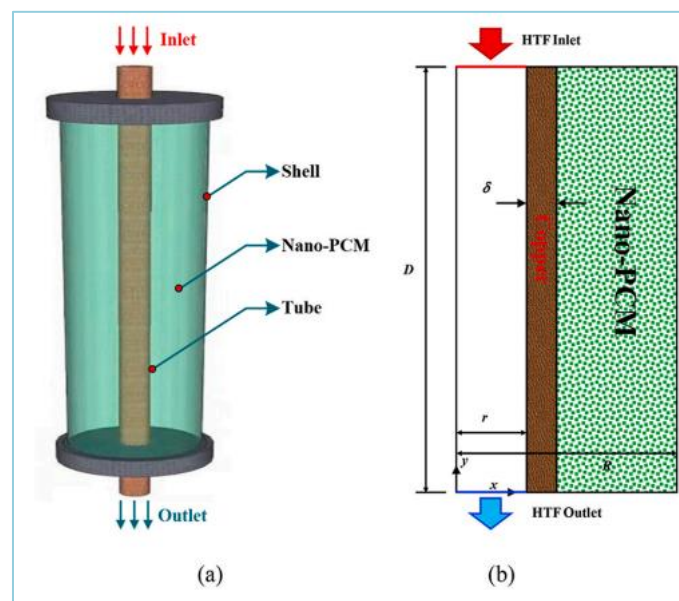


Figure 3. 7: Modèle du STHE avec Nano-PCM (a : dispositif de stockage d'énergie thermique , b) STHE[93].

Khodadadi et Hosseinizadeh [94], ont amélioré des performances des matériaux à changement de phase (MCP) à travers la dispersion de nanoparticules. Les matériaux à changement de phase renforcé par nanoparticules (NEPCM) présentent une conductivité thermique élevée par rapport au MCP de base. Le problème consiste à étudier la solidification dans une cavité carrée différentiellement chauffée qui contient un NEPCM (eau, plus nanoparticules de cuivre). En raison de l'augmentation de la conductivité thermique et également l'abaissement de la chaleur latente de fusion.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons passé en revue les différentes études menées dans le domaine. Où la recherche bibliographique a clarifié l'importance d'ajouter des mousses métalliques et des nanoparticules au MCP en vue d'améliorer le stockage thermique.

CHAPITRE

4

—

Modélisation mathématique

Introduction

À l'époque contemporaine, le monde connaît des progrès rapides qui sont spécifiquement conformes au développement scientifique et de la recherche dans les universités et les instituts d'auteurs renommés du monde entier. Cependant, certains domaines de recherche nécessitent une application pratique pour aborder efficacement leurs problèmes respectifs. Cela nécessite la réalisation d'expériences qui doivent être menées dans des conditions opératoires précises et avec des matériaux spécifiques. Malheureusement, cela peut être une entreprise coûteuse et peut ne pas toujours être réalisable.

Heureusement, la technologie moderne est dotée de nombreux avantages tels que la simulation numérique. Cela nous permet d'économiser sur les dépenses et le temps associés à l'expérience pratique, tout en nous permettant simultanément de nous attaquer à des problèmes plus complexes. Le processus de simulation informatique ou numérique implique l'exécution d'un logiciel ou d'un programme informatique sur un réseau ou un ordinateur. Son but est de simuler un phénomène physique très complexe et réel, comme le mouvement d'un corps tombant sur un support souple.

Les simulations numériques scientifiques reposent sur la mise en œuvre de modèles théoriques qui utilisent souvent quelques techniques comme la technique des éléments finis, les volumes finis pour résoudre les problèmes posés.

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

4.1 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 [95].

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 [95].

4.2 Définition du programme Gambit

Le logiciel Gambit est un préprocesseur qui fonctionne comme un mailleur 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 [96]. Ce mailleur 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 [97]. 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 [79].

4.3 Modèle physique et Formulation mathématique

4.3.1 Modèle physique

Le schéma du domaine physique étudié est illustré sur la figure (4.1). 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/m².

Nous avons étudié 03 cas :

- Le MCP unique.
- Le MCP unique avec une mousse : de cuivre, d'aluminium et de Nickel.
- Le Nano-MCP (particule de cuivre).

Nous utilisons un maillage : Quadratique uniforme a (400×200), le maillage du domaine est représenté sur la figure (4.2).

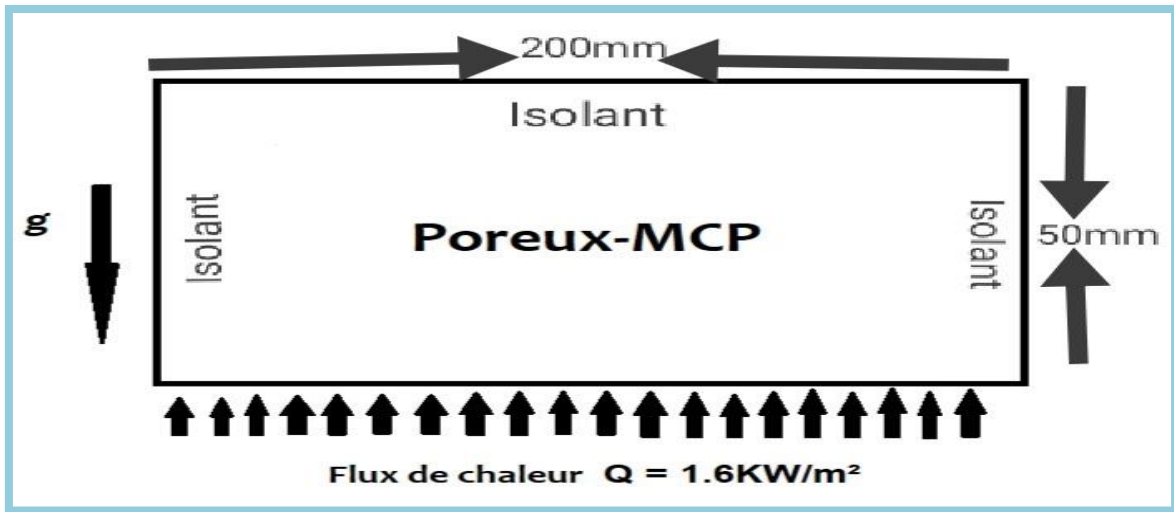


Figure 4. 1: Le schéma du modèle physique ainsi que les conditions aux limites.

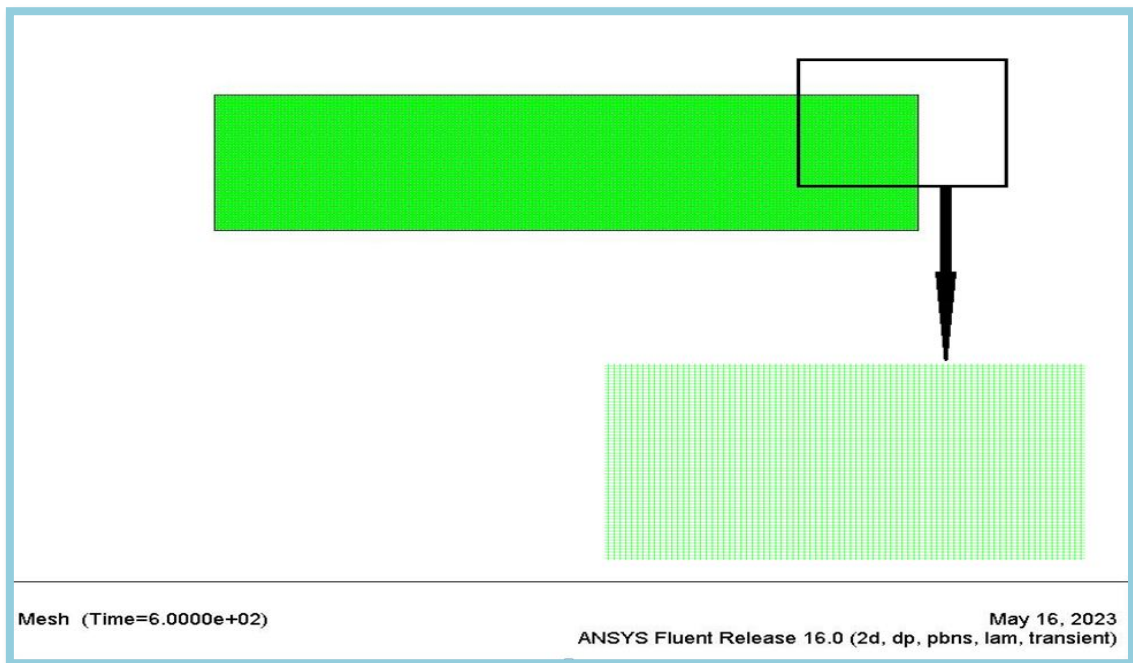


Figure 4. 2: Maillage du domaine.

Le RT-58 (RUBITHERM) est considéré comme le MCP et les propriétés physiques du RT-58 sont répertoriées dans le tableau 2.28. La raison de l'utilisation du RT-58 est que le point de fusion convient à l'usage domestique des unités LHS dans l'air et échangeurs de chaleur à eau. Notez que MCP est initialement à 23°C pour étudier la zone solide ainsi que les zones de fusion et liquide pendant le processus de stockage de la chaleur.

Tableau 4. 1: Propriétés physiques du RT 58[64].

Propriétés	RT 58
Température liquide (°C)	48
Température solide (°C)	62
Chaleur de fusion (kJ/kg)	181
Chaleur spécifique (j/kg k)	2100
Densité (kg/m ³)	840
Conductivité thermique (w/m k)	0.2
Viscosité (Pa. ² s)	0.0269
Coefficient de dilatation thermique (1/k)	0.00011

4.4 Description mathématique

En présence d'un milieu poreux, en plus de la perte de charge provoquée par les matériaux solidifiés, une perte de pression est considérée comme due aux pertes visqueuses et inertielles dans l'équation de quantité de mouvement utilisant l'équation de Brinkman-Forchheimer. » Pour simuler le processus de transfert de chaleur en présence de milieux poreux avec l'application de modèles non-équilibre thermiques.

Les hypothèses suivantes sont également supposées dans notre étude numérique.

4.4.1 Hypothèses [64]

- Le MCP liquide est considéré comme un fluide newtonien isotrope et incompressible.
- Le milieu poreux est considéré comme à cellules ouvertes, homogène et isotrope.
- L'approximation de Boussinesq est appliquée pour la convection naturelle de l'écoulement laminaire du MCP liquide dans l'équation de quantité de mouvement en

raison du faible gradient de température dans le domaine, et l'écoulement est considéré comme laminaire.

- L'expansion volumique du MCP est négligée lors du changement de phase.
- L'influence de la tension superficielle sur l'écoulement était négligeable.
- Toutes les propriétés du MCP sont constantes.

4.5 Modélisation numérique

Pour résoudre les équations gouvernantes, le logiciel ANSYS-FLUENT 16.0 est utilisé dans cette étude à l'aide des fonctions définies par l'utilisateur (UDF) pour calculer le coefficient de transfert de chaleur inter-facial entre le fluide et le milieu poreux à chaque endroit et à chaque fois. 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. Notez que les valeurs les plus élevées sont également vérifiées pour les critères de convergence, et aucun changement n'est observé dans les résultats.

De plus, Nous avons vérifié la taille du pas de temps pour : 0.1 s et 0.5 s, et les résultats sont presque les mêmes, puisque la vitesse est faible, et le mouvement du front thermique est également faible, reflétant une situation de nombre de Peclet et de nombre de Courant faibles.

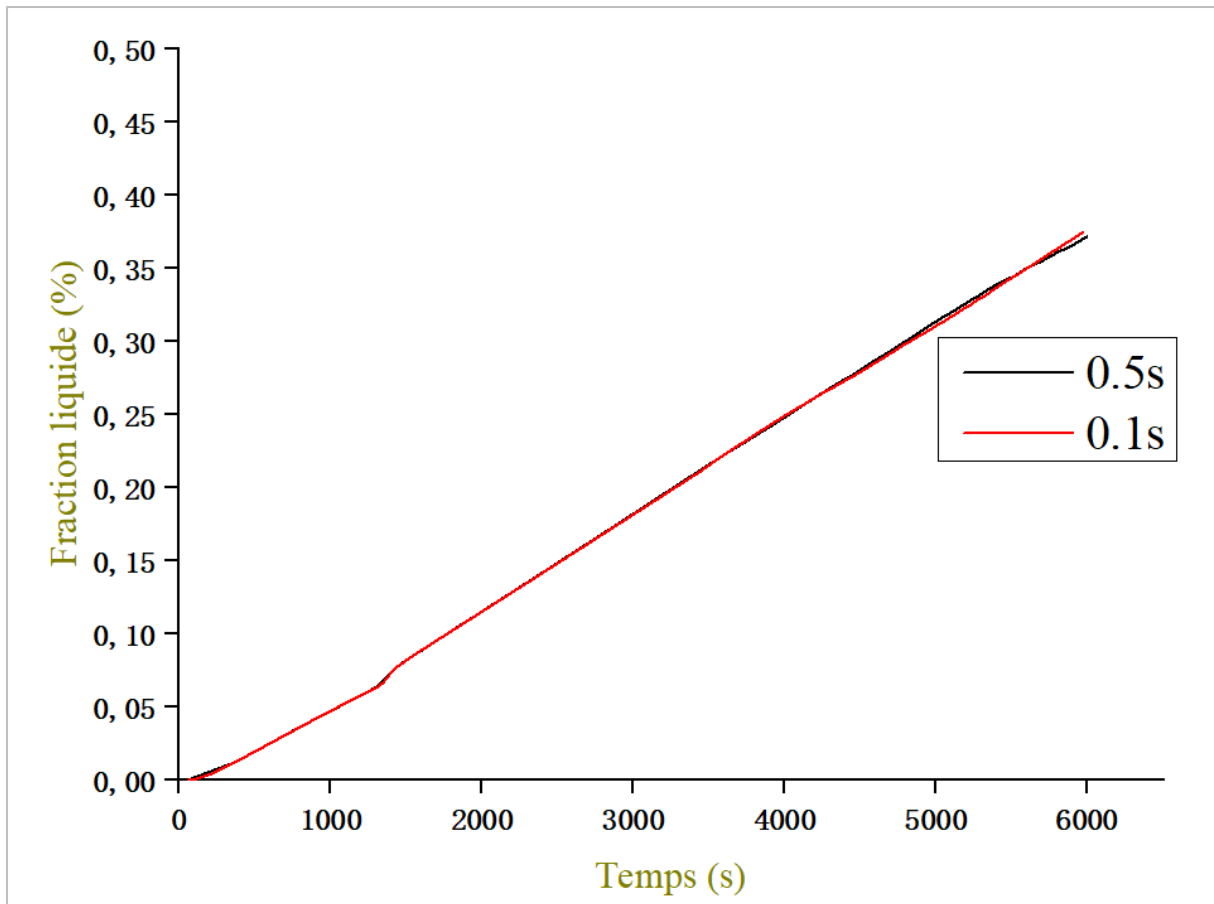


Figure 4. 3: Test indépendant du pas de temps.

4.6 Formulation mathématique

4.6.1 Equation de continuité

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

$$\varepsilon \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot \rho_f \vec{V} = 0 \quad [4- 1]$$

4.6.2 Équation de la quantité de mouvement

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

4.6.3 Les équations gouvernantes Pour le Nano-fluide

4.6.3.1 Equation de continuité

$$\frac{\partial V_i}{\partial x_i} = 0 \quad [4- 2]$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad [4- 3]$$

4.6.3.2 Equation de conservation de quantité de mouvement

$$\rho_{nf} \left(V_j \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 V_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 V_j}{\partial x_i^2} \right) + (\rho\beta)_{nf} (T - T_0) g_i \quad [4- 4]$$

$$\rho_{nf} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \frac{\partial p}{\partial x} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad [4- 5]$$

$$\rho_{nf} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \frac{\partial p}{\partial y} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - (\rho\beta)_{nf} (T - T_0) g \quad [4- 6]$$

4.6.3.3 Equation d'énergie

$$(\rho C_p)_{nf} \left(V_j \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = k_{nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} \right) \quad [4- 7]$$

Où :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_{nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad [4- 8]$$

4.7 Validation du model

Les Figures ci-dessous présentent la comparaison entre nos résultats numériques et les résultats numériques de (Pouyan et Al) [90] pour MCP unique et 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 (Pouyan et Al) [90], et notre numériques, ce qui nous permet de valider notre modèle ; les figures (4.4) et (4.5) montrent 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 ($Y=0$. $Y=12.5$; $Y=25$; $Y=37.5$. $Y=50$).

Les figures (4.6), (4.7) et (4.8) présentent la fusion de MCP en fonction de temps dans les deux modeles étudiés

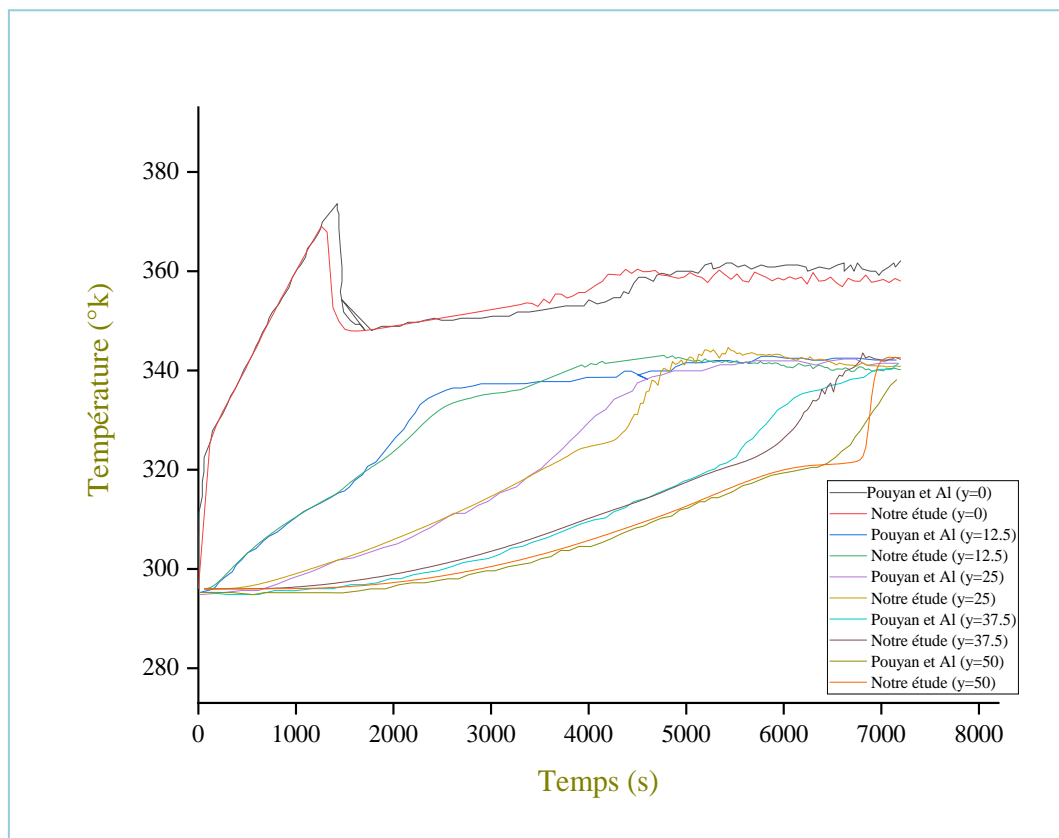


Figure 4. 4: Les températures moyennes de différents emplacements verticaux pour un système MCP uniquement.

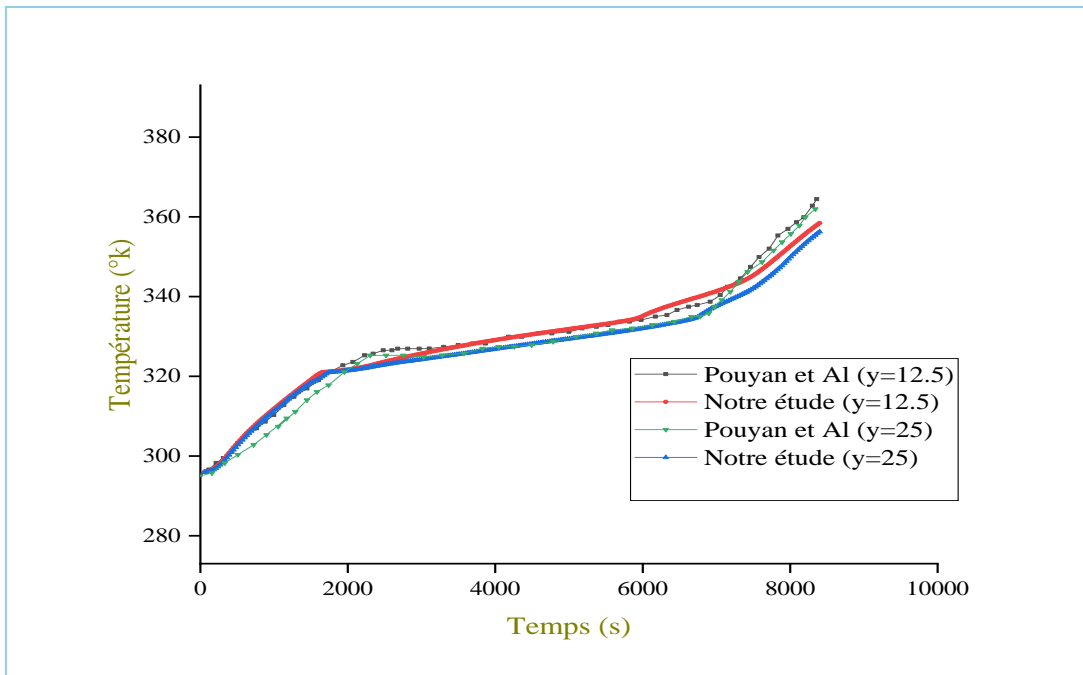


Figure 4. 5: Les températures moyennes de différents emplacements verticaux pour un système Poreux-MCP.

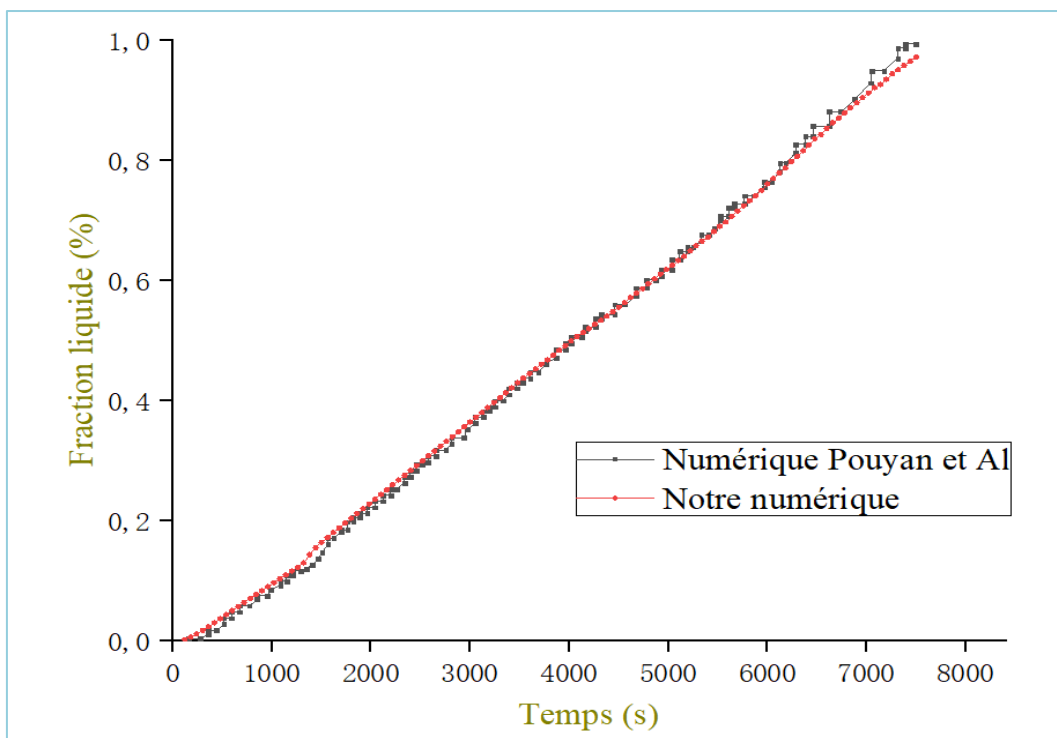


Figure 4. 6: La fraction liquide moyenne à différents moments pour le système MCP uniquement.

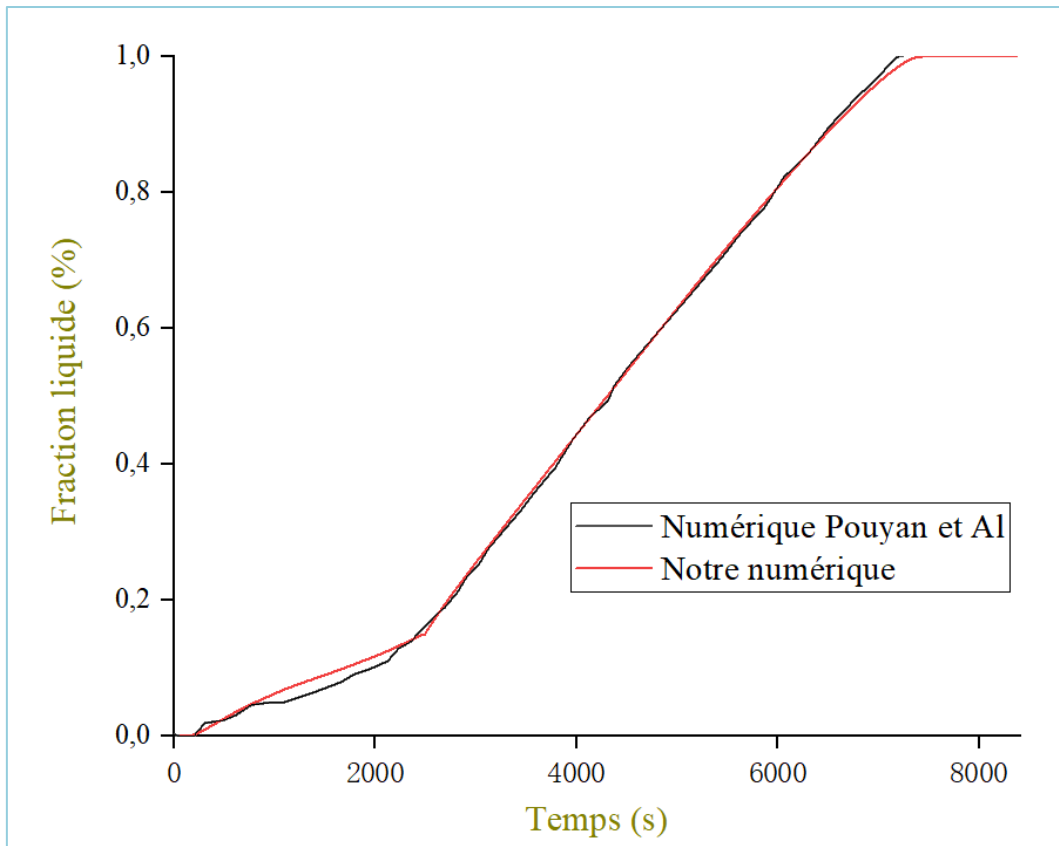


Figure 4. 7: La fraction liquide moyenne à différents moments pour le système Poreux-MCP.

Contours de fraction liquide

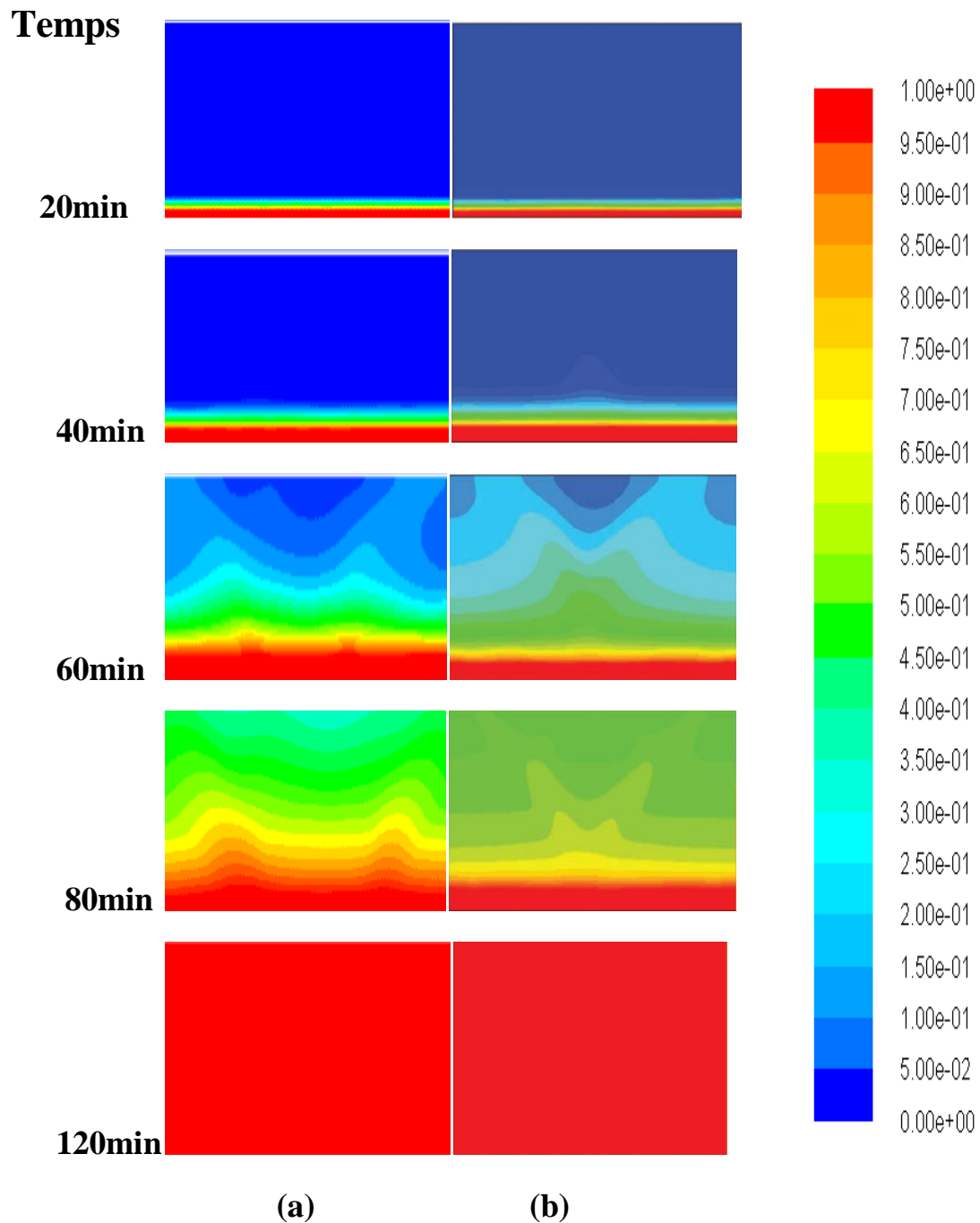


Figure 4. 8: Evolution temporelle de la fraction liquide : (a) résultats de notre simulation (b) résultats pour l'enceinte rectangulaire [98].

CHAPITRE

5

Résultats et discussion

Introduction

Après avoir vu dans le chapitre précédent les détails du modèle d'étude et leur simulation numérique sur le programme ANSYS Fluent, dans ce dernier chapitre on va discuter et interpréter les résultats obtenus ainsi, les courbe de la fraction liquide de fusion de l'MCP et les champs de température au cours du fusion sont présentées dans ce chapitre.

5.1 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 (5. 1) montre la convergence des résidus vers la valeur fixe. Dans ce cas, une valeur de 10^{-6} a été utilisée.

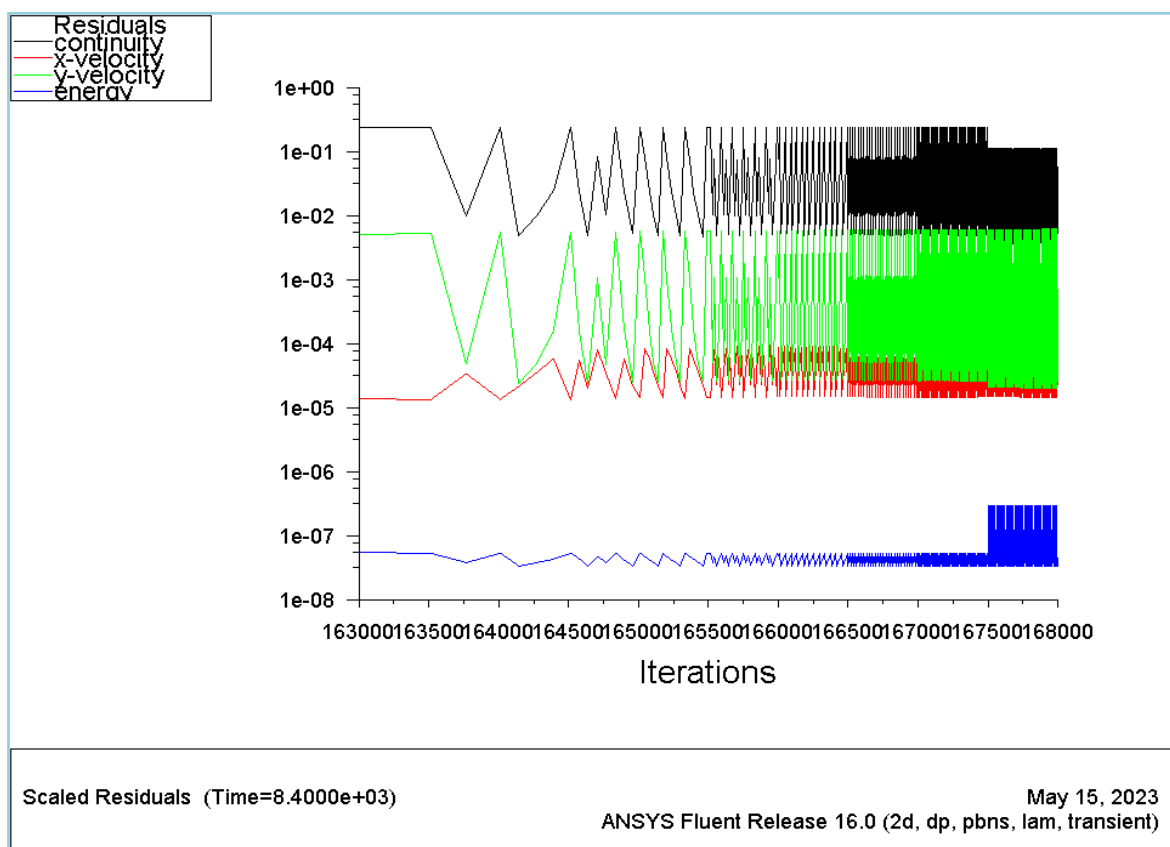


Figure 5. 1: Tracés des courbes de résidus.

5.2 Effet du poreux-MCP par rapport au MCP seul

5.2.1 Présentation des contours de Fraction liquide

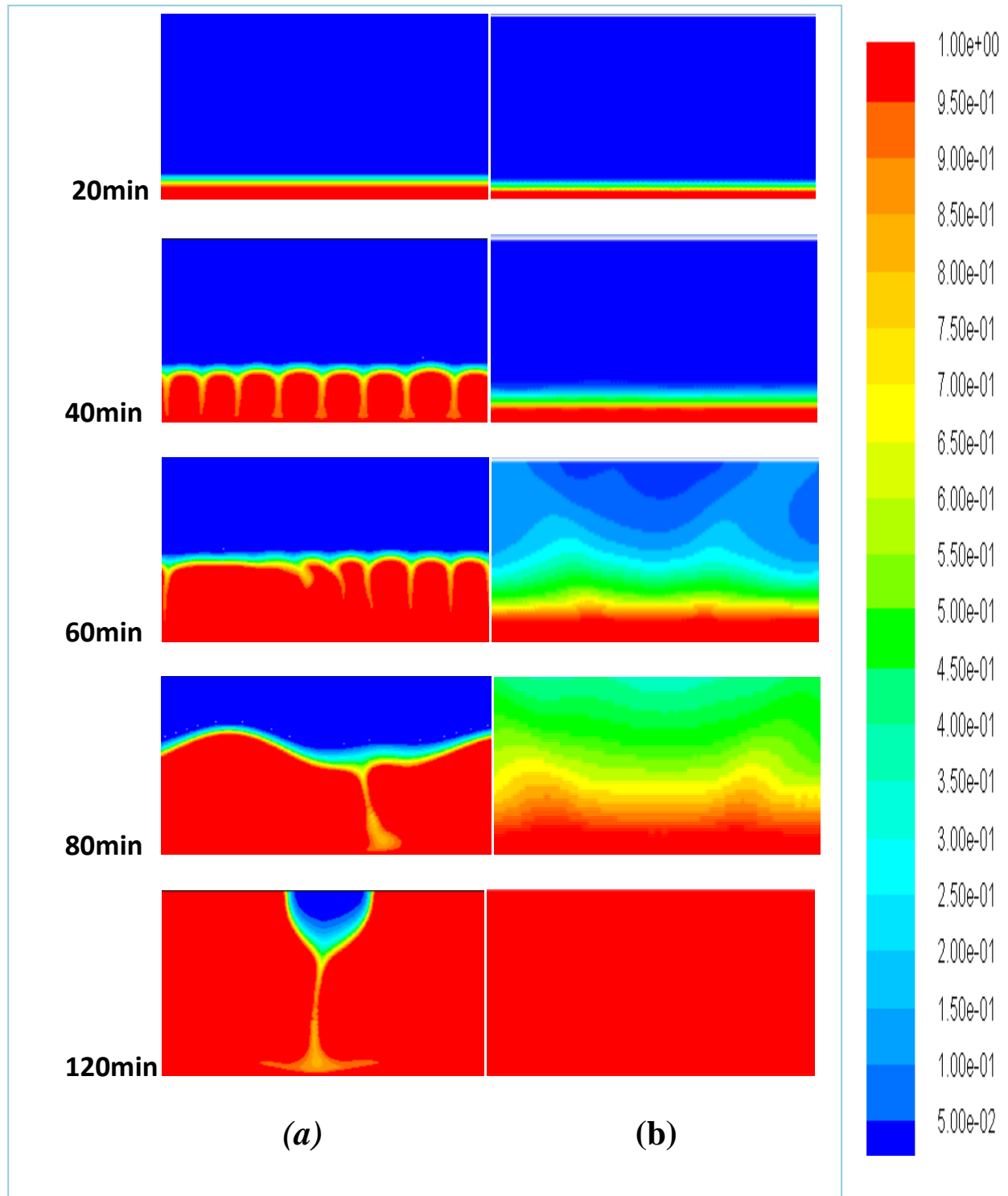


Figure 5. 2:La fraction liquide à différents moments pour le système : (a) MCP seul, (b) le système Poreux-MCP.

La figure montre le tracé de contour de la fraction liquide pour les cas de (a) MCP seul et de (b) Poreux-MCP à différents moments. Comme indiqué, au début (avant 20 min), les deux systèmes fondent par le bas et le liquide se forme. Après cela, dans le Poreux-MCP, le liquide ne peut pas se déplacer correctement dans le domaine en raison de la résistance à l'écoulement de la surface solide, et la chaleur est transférée par un mécanisme de conduction à travers le support poreux métallique à haute conductivité à travers le MCP. Cependant, dans le système MCP seul, la convection naturelle devient progressivement dominante pour transférer la chaleur vers les couches supérieures et en faisant circuler un MCP à faible conductivité, et en raison de l'amélioration de la convection naturelle, le taux de transfert de chaleur augmente. Par conséquent, au bout de 40 minutes, le MCP fond davantage dans le système MCP seul que dans le Poreux-MCP. Un autre problème est que, comme on peut le voir facilement après le temps de 60 min, étant donné que la chaleur est transférée très rapidement à la couche supérieure par le milieu poreux, les couches supérieures du MCP fondent presque en même temps comme les couches inférieures, cependant, avec un taux de fusion plus faible. Cependant, pour le cas MCP seul, on peut voir que les couches supérieures sont solides jusqu'à ce que l'interface mobile de la région liquide-solide atteigne les couches supérieures.

5.3 Effet du type de la mousse sur le changement de phase

Pour analyser comment la conductivité thermique de la mousse métallique affecte la cinétique du changement de phase, nous avons examiné trois types de mousse avec une porosité (0,95) et une densité de pores (10 PPI) identiques, comme illustré à la figure (5.3). Notre enquête s'est concentrée sur le suivi des changements de température, et la fraction liquide au cours du temps.

Tableau 5. 1: Propriétés thermophysiques des mousses métalliques.

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

5.3.1 Présentation des contours

5.3.1.1 Contours de fraction liquide

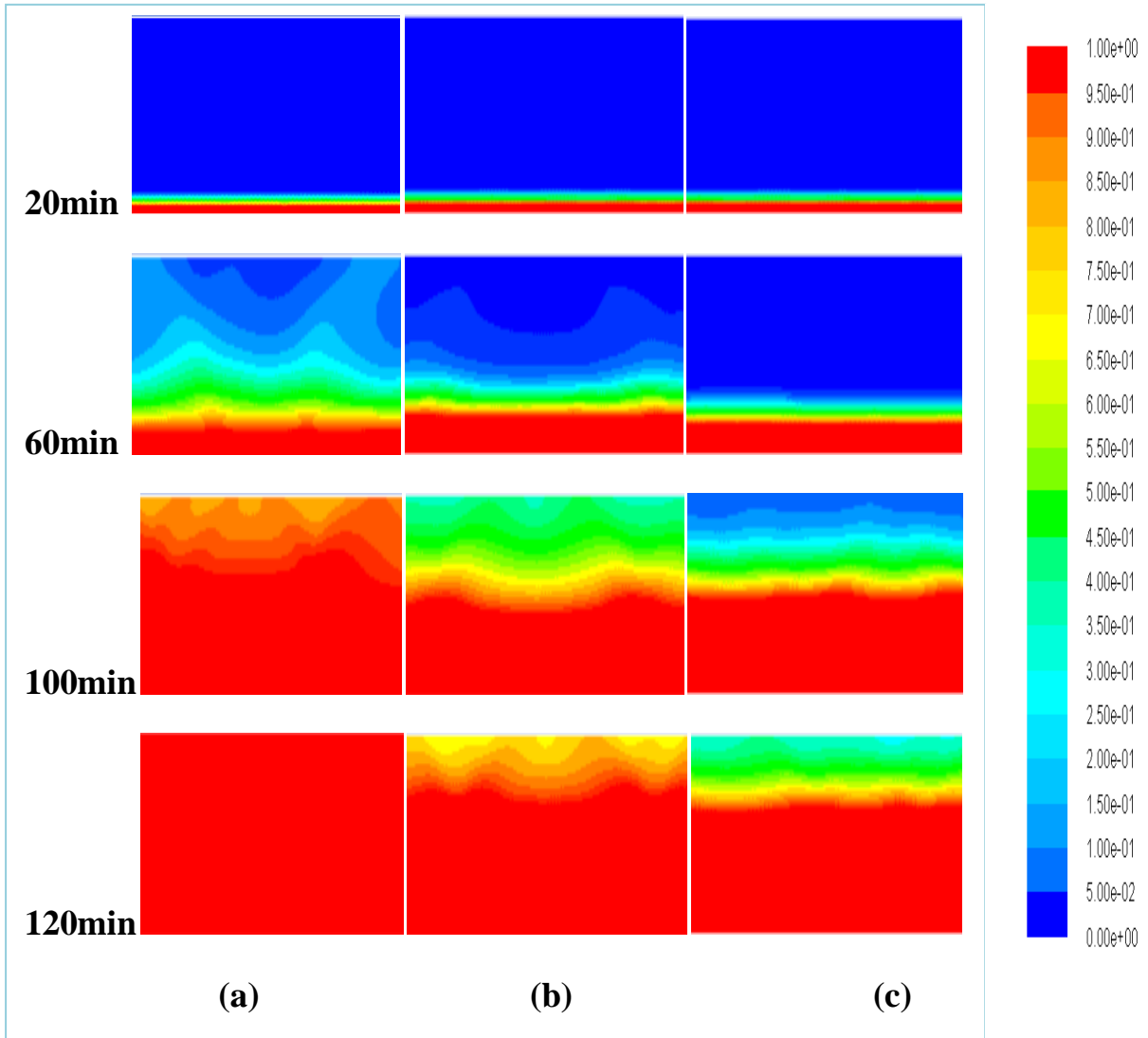


Figure 5. 4: La fraction liquide à différents moments pour le système : (a) MCP/mousse de Cuivre, (b) MCP/mousse d'Aluminium, (c) MCP/mousse de Nickel.

5.3.1.2 Contours de Température

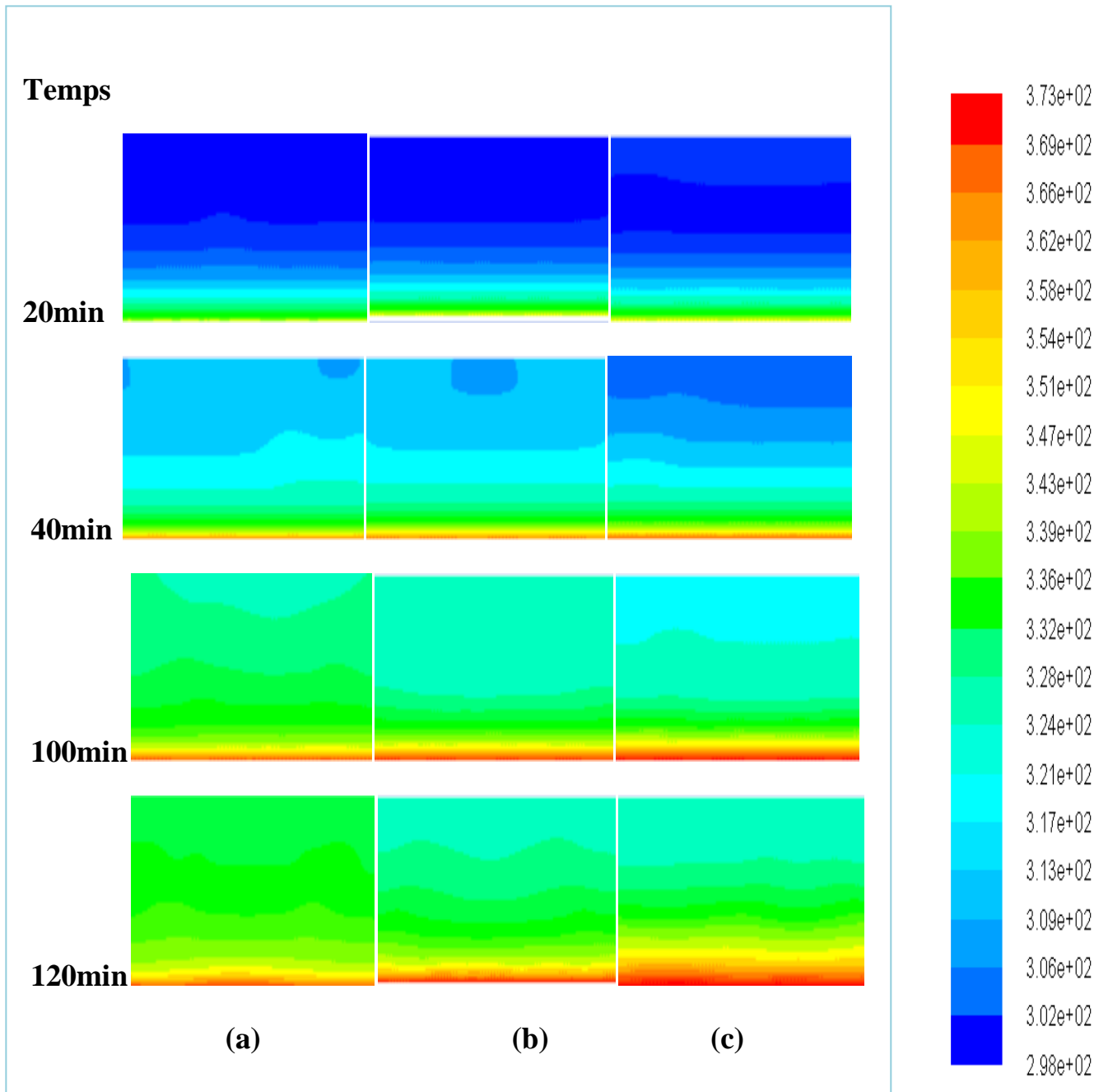


Figure 5. 5: Température à différents moments pour le système : (a) MCP/mousse de Cuivre, (b) MCP/mousse d'Aluminium, (c) MCP/mousse de Nickel.

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 8400 secondes, par rapport à la mousse d'aluminium, qui n'a que 85 % de MCP fondu, et la mousse de nickel, qui n'a que 63 % de MCP fondu. Ces résultats conduisent à la conclusion que la cinétique de stockage et de récupération est fortement dépendante de la conductivité thermique de la matrice.

5.4 Effet de la densité des pores sur le changement de phase

Afin d'examiner l'impact de la densité des pores nous avons considéré une mousse avec une porosité de (0.95). Nous avons sélectionné trois densités de pores différentes pour cette étude : 10 pores par pouce (PPI), 20 PPI et 30 PPI. La figure présente l'évolution temporelle de la fraction liquide du MCP en fonction de la densité de pores. Les résultats ont démontré que la densité des pores a une faible influence sur la fusion du MCP mais on remarque qu'il y a une augmentation de la fraction liquide à mesure que la densité des pores augmente. En effet, une densité de pores plus élevée correspond à une surface plus grande, ce qui permet un échange d'énergie plus efficace entre la mousse métallique et le

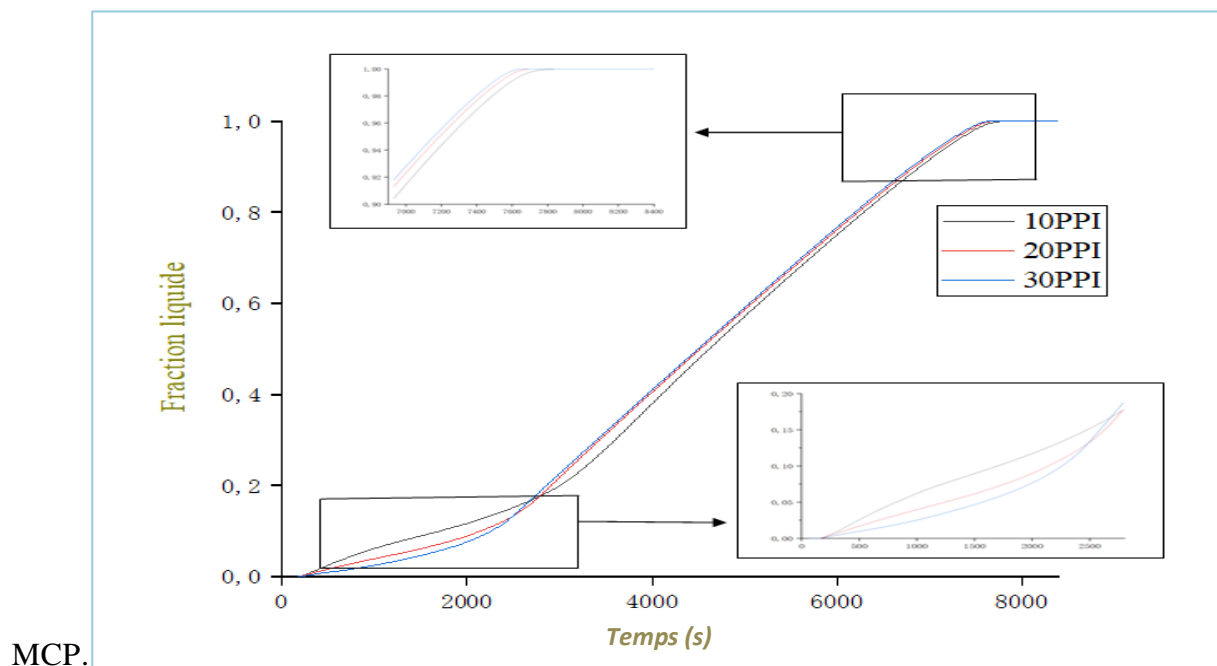


Figure 5. 6: La fraction liquide a différentes moments pour trois densités de pores (10, 20 et 30PPI).

5.4.1 Présentation des contours de fraction liquide

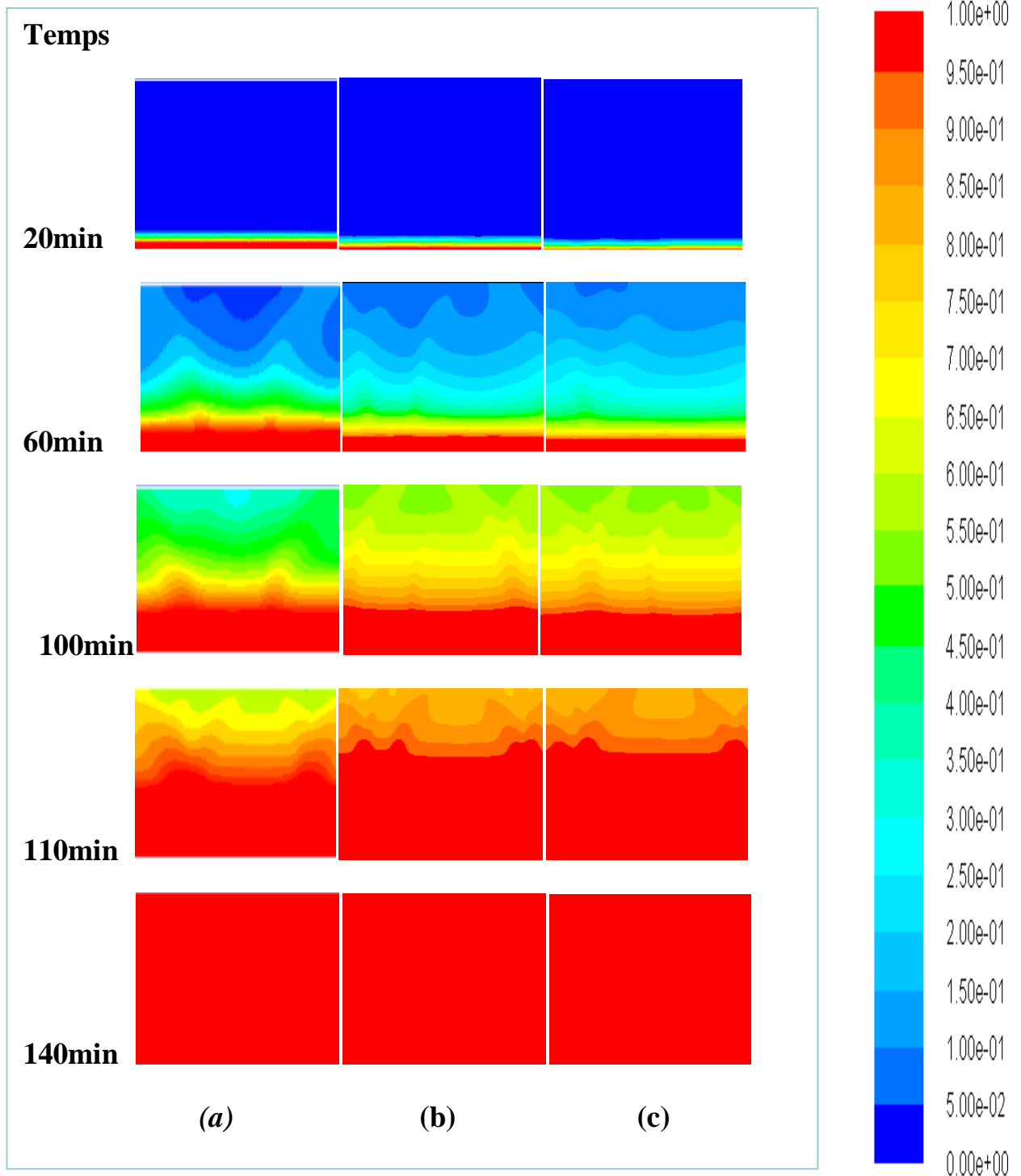


Figure 5. 7: Fraction liquide à différents moments pour le système MCP/mousse de Cuivre : (a) 10PPI, (b) 20PPI, (c) 30PPI.

La figure(5. 6) montre une comparaison de différentes tailles de pores (PPI, pores par pouce) pour analyser son effet sur le processus de changement de phase MCP. Une valeur plus élevée de PPI signifie une taille de pore plus petite de la mousse métallique, ce qui conduit à des valeurs plus élevées de surface par volume et de résistance à l'écoulement.

Lorsque la taille des pores diminue de 10 PPI à 30 PPI, la zone de transfert de chaleur entre le MCP liquide et la mousse métallique augmente, ce qui accélère le processus de fusion. Comme la taille des pores ne cesse de diminuer (de 10 PPI à 30 PPI).

5.4 Effet du nano-fluide sur MCP

5.4.1 Propriétés physiques du nano-fluide

Le système est initialement à une température $T_0=296.15K$. Le fluide de base considéré est de MCP (RT-58), alors que le nanoparticule est le cuivre (Cu) avec une fraction volumique choisie est de $\varphi=0.03$. Le tableau suivant résume les propriétés physiques utilisées dans la simulation :

Tableau 5. 2: Propriétés thermophysiques du fluide de base et de nanoparticule.

		MCP	Cu
Masse volumique	$\rho(kg.m^{-3})$	840	8978
La capacité calorifique	$C_p(j.kg^{-1}.k^{-1})$	2100	381
Conductivité thermique	$K(W.m^{-1}.k^{-1})$	0.2	387.6
Viscosité dynamique	$\mu(kg.m^{-1}.s^{-1})$	0.0269	/
Coefficient de dilatation	$\beta(k^{-1})$	0.00011	/

Les propriétés thermophysiques du nanofluides peuvent être calculées par les relations théoriques des modèles de Maxwell et Brinkman.

5.4.2 Présentation des contours de fraction liquide

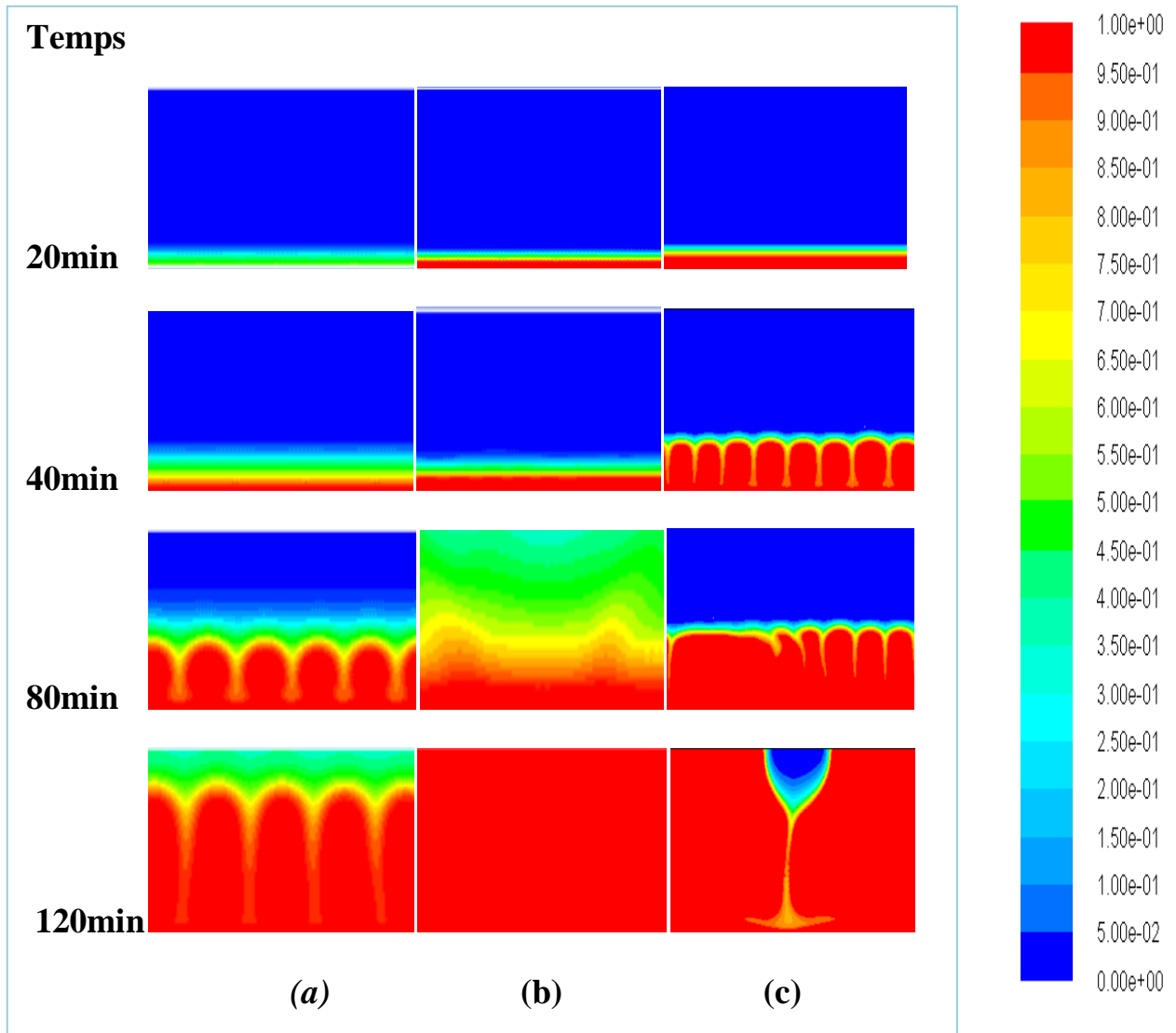


Figure 5. 8: Fraction liquide pour différents moments pour le système :
a) Nano-MCP (RT58+Cuivre), b) MCP/Mousse de cuivre, c) MCP seul.

La figures (5. 7) présente la variation des contours de fraction liquide pour (a) Nano-MCP, (b) MCP/Cu et (c) MCP seul pour les différents moments et pour fraction volumique $\varphi = 0.03$ de nanoparticule. D'après la figure, nous avons remarqué :

Qu'en utilisant : la mousse et nanoparticule de cuivre, le schéma de la fusion change de manière significative. De plus, la fusion uniforme et plus rapide du MCP est obtenue avec le cas de MCP intégrés : MCP/Cu et Nano-MCP.

Initialement, à 20min, les couches d'interface solide-liquide (zone de transfert de chaleur) peuvent être clairement vues à travers les couleurs bleue et rouge, respectivement, le cas des MCP seul et MCP/Cu. Alors qu'un modèle de fusion uniforme peut être observé avec le cas Nano-MCP en ne montrant aucune interface solide-liquide visible. Avec l'augmentation du temps de fusion, l'interface progressivement solide-liquide peut être vue montrant l'effet de la flottabilité et des forces gravitationnelles. Une fusion uniforme est observée dans le cas des MCP/Cu et Nano-MCP en raison des modes de chauffage par conduction et par convection naturelle.

À 120min, la fusion complète du MCP est observée dans le cas des MCP/Cu alors qu'il reste encore une infime portion de MCP solide et Nano-MCP (à cause de faible fraction liquide de nanoparticule et la chaleur spécifique qui diminue par rapport au MCP seul), ce qui montre que l'ajout de la mousse améliore le taux de transfert de chaleur et le processus de fusion.

5.1 Le stockage thermique en différents cas de MCP

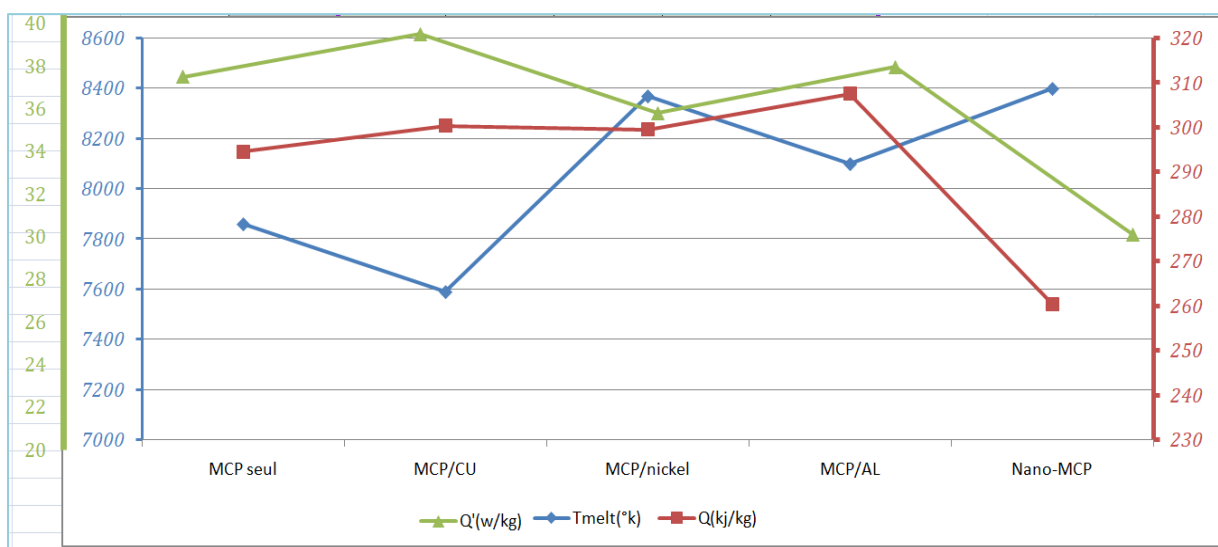


Figure 5. 9: le stockage thermique en différents cas de MCP : T_{melt} , Q et \dot{Q} .

La figure nous illustre la quantité de chaleur stockée (Q), la densité de flux (Q') et le temps nécessaire de la fusion complète de MCP, d'après les données, on remarque une amélioration du processus de stockage thermique avec l'addition de la mousse métallique dans le MCP, on remarque aussi que les performances de stockage varient selon la nature de métal utilisé où l'utilisation de cuivre a entraîné une augmentation significative de la quantité de chaleur stockée afin de diminuer le temps de fusion de MCP. L'utilisation d'aluminium comme mousse métallique intégrées au MCP a également entraîné une amélioration modérée par rapport au MCP seul.

En revanche, l'utilisation de nickel comme additif n'a pas eu beaucoup d'impact sur les performances du MCP, on peut expliquer sa par l'augmentation de la conduction et la dispersion thermique de l'ensemble.

Enfin, la figure nous montre aussi que l'utilisation d'un nanoparticule mélangé par le MCP diminue la quantité de chaleur stockée et augmenter le temps de la fusion complète de MCP, on peut expliquer sa par la diminution de la chaleur spécifique de nanofluide malgré l'augmentation de la conductivité thermique.

En conclusion, il est important d'évaluer soigneusement les effets potentiels sur la quantité de chaleur avant d'utiliser des additifs tels que le cuivre ou l'aluminium dans des applications pratiques.

***CONCLUSION GENERALE
ET PERSPECTIVES***

Conclusion générale

Dans ce travail on a traité le sujet de stockage de la chaleur latente par la paraffine RT58 qui été choisie comme matière de changement de phase ainsi on a essayé d'améliorer le transfert de chaleur et augmenter la conductivité thermique du paraffine en examinons l'effet de l'ajout des mousses métalliques (de différents types et différentes densité des pores), et l'ajout de nanoparticule (cuivre).

Après la validation de notre maillage (Quadratique uniforme) a 400x200, les résultats obtenus montre que :

- ❖ La paraffine RT58 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.
- ❖ L'utilisation de nanoparticules peut conduire à une augmentation du temps nécessaire à la fusion (stockage) pour se terminer, et cela est attribué à leur faible chaleur spécifique de nano-MCP.
- ❖ L'amélioration du processus de stockage thermique avec l'addition de la mousse métallique dans le MCP.

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.

Perspectives

Néanmoins les résultats de ce modeste travail constituent les bases d'un travail à poursuivre et à améliorer pour une étude beaucoup plus approfondie qui pourra faire l'objet d'une thèse de doctorat. Ainsi, les perspectives futures sont :

- ❖ Etude de phénomène de décharge thermique avec la solidification de MCP.
- ❖ Etude de l'effet de la géométrie hauteur et longueur sur le processus de stockage thermique.

- ❖ Etude de l'effet de conditions aux limites ; en variant le flux thermique imposé ainsi les conditions des parois latérales par exemple prenant la convection naturelle.
- ❖ Puis nous pouvons améliorer cette étude par réalisation d'un bon d'essai pour faire avoir des résultats expérimentaux.
- ❖ Etc.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- 1 (12/10/2015).Statistical Review [Online].Available:
<http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-worldenergy.htm>
- 2 (International Standard ISO 11357-4, Plastics - Differential scanning calorimetry (DSC), Part 4 : Determination of specific heat capacity, 2005
- 3
- 4 K. G. L. L. A. Gontard, Amélioration de la conductivité thermique de matériau à changement de phase, Université de Pau des pays de l'Adour, 2012.
- 5 M. Mahfoudi, Stockage de la chaleur dans un milieu granuleux solide. doctorat en sciences : Génie mécanique option : Energétique. Université Mohamed khider Biskra faculté des sciences et de la technologie département : Génie Mécanique. p147, 2016.
- 6 L. Telkes, Thermal storage for heating and cooling. Proceedings of the workshop on solar energy storage subsystems for the heating and cooling of buildings. Charttes ville, Virginia, USA.1975.
- 7 H.Lane Solar Heat Storage: Latent Heat Material, Volume 1: Background and Scientific Principles. USA: CRC.Turkish, 1983.
- 8 A. Sharma, V.V. Tyagi et al, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, pp. 318-345, 2009.
- 9 M. MAZMAN, Latent Heat Storage and Applications, thèse , Ç.Ü. Institute of Natural and Applied Sciences, Adana. (In Turkish) 11, 2006.
- 10 D.ĐNÇER, Đ., ROSEN, Thermal Energy Storage Systems and Applications, Wiley and Sons Publishing Company, New York, USA. 2002.
- 11 H. I. M. E. T. H. P. T. E. C. N. Jasim M. Mahdi, «Solidification enhancement with multiple PCMs, cascaded metal foam and nanoparticles in the shell-and-tube energy storage system,» Applied Energy, 2020.
- 12 G. K. Batchelor."Brownian diffusion of particles with hydrodynamic interaction". Journal of Fluid Mechanics, 74(1): 1-29, (1976).
- 13 A. Abhat, Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials, vol. 30, 1983.
- 14 M.Mohammedet all, A review on phase change energy storage: materials and applications, Energy Conversion and Management, 45, 2004, pp 1597–1615.

- 15 S.Blaise et al, Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2011.
- 16 A. SOUPART-CARON, Stockage de chaleur dans les Matériaux à Changement de phase, UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES, 2015.
- 17 Y. S. e. A. K. K. Muraishi, «Kinetics of the thermal decomposition of dicarboxylic acids,»Thermochimica Acta, vol. 239, pp. 51-59, 1994.
- 18 S. Newsletter, Sugar Alcohol based Materials for Seasonal Storage Applications, 2015.
- 19 M. M. Kenisarin, «High-temperature phase change materials for thermal energy storage,» Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 14, n° 103, pp. 955-970, 2010.
- 20 H. L. S. M. e. J. L. H. Ge, «"Low melting point liquid metal as a new class of phase change material: An emerging frontier in energy area,» Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 21, pp. 331-346, 2013.
- 21 B. Meriem, Simulation numérique du stockage thermique par chaleur latente dans une capsule Elliptique, Boumerdes, Université M'Hamed Bougara Boumerdes Faculté des Sciences de L'Ingénieur, 2016.
- 22 V. T. e. D. Buddhi, « PCM thermal storage in buildings: A state of art,» Renewable and sustainable Energy Reviews, vol. 11, pp. 1146-1166, 2007.
- 23 Saib Hind, Etude de simulation des phénomènes de transfert thermique lors de la solidification d'alliages, mémoire de master 2009.
- 24 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.
- 25 M.Larnicol, Stocker de la chaleur avec les Matériaux à changement de phaseGhislenghien2009.
- 26 **N.Bellavance**, Comment fonctionne un caloduc ? '<http://horyax.fr/comment-fonctionne-un-caloduc.html>, 12/4/2012, Date D'accès : 20/5/2016.
- 27 L. S. BERREKSI SARA, Simulation numérique du stockage thermique par chaleur latente dans une capsule sphérique, Boumerdes, Département énergétique, 2016.
- 28 DESFILHES, P. (2005a) Pour que les murs retiennent La Chaleur ou la fraîcheur, Les Echos. Available at: <https://www.lesechos.fr/2005/11/> (Accessed: 02 July 2023).

- 29 C.Y. Zhao et G.H. Zhang , Review on microencapsulated phase change materials(MEPCMs): Fabrication, characterization and applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, pp. 3813-3832, 2011.
- 30 O. La guerre, «Study of domestic refrigeration temperature and analysis of factors affecting temperature,» International Journal of Refrigeration, 2002.
- 31 ADEME, «Etude expérimentale des appareils électroménagers à haute efficacité énergétique placés en situation réelle,» 1998.
- 32 . L. J. G. D. G. Kamel AZZOUZ, Performances d'un système frigorifique domestique avec stockage par chaleur latente, Congrès Français de Thermique, 2007.
- 33 «Futura sciences,» [En ligne]. Available: <https://www.futurasciences.com/sciences/definitions/chimie-exothermique-3602/>.
- 34 J. Serrano, Numerical and experimental validation of hermetic reciprocating compressors. Integrating in vapour compression refrigerating systems, Catalonia , 2002.
- 35 «Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance,» [En ligne]. Available: <https://books.openedition.org/insep/1367>.
- 36 zalba B, Mari'n JM , cabeza LF, and Mehling H « Review on thermal energy storage with phase change :materials, heat transfer analysis and applications »Appltherm Eng.2003 ;23 :251-83.
- 37 LO Salyer et A. K. Sircar, Matériaux à changement de phase pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments résidentiels, Actes de la 28e conférence intersociété sur l'ingénierie de la conversion de l'énergie, 12-17 août 1990, Reno, Nevada.
- 38 O. Salyer, A. K. Sircar, Development of phase change technology for heating and cooling of residential buildings and other applications, Proceedings of the 28th inter society energy conversion engineering conference, 8-13 Août 1993, Atlanta.
- 39 M.N. Hawlader., M.S. Uddinet H.J. Zhu Microencapsulated phase change materials. In Proceedings of 9th APCCHE Congress and CHEMECA 2002, Christchurch, New Zealand, 2002.
- 40 Saib Hind, Etude de simulation des phénomènes de transfert thermique lors de la solidification d'alliages, mémoire de master 2009.
- 41 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.
- 42 S. Safia. Etude de la convection bidiffusive dans un milieu poreux anisotrope. Thèse de doctorat en Génie climatique. Université de Constantine1, 2013.

- 43 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.
- 44 M. Kaviany, Principles of heat transfer in porous media, 2nd edition, Springer-Verlag New York, 1995.
- 45 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.
- 46 C. Danquigny. Etude expérimentale du transfert de masse en milieu poreux hétérogène. Thèse doctorat de l'université de Louis Pasteur de Strasbourg, 2003.
- 47 A. Delache, Etude analytique et numérique des instabilités spatio-temporelles des écoulements de convection mixte en milieu poreux: comparaison avec l'expérience. Thèse doctorat de l'université des Sciences et Technologie de Lille, 2005.
- 48 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.
- 49 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.
- 50 Nield DA and Bejan A. *Convection in porous media*. New York, NY: Springer International, 2017.
- 51 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.
- 52 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.
- 53 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.
- 54 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
- 55 Calmidi VV and Mahajan RL. The effective thermal conductivity of high porosity fibrous metal foams. *J Heat Transfer* 1999; 121: 466–471.

- 56 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.
- 57 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.
- 58 Bhattacharya A, Calmidi VV and Mahajan RL. Thermophysical properties of high porosity metal foams. *Int J Heat Mass Transfer* 2002; 45: 1017–1031.
- 59 Boomsma K and Poulikakos D. Corrigendum for the paper: K. Boomsma, D. Poulikakos, “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.
- 60 Boomsma K and Poulikakos D. On the effective thermal conductivity of a threedimensionally structured fluid-saturated metal foam. *Int J Heat Mass Transfer* 2001; 44: 827– 836.
- 61 Z`ukauskas A. Heat transfer from tubes in crossflow. In: James P. Hartnett, Thomas F. Irvine, (eds) *Advances in heat transfer*. Elsevier, 1972; 8: 93–160.
- 62 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.
- 63 Stephen U. S. Choi* and J. A. Eastman [Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticule] *International mechanical engineering congress and exhibition* 1995.
- 64 R. Aghayari, H. Maddah, S. M. Pourkiaei, M. H. Ahmadi, L. Chen, and M. Ghazvini, "Theoretical and experimental studies of heat transfer in a double-pipe heat exchanger equipped with twisted tape and nanofluid," *The European Physical Journal Plus*, vol, (2020).
- 65 Olivier Doche, Jean-Antoine Gruss & Olivier Soriano. *Une nouvelle technologie pour les échangeurs thermiques : Le Nanofluide*. 2007.
- 66 S. Mahmud et R. Andrew Fraser, "Conjugate heat transfer inside a porous channel", *Heat and Mass Transfer* volume 41, pp 568–575 (2005).
- 67 J.C. Maxwell. "A Treatise on electricity and magnetism", Clarendon Press, U.K., (1891).
- 68 A. Einstein, "Investigations on the Theory of the Brownian Movement", Dover Publications, New York, (1956).
- 69 H.C. Brinkman. "The viscosity of concentrated suspensions and solution". *J. Chem. Phys.*, 20, 571–581, (1952).
- 70 S. Maiga, S. Palm, S. Nguyen, C. Roy, and G. Galanis. "Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows". *Int. J. Heat Fluid Flow*, 26, 530-546, (2005).

- 71 B.C. Pak and Y.I. Cho. "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles". *Experimental Heat Transfer*, 11(2), 151–170, (1998).
- 72 B. Takabi, S. Salehi, "Augmentation of the heat transfer performance of a sinusoidal corrugated enclosure by employing hybrid nanofluid", *Adv. Mech. Eng.* 6 (2014) 147059.
- 73 D.A. Nield, A. Bejan, "Convection in porous media", 2nd ed, Springer-Verlag, New York, (1999).
- 74 V. Wong Kaufui Omar De Leon. *Applications of Nanofluids: Current and Future*. Mechanical and Aerospace Engineering Department, University of Miami. (2015).
- 75 A. SOUPART-CARON, *Stockage de chaleur dans les Matériaux à Changement de phase*, UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES, 2015.
- 76 «Wikipédia, l'encyclopédie libre,» [En ligne]. Available: https://fr.qwe.wiki/wiki/Metal_foam
- 77 F. Benmoussa, A. Benzaoui 2 and H. Benmoussa 1 Thermal behaviour of latent thermal energy storage unit during charging and discharging processes: effects of HTF inlet velocity. *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 20 N°2 (2017) 285 – 293
- 78 X. Xiao, P. Zhang, M. Li, Preparation and thermal characterization of paraffin/metal foam composite phase change material, *Appl. Energy*, 112 (2013), 1357–1366
- 79 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 V O L .3 N °001* (2018) 229–235.
- 80 X. Xiao, P.Zhang, M. Li, Effective thermal conductivity of open-cell metal foams impregnated with pure paraffin for latent heat storage, *Int J ThermSci*, 81 (2014), 94–105.
- 81 Ahmed H.N. Al-Mudhafara,b,*, Andrzej F. Now akowskia, Franck C.G.A. Nicolleau, Thermal performance enhancement of energy storage systems via phase change materials utilising an innovative webbed tube heat exchanger. *Energy Procedia* 151 (2018) 57–61.
- 82 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.
- 83 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.
- 84 P. Zhang, ZN. Meng, H. Zhu, YL.Wang, SP .Peng. Melting heat transfer characteristics of a composite phase change material fabricated by paraffin and metal foam. *Appl Energy* 185 (2017), 1971–83.

- 85 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
- 86 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.
- 87 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.
- 88 Y. Yao, H. Wu, Z. Gao, Z. Liu, Pore-scale visualization and measurement of paraffin solidification in high porosity open-cell copper foam, *Int J ThermSci*, 135 (2019), 94–103.
- 89 Nabeel, S.D., Khodadadi, J.M., Al-Hattab, T.A., Al-Mashat, S.M., 2013. Experimental and numerical investigation of melting of NePCM inside an annular container under a constant heat flux including the effect of eccentricity. *Int. J. Heat Mass Tran.* 67, 455–468.
- 90 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.
- 91 Jasim, M.M., Hayder, I.M., Emad, T.H., Pouyan, T., Emmanuel, C.N., 2020. Solidification enhancement with multiple PCMs, cascaded metal foam and nanoparticles in the shell-and-tube energy storage system. *Appl. Energy* 257, 113993.
- 92 Nie, C.D., Liu, J.W., Deng, S.X., 2021. Effect of geometric parameter and nanoparticles on PCM melting in a vertical shell-tube system. *Appl. Therm. Eng.* 184, 116290.
- 93 Wu, Y.Y., Wang, B.C., Li, D., Liu, C.Y., 2019. Effect of timeliness on the thermal properties of paraffin-based Al₂O₃ nanofluids. *Mod. Phys. Lett. B* 33, 1–10.
- 94 J. M. Khodadadi et S. F. Hosseini zadeh, Nanoparticle-enhanced phase change materials (NEPCM) with great potential for improved thermal energy storage. *Int. Com. in Heat and Mass Transfer*, Vol. 34, pp. 534–543, (2007).
- 95 I. ANSYS, ANSYS FLUENT Getting Started Guide, 2011.
- 96 J.-L. Godin, «DOCPLAYER,» 2015. [En ligne]. Available: <https://docplayer.fr/782722-Figure-3-1-lancement-du-gambit.html#>.
- 97 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.
- 98 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.

RESUME

المخلص

يعد التخزين الحراري من أهم المجالات العلمية الحالية، حيث يتم تخزين الطاقة الحرارية المفقودة بهدف استخدامها عند الحاجة، ويتم ذلك باستخدام مواد تتميز بقدرتها على تخزين الحرارة أثناء الذوبان وإطلاقها أثناء التصلب، ولكن هذه المواد لها موصلية حرارية منخفضة.

في هذه الرسالة، نقدم موضوع تخزين الحرارة في (RT 58: RUBITHER) MCP وندرس كيفية تحسين التخزين الحراري باستخدام:

➤ MCP / وسط مسامي :

- ثلاثة أنواع من القوم المعدني (نحاس ، ألومنيوم ، نيكل فوم).
- رغوة نحاسية بقيم مختلفة لكثافة المسام (10 PPI ، 20PPI و 30PPI).
- النانو / MCP : جسيمات النحاس النانوية.

باستخدام برنامج النمذجة العددية (بطلاقة 16.0) ، محاكاة عملية الصهر لـ RT58 ممزوجة بالرغوات المعدنية والجسيمات النانوية (النحاس). تعتبر العتبة المستطيلة ثنائية الأبعاد بحدان ثابتة الحرارة مجال الحساب ، مع مراعاة التدفق الحراري المستمر من السطح السفلي ، لأبعاد (200 × 50 مم).

من خلال تحليل ومقارنة النتائج التي تم الحصول عليها.

الكلمات المفتاحية

التخزين الحراري ، مادة تغيير الطور ، وسط مسامي، Fluent ، حرارة كامنة ، RT58 ، جزيئات نانوية ، نانو- MCP.

Résumé

Le stockage de chaleur est l'un des domaines scientifiques actuels les plus importants, où l'énergie thermique perdue est stockée dans le but de l'utiliser en cas de besoin, et cela se fait en utilisant des matériaux qui se distinguent par leur capacité à stocker la chaleur pendant la fusion et à la diffuser pendant la solidification, mais ces matériaux ont une faible conductivité thermique.

Dans ce mémoire, nous présentons le sujet du stockage de chaleur dans le MCP (RT 58 : RUBITHERM) et étudions comment améliorer le stockage thermique en utilisant :

- *MCP/milieu poreux :*
 - *Trois types de mousse métallique (mousse de cuivre, d'aluminium et de Nickel).*
 - *Mousse de cuivre avec différentes valeurs de densité des pores (10PPI, 20PPI et 30PPI).*
- *Nano/MCP : Nanoparticule de cuivre.*

À l'aide du programme de modélisation numérique (Fluent 16.0), une simulation de processus de fusion de RT58 mélangée à des mousses métalliques et à nanoparticule (cuivre). Ont été réalisées dans Une enceinte rectangulaire 2D est à parois adiabatiques considérée comme le domaine de calcul, et en considérant un flux de chaleur constant depuis la surface inférieure, pour les dimensions de (200 x50mm).

En analysant et en comparant les résultats obtenus.

Mots clés

Stockage thermique, matière à changement de phase, milieu poreux, Fluent, chaleur latent, RT58, nanoparticules, nano-MCP

Abstract

Thermal storage is one of the most important areas of current science, where lost thermal energy is stored with the aim of using it when needed, and this is done using materials that are characterized by their ability to store heat during fusion and release it during solidification. , but these materials have low thermal conductivity.

In this thesis, we present the subject of heat storage in the PCM (RT 58: RUBITHERM) and study how to improve thermal storage using:

- *PCM/porous medium:*
 - *Three types of metallic foam (copper, aluminum and nickel foam).*
 - *Copper foam with different pore density values (10PPI, 20PPI and 30PPI).*
- *Nano/MCP: Copper nanoparticle.*

Using the numerical modeling program (Fluent 16.0), a melting process simulation of RT58 mixed with metallic and nanoparticle (copper) foams. Were carried out in A 2D rectangular enclosure with adiabatic walls considered as the calculation domain, and considering a constant heat flux from the lower surface, for the dimensions of (200 x 50mm).

By analyzing and comparing the results obtained.

Key words

Thermal storage, phase change material, porous medium, Fluent, latent heat, RT58, nanoparticles, nano-MCP.

