

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 de stockage thermique
Par les matériaux à changements de
phases utilisées dans les échangeurs de
chaleur

Préparé par :

KHALDI Sofiane

MOUFFOK Abdelhak

Soutenu publiquement le : 01 / 07 / 2021, devant le jury composé de :

M.CHAIB Khaled	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Président
M.SAD CHEMLOUL N-E	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. BELMILOUD Med-A	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M.BENFARHAT Slimane	Docteur de Vacataire de "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadreur



Remerciements

Avant tout nous tenons nos remerciements à notre dieu de nos avoir

Donné la force et le courage.

A la suite Nous tenons à remercier vivement Mme KHALDI

Sabrina notre promoteur qui a fourni des efforts énormes, par ses

Informations ses conseils et ses encouragements.

Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour L'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance, Et tous les professeurs de département de Génie

mécanique

Nos vifs remerciements aussi à messieurs BENFARHAT.

A tous ce qui furent à un moment ou à toute instante partie prenante de ce travail.

Nos plus chaleureux remerciements pour tous ceux qui de près et de loin ont contribué à la réalisation de cette mémoire.



Dédicace

Louange à Dieu, qui selon notre travail.

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

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

Ma mère à la source de l'amour et de la
Compassion.

Ma sœur Sabrina Khaldi.

A ma grande famille.

A mon binôme SOFIANE qui réalise avec moi ce travail.

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

TABLE DES MATIERES

Remerciement.....	i
Dédicace.....	ii
Table de matière.....	iii
Liste des figures.....	vi
Liste des tableau.....	vii
Nomenclature.....	viii
INTRODUCTION GENERALE	01
Chapitre I : Théorie générale sur les matériaux à changement de phase	
I.1. Introduction	03
I.2-Définition d'un matériau à changement de phase (MCP).....	03
I.3- La classification des MCP	04
I.4-Types des matériaux à changement de phase (MCP)	05
I.4.1- Les MCP Organiques	05
A- Paraffines	05
B-Non-Paraffines	06
I.4.1.1 Avantage des MCP organique	07
I.4.1.2. Inconvénients des MCP Organiques	07
I.4.2- Les MCP Inorganiques	07
A-Hydrates de sels.....	08
B-Sels	08
C-Métaux	09
I.4.2.1. Avantages des MCP Inorganiques	09
I.4.2.2. Inconvénients des MCP Inorganiques	09
I.4.3- Les MCP Eutectiques	09
I.4.3.1. Avantages des MCP Eutectiques	10

I.4.3.2. Inconvénients des MCP Eutectiques	10
I.5- Propriétés des matériaux à changement de phase	10
I.5.1 - critères thermodynamiques	10
I.5.2 - critères cinétiques	10
I.5.3- critères chimiques	10
I.5.4 - critères économiques	11
I.6-Méthode de conditionnement des MCP dans les applications de stockage thermique	11
I.7 -Classe de MCP.....	11
I.7.1-Matériaux changement de phase SP.....	11
I.7.2-Matériaux changement de phase RT.....	11
I.8-Applications des MCP.	12
I.8.1 Le transport des produits alimentaires	12
I.8.2-Stockage de l'énergie thermique.....	12
I.8.3-L'industrie textile.....	12
I.8.4 - Application aux bâtiments.....	13
I.8.5 Applications médicales.....	14

Chapitre II : Théorie du stockage et déstockage de chaleur dans les MCP.

II.1. Introduction	15
II.2. Stockage de l'Énergie :.....	15
II.3. Différentes types de stockage	15
II.3.1. Le Stockage de l'énergie thermique:.....	15
II.3.1.1. Différentes méthodes de stockage de l'énergie thermique.....	15
A. Stockage Thermique par chaleur sensible	17
B. stockage thermique par chaleur latente	17
C. Stockage thermochimique	19
II.3.1.2 Les avantages du stockage par chaleur latente	19
II.3.2 Stockage chimique	19

II.3.3. Stockage mécanique	20
II.3.4 Stockage thermochimique	20
II.3.5 Stockage électrique	20
II.3.6. L'amélioration des transferts thermiques dans les MCP	20
II .3.6.1. Les échangeurs à ailettes	20
II.3.6.2 Les mousses métalliques	21
II.3.6.3. Le graphite expansé	22
II.3.6.4 L'intensification des transferts thermiques à l'intérieur du tube	23
II.4. Quelques phénomènes ayant un impact sur l'efficacité du stockage	24
-La surfusion	24
-La surchauffe	25
-La dilatation	25
II.5- Synthèse bibliographique sur le stockage thermique par MCP.....	25
II.5- conclusion.....	34

Chapitre III : La théorie sur le transfert thermique et le changement de phase

III.1-RAPPEL théorique sur le Transfer de chaleur.....	35
III.1.1-Conduction.....	35
III.1.2- Convection	36
III.1.3- Rayonnement.....	37
III .2-Rappel théorique sur le processus de changement de phase	38
III.2.1-Rappels sur les propriétés thermo physiques.....	38
III .2.1.1- La conductivité thermique.....	38
III .2.1.2-La masse volumique.....	39
III .2.1. 3-La chaleur massique.....	39

III .3-La chaleur latente de changement de phase.....	39
III .3.1.La température de changement de phase.....	40
III .3.2-L'enthalpie.....	40
III .4-Théorie de la solidification-fusion.....	40
III .4.1-La solidification-fusion d'un produit pur.....	40
III .5.-Solutions numériques du transfert de chaleur avec changement de phase.	41
A- Les solutions où la position exacte du front de changement de phase doit être connue à chaque pas de temps	42
B- Les solutions où il n'y a pas besoins de connaître la position exacte du front de transition de phase	42
III .5.1.La méthode enthalpique	43
III .5.2. La méthode du Cpapparent.....	43
Chapitre IV résultats et discussion	
IV.1. Introduction	44
IV.2.Domaine de calcul et conditions aux limites.....	44
IV.3. Conditions aux limites	45
IV .4. Hypothèses sur les MCP	46
IV .5-Mise en œuvre numérique	47
IV .6- Etapes de calcul	47
IV .7- Maillage de la géométrie	48
IV.8-Procédure de résolution	49
IV.9-Les équations gouvernantes	50
IV.10-Validation du model	51
IV.11-Critère de convergence	52
IV.10- Résultats et discussions	53

IV.10.1 -Effet de température de l'eau à l'entrée	53
A. Profil de température de MCP	53
B. l'évolution de la fraction liquide durant la charge	55
C. La différence de température ($T_s - T_e$) de l'eau	56
D. La chaleur accumulée (évacuée par l'eau) Durant la charge	57
E. La chaleur accumulée (absorbée par l'eau) Durant la décharge	58
IV.10.2 : Effet de la nature de MCP	59
A. La température moyenne de MCP	59
B. La fraction liquide de MCP.....	60
IV.10.3 : Effet de condition au limite	61
IV.10.4 : Effet de la vitesse d'entrée	62
A. La température moyenne de MCP	62
B. La fraction liquide de MCP	63
IV.10.5- Contours des températures pour différentes conditions aux limite	64
IV.10.6.Contours de la fraction liquide pour différents MCP	65
Conclusion Générale	67
Références bibliographiques.....	
Résumé.....	

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Quelque matériau à changement de phase : pochettes, sphères, tubes, plaquettes [3].....	4
Figure I.2 : classification des PCM (Abhat 1983)[4].....	4
Figure I.3: Les applications Transport de produits alimentaires.....	12
Figure. I.4: L'efficacité de MCP dans les textiles.....	13
Figure I.5. Récipients contenant sang et des organes qui contiennent MCP.....	14
Figure II.1 : Principales techniques de stockage de l'énergie thermique [16].....	16
Figure II.2 : Récapitulatif des différents types d'ailettes.....	21
Figure II .3 : mousses métalliques stochastiques en cuivre (a) et régulière en aluminium (b).....	22
Figure II .4 : Tubes Wieland à structuration interne.....	23
Figure II .5: Tubes Wieland à structuration interne et externe.....	24
Figure II.6: Représente le phénomène de surfusion.....	25
Figure II.7: Schémas du système de stockage et du modèle physique étudié.....	26
Figure II.8 : Schéma du montage expérimental.....	27
Figure II.9:localisation des Thermocouples dans le système de stockage.....	27
Figure II.10: Evolution de l'énergie accumulée pendant le processus de charge (a) et de décharge (b) MCP à différentes températures d'entrée d'eau.....	28
Figure II.11 : Schéma du modèle physique.....	29
Figure II.12 : (a) échangeur de chaleur à triple tube (b) échangeur de chaleur à tubes palmés (c) échangeur de chaleur à tubes palmés modifiés.....	30
Figure II.13 : Domaines de calcul avec les conditions aux limites indiquées.....	31
Figure II.14 : système de LHTES.....	31
Figure II.15 : échangeur à plaques de système LHTES simplifié à 2D.....	32
Figure II.16 : système de LHTES avec ailettes.....	33
Figure III.1 : Schéma de transfert de chaleur conductive dans une barre.....	35
Figure III.2 : Mécanisme de la convection.....	36
Figure III.3:transfert de chaleur par rayonnement.....	37
Figure III. Solidification d'une substance pure.....	41

Figure IV.1 : Schéma et photographie du montage expérimental.....	44
Figure IV.2: Domaine numérique.....	45
Figure IV. 3: conditions aux limite du domaine de calcul.....	46
Figure IV. 4 : Maillage du domaine.....	48
Figure IV.5: Comparaison de la température moyenne de MCP de notre numériques et expérimental de [28].....	52
Figure IV.6 : Tracés des courbes de résidus.....	52
Figure IV.7: Comparaison du profil de température moyenne de PCM à différentes températures d'entrée du fluide caloporteur lors du processus de charge et de décharge.....	53
Figure IV.8: comparaison de fraction liquide de MCP (%) à différentes températures d'entrée du fluide caloporteur lors du processus de charge en fonction de temps (s).....	55
Figure IV.9: Différence de température (sortie-entrée) charge (a) décharge (b) en fonction de temps.....	56
Figure IV.10: Variation de l'énergie accumulée durant la charge en fonction de temps pour des températures différentes.....	57
Figure IV.11: Variation de l'énergie accumulée en fonction de temps durant la décharge pour des températures différentes.....	58
Figure IV.12: Variation de la température moyenne de MCP en fonction de temps pour différents MCP (acide de lauric, RT 55 et RT 50).....	59
Figure IV.13: variation de fraction liquide(%) pour différents types de MCP lors du processus de charge en fonction de temps	60
Figure IV.14:Variation de température moyenne de MCP en fonction de temps pour différentes conditions aux limites de l'échangeur	61
Figure IV.15: Variation de température moyenne de MCP en fonction de temps pour différente de vitesse	62
Figure IV.16: variation de fraction liquide (%) en fonction de temps (s) pour différente des vitesses	63

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1: propriétés thermo physiques des paraffines (Sharma et al. 2009) [6].....	06
Tableau II.1 :Exemples de composites de MCP et graphite expansé [23].....	23
Tableau IV.1:les étapes de calcul numérique[28].....	47
Tableau IV. 2 : Propriétés thermo physiques de MCP[28].....	48

Nomenclature

a	diffusivité thermique	[m ² /s]
$C_{liquide}$	Capacités calorifiques massiques du corps à l'état liquide	[J/kg.k]
C_{solide}	Capacités calorifiques massiques du corps à l'état solide	[J/kg.k]
C_p	la chaleur massique à pression p constante	[J/kg.k]
C_v	la chaleur massique à volume v constante	[J/kg.k]
H	Coefficient moyen de transfert convectif	[W/m ² K]
h	l'enthalpie	[KJ/kg]
h_i	l'enthalpie massique initiale	[J/kg]
h_f	l'enthalpie massique finale	[k/kg]
L_f	la chaleur massique de changement d'état du matériau	[J/kg]
m	la masse du matériau de stockage	[kg]
M	la masse	[kg]
P	la pression	[Pa]
Q	Puissance transférée	[W]
$Q_{stocké}$	la chaleur sensible	[J]
$Q_{Latente}$	la chaleur chaleur	[J]
S	aire de la section de passage du flux de chaleur	[m]
S	Surface traversée	[m ²]
T	la température	[°k]
T_i :	la température initiale	[°k]
T_f :	la température finale	[°k]
$T_{liquide}$	la température de liquide	[°k]

T_{solide}	la température	[k]
T_s	Température de la surface	[K]
T_{∞}	Température moyenne du fluide	[K]
U	l'énergie interne	[J]
V	la vitesse	[m/s]
ΔT_M	la différence de température moyenne	[k]

Symboles grecs

σ	constante de Stefan Boltzmann = $5.67 \cdot 10^{-8}$	$[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4]$
ε	Émissivité de la surface	$[\text{m}^2]$
λ	la conductivité thermique en fonction de la température	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
Φ	Puissance transférée	$[\text{W}^\circ]$
ρ	la masse volumique	$[\text{Kg}/\text{s}]$
\bar{F}_b	L'approximation de boussinesq	
Ω	la fraction de liquide	

Paramètres géométriques de l'obstacle

L	la longueur
l	la largeur
e	l'épaisseur
D	le diamètre

Abréviations

2D	Bidimensionnel
3D	Tridimensionnel
CFD	Computational Fluid Dynamics
HTF	Heat Transfer Fluid
LHTES	Latent Heat Thermal Energy Storage
MCP	Le matériau changement de phase

Introduction générale :

Au cours de ces dernières décennies, la demande de l'énergie sous ses différentes formes n'a cessé d'augmenter, vue le développement et la croissance de l'activité industrielle et la demande du confort dans la vie quotidienne comme dans le transport, le chauffage et la climatisation. Les énergies fossiles dont le pétrole, le charbon et le gaz naturel fournissent actuellement la majeure partie des besoins mondiaux.

Pour cela, la production de nouvelles sources d'énergie est l'enjeu majeur le plus important de notre temps, aux vue des publications et les recherches réalisées dans ce domaine dans le but d'améliorer l'efficacité énergétique.

Parmi les énergies renouvelables, on cite l'utilisation de rayonnement solaire qui est associé à des systèmes de stockage d'énergie thermique. En général, stocker de l'énergie consiste à l'emmagasiner pendant une période où elle est abondante ou moins coûteuse (solaire, tarifs de nuit...) pour l'utiliser pendant une période durant laquelle elle est rare ou plus chère.

La nature intermittente de l'énergie solaire pose des problèmes de stockage. Il est nécessaire de développer des dispositifs de stockage permettant le transfert d'énergie des périodes excédentaires aux périodes déficitaires et adapter ainsi sa production à sa consommation. Ce stockage peut être sous forme de chaleur sensible ou de chaleur latente.

Le stockage thermique par chaleur latente dans les liquides ou les solides peut être un moyen très intéressant en utilisant des matériaux à changement de phase, ce sont des matériaux capables de changer d'état physique dans une plage de température restreinte. Dans cet intervalle de température, le changement de phase le plus courant est la fusion /solidification. Ces matériaux présentent l'avantage de stocker une grande quantité d'énergie avec un bon rapport masse/volume.

Actuellement, les matériaux à changement de phase (MCP) ont une conductivité thermique assez faible de l'ordre de 0,2 w/m.K en moyenne ce qui ne permet pas d'avoir un bon transfert thermique pendant les processus de charge/décharge. Pour résoudre ce problème pendant chaque processus,

L'augmentation de la surface d'échange entre le MCP et le fluide caloporteur est proposée.

Dans le cadre de ce travail, on s'intéresse à l'étude numérique de stockage de l'énergie thermique par chaleur latente dans un matériau à changement de phase dans un cylindre, le présent mémoire comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre est une synthèse bibliographique et théorie générale sur les matériaux à changement de phase.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté des généralités sur le stockage et déstockage de chaleur dans les matériaux à changement de phase.

Le troisième chapitre traite la théorie sur le transfert thermique et le changement de phase .

Le quatrième chapitre est consacré à la simulation numérique, discussion et interprétation des résultats.

En fin dans la conclusion, on donne un résumé de l'essentiel des résultats obtenus.

I .1. Introduction :

Actuellement, la consommation d'énergie augmente progressivement avec le développement de la technologie et la croissance de la population mondiale. Habituellement, les combustibles fossiles sont utilisés comme sources d'énergie ; ce qui provoque des méfaits sur l'environnement. Aussi, cette source d'énergie épuisable dont les prix ne sont pas stables. Pour cela, la production de nouvelles sources d'énergie est l'enjeu majeur le plus important de notre temps, aux vue des publications et les recherches réalisées dans ce domaine dans le but d'améliorer l'efficacité énergétique.

Le stockage thermique par chaleur latente dans les liquides ou les solides peut être un moyen très intéressant en utilisant des matériaux à changement de phase, ce sont des matériaux capables de changer d'état physique dans une plage de température restreinte. Dans cet intervalle de température, le changement de phase le plus courant est la fusion /solidification. Ces matériaux présentent l'avantage de stocker une grande quantité d'énergie avec un bon rapport masse/volume. Depuis quelques années, le stockage de la chaleur dans les MCP est l'objet de nombreuses études et recherche avec la perspective de développé d'évaluer de nouveaux systèmes par la modélisation et la simulation numérique, que expérimentations, permettant de gagner en temps et en moyens matériel. Les matériaux à changement de phase (MCP) ont une conductivité thermique assez faible de l'ordre de 0,2 w/m.K en moyenne ce qui ne permet pas d'avoir un bon transfert thermique pendant les processus de charge/décharge.

I .2-Définition d'un matériau à changement de phase (MCP) :

Les matériaux à changement de phase MCP ont pour particularité de pouvoir stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente. Là chaleur étant absorbée ou restituée lors du passage de l'état solide à l'état liquide.

Les MCP reposent sur l'application d'un principe physique simple .Au-delà d'une certaine température caractéristique de chaque matériau, ils se liquéfient en absorbant la chaleur de l'atmosphère ambiante et les restituent lorsque la température baisse. Cette propriété du matériau est liée à son importante énergie de fusion par unité de volume, plus celle-ci sera grande plus les propriétés de stockage/restitution de la chaleur seront intéressantes. [1]

L'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) pour le stockage d'énergie thermique est très utilisé ces dernières années. Cela est dû au fait que les MCP ont de fortes densités de stockage (quantité d'énergie stockée par unité de masse). En outre, ces matériaux peuvent être appliqués dans plusieurs domaines. [2]

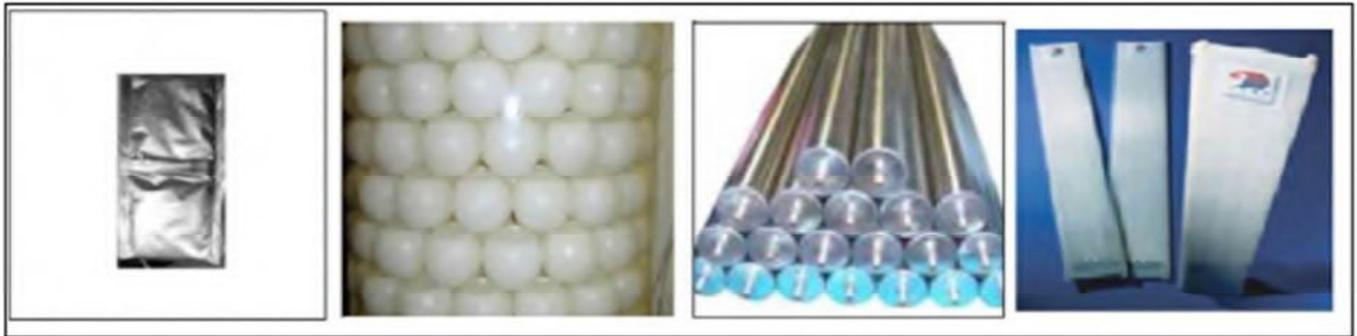


Figure I.1: Quelques matériaux à changement de phase : pochettes, sphères, tubes, plaquettes [3].

I.3- La classification des MCP:

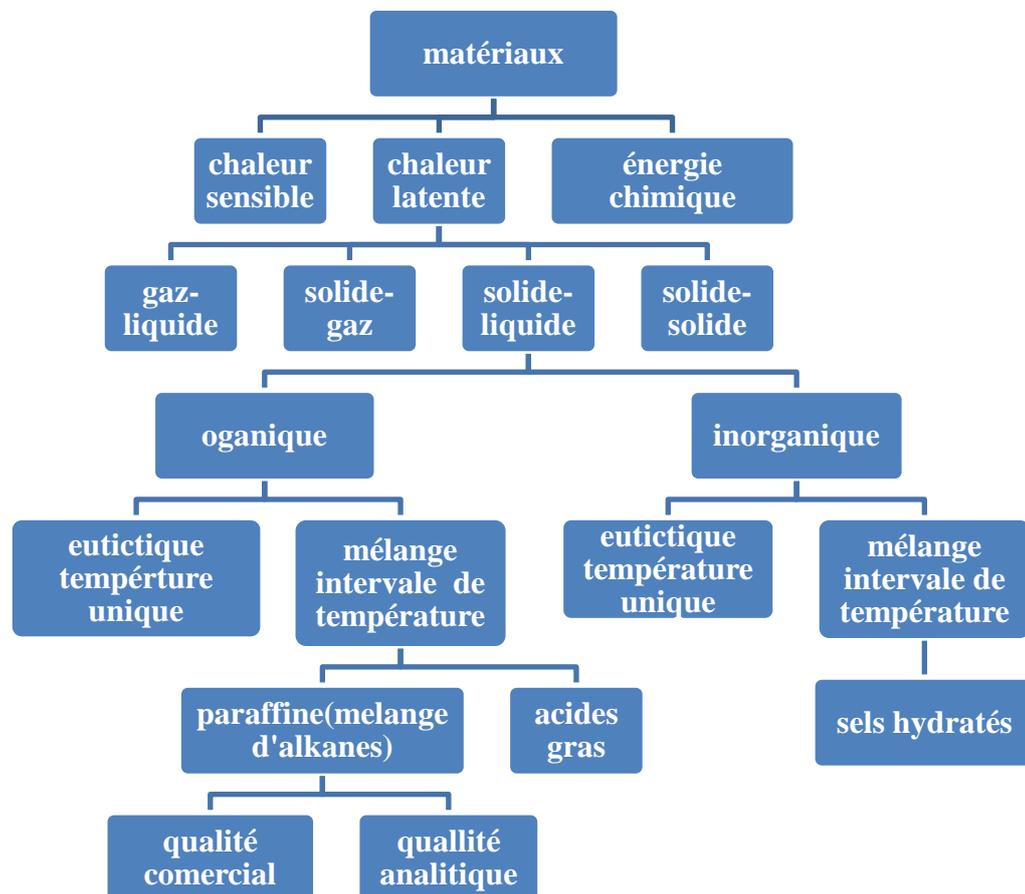


Figure I.2: classification des PCM (Abhat 1983)[4]

En 1983, **Abhat** [4] a donné une classification générale des matériaux talque Il y a un grand nombre de substances chimiques qui peuvent être identifiés comme PCM du point de vue de leur température de fusion et de leur chaleur latente de fusion.

Cependant, excepté le point de fusion se situant dans la plage de température de fonctionnement souhaitée, une majorité de ces substances ne répondent pas aux autres critères exigés pour servir de supports appropriés à un stockage de chaleur.

En effet, aucun matériau ne peut avoir intrinsèquement toutes les propriétés requises pour un support de stockage thermique idéal. Aussi ces matériaux sont employés tout en recherchant les voies et moyens qui permettent d'éviter ou de compenser les inconvénients qu'ils présentent par des techniques appropriées adaptées à chaque application. Par exemple, des ailettes métalliques ont été employées pour augmenter la conductivité thermique des PCM, la surfusion peut être évitée par addition d'un agent de nucléation dans le matériel de stockage, et la fusion non congruente est empêchée en ajoutant dans le PCM un agent épaississant ou un gélifiant approprié. On peut classer les MCP couramment utilisés selon trois catégories :

I.4-Types des matériaux à changement de phase (MCP) :

Les matériaux à changement de phase se divisent en trois types : organiques, inorganiques et eutectiques. [5]

I.4.1- Les MCP Organiques :

Les matériaux ou les substances organiques ont une température ou une plage de température comprise entre 0° C et 150°. Les plus utilisés sont essentiellement à base de paraffine, des acides gras et des alcools de sucre. Ils comportent certains inconvénients, comparés aux avantages des MCP inorganiques : ils ont une plus faible conductivité à l'état solide et à l'état liquide, ils ont une chaleur latente de fusion plus faible, ils sont inflammables. Par contre, ils ont des avantages majeurs ; ils sont disponibles dans une large gamme de températures et sont compatibles avec les matériaux conventionnels de construction, ils sont chimiquement stables et ne nécessitent pas l'utilisation d'agents de nucléation. Ils sont non réactifs la plus part du temps et ils sont recyclables. [5]

A. Paraffine :

Les paraffines sont du type C_nH_{2n+2} , elles se trouvent dans une famille des hydrocarbures saturés avec de très semblables propriétés. Les paraffines entre C5 et C15 sont des liquides, et les autres sont des solides cireux. Les paraffines cireuses sont les MCP organiques commerciaux les plus utilisés pour le stockage de la chaleur. Elles se composent principalement des hydrocarbures de chaîne droite qui ont les températures de fusion entre 22 et 67°C. Elles sont obtenues à partir de la distillation du pétrole et ne sont pas des substances pures, mais composés de différents hydrocarbures.

B. Non-paraffines :

C'est la plus grande catégorie des matériaux utilisés pour le stockage de chaleur latente. Ces matériaux organiques sont des sous-groupes d'acides gras et d'autres produits organiques non paraffine. Les produits organiques non-paraffines sont les plus nombreux des MCP, avec des propriétés fortement diverses, chacun de ces matériaux aura ses propres propriétés, à la différence des paraffines, qui ont des propriétés très semblables. Ces matériaux sont inflammables et ne devraient pas être exposés excessivement à la température élevée ou aux flammes.

Tableau I.1 propriétés thermo physiques des paraffines (Sharma et al. 2009) [6].

Nombred'Atomsde Carbone	Point de fusion (°C)	Chaleur latent de fusion (kJ/kg)
14	5.5	228
15	10	205
16	16.7	237.1
17	21.7	213
18	28	244
19	32	222
20	36.7	246
21	40.2	200
22	44	249
23	47.5	232
24	50.6	255
25	49.4	238
26	56.3	256
27	58.8	236
28	61.6	253
29	63.4	240
30	65.4	251
31	68	242
32	69.5	170
33	73.9	168
34	75.9	169

I.4.1.1 Avantage des MCP organique :

- Pas de ségrégation de phase.
- Sont chimiquement stables
- La surfusion est négligeable.
- Facilement incorporés aux systèmes de stockage de chaleur
- Sobriété écologiques.
- 100% recyclables.
- Peu sensible aux cycles de fusion/solidification.

I.4.1.2. Inconvénients des MCP Organiques :

- Faible conductivité thermique (0,18-0,25 W/m.K).
- Dilatation volumique élevée.
- Inflammables.
- Coût élevé par rapport aux sels hydratés.

I.4.2- Les MCP Inorganiques :

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

A. Hydrates de sels :

Les hydrates de sel sont des sels inorganiques qui contiennent de l'eau et dont la formule générale est $AB.nH_2O$. Pendant la charge, la déshydratation du sel a lieu. Le produit de cette déshydratation peut être un hydrate de sel avec moins molécules d'eau. Le sel hydraté le plus utilisé par son faible coût est le $CaCl_2.6H_2O$ ($T_{\text{fusion}} = 28-30\text{ °C}$). On peut citer aussi le $Mn(NO_3)_2.6H_2O$ pour les applications de climatisation, et un nouveau matériau obtenu à partir d' $Al_2(SO_4)_3.18H_2O$ utilisé avec des additifs pour des applications industrielles autour de 100 °C . On peut aussi citer la bischofite comme exemple d'un mélange d'hydrates de sels composée à 95 % massique de $MgCl_2.6H_2O$ et à 5 % massique de $KMgCl_3.6H_2O$, $Li_2SO_4.H_2O$ et autres sels ioniques tels que $NaCl$ et KCl et ayant une température de fusion autour de 98.9 °C . La transition de phases des hydrates de sels (Tableau 2.3) se traduit par une déshydratation qui donne, à partir du sel initial, un sel moins hydraté (ou anhydre) et de l'eau. Il faut donc éviter de laisser le sel à l'air libre, sans quoi il va se déshydrater complètement. Les sels hydratés pour lesquels le sel n'est que partiellement soluble dans l'eau, sont à fusion non-congruente. La phase solide et l'eau saturée n'ont alors pas les mêmes densités et une séparation de phases survient et s'aggrave cycle après cycle. Cette transformation est problématique car il faudrait remélanger le sel et l'eau pour obtenir de nouveau les propriétés désirées. Des solutions, parmi lesquelles l'agitation mécanique, l'ajout d'un gélifiant ou encore le recours à un excès d'eau, ont été proposées pour résoudre ce problème, mais compliquent, par ailleurs ledit système. Les sels hydratés sont également sujets à d'importantes surfusions, ce qui complique encore leur mise en œuvre. Ces composés étant aqueux, leur température de changement de phase se situe majoritairement entre 0 et 100 °C (avec des exceptions : $MgCl_2.6H_2O$, (Tableau 2.3). Récemment, Kenisarin et Mahkamov[7] ont répertorié près de 20 sels hydratés dont la température de fusion varie de 8 à 117 °C .

B. Sels :

Les sels sont des composés ioniques neutres formés à partir de cations et d'anions. Les sels purs et les mélanges de sels non eutectiques présentent généralement un large spectre de températures de fusion et une chaleur latente variant selon leur type. Les fluorures et les chlorures présentent ainsi une chaleur latente plus élevée que les nitrates ou les sulfates. Les sels les plus connus sont les nitrates comme le $NaNO_3$ ($T_{\text{fusion}} = 307\text{ °C}$), le KNO_3 ($T_{\text{fusion}} = 333\text{ °C}$) ou encore le $LiNO_3$ ($T_{\text{fusion}} = 250\text{ °C}$).

C. Métaux :

Quelques auteurs se sont attardés sur l'utilisation de métaux en tant que MCP, notamment J. P. Kotzé et al. [8] ou encore H. Ge et al. [9]. On peut citer notamment le Potassium ($T_{\text{fusion}} = 63.2^{\circ}\text{C}$), le Bi₅₈Sn₄₂ ($T_{\text{fusion}} = 138^{\circ}\text{C}$) ou encore le Lithium ($T_{\text{fusion}} = 186^{\circ}\text{C}$).

I.4.2.1. Avantages des MCP Inorganiques :

- Disponibilité.
- Grande chaleur de fusion.
- Conductivité thermique élevée
- Faible Dilatation volumique.
- Bon marché.
- Ininflammables.

I.4.2.2 Inconvénients des MCP Inorganiques :

- La ségrégation.
- Perte d'efficacité liée aux cycles de fusion/solidification.
- La surfusion.
- La corrosivité.
- Déshydratation liée aux cycles thermiques.

I.4.3- Les MCP Eutectiques :

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

I.4.3.1. Avantages des MCP Eutectiques :

- Point net de fusion similaire comme le comportement d'une substance pure
- Chaleur latente volumétrique légèrement supérieure à celle des composés organique.

I.4.3.2. Inconvénients des MCP Eutectiques:

- Peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux.
- Encore peu utilisé au niveau des applications industrielles.

I.5- Propriétés des matériaux à changement de phase :

Un grand nombre de matériaux à changement de phase possède une température de fusion dans la gamme de température (0-120°C). Cependant ils ne peuvent être utilisés comme matériaux de stockage que lorsqu'ils possèdent certaines propriétés thermodynamiques, cinétiques et chimiques qui sont définies à partir d'un certain nombre de critères.

I.5.1 - critères thermodynamiques :

Le matériau à changement de phase doit avoir :

- Une température de fusion dans la gamme de température souhaitée.
- Une chaleur latente par unité de masse élevée (une petite quantité du matériau doit pouvoir emmagasiner une grande quantité de chaleur).
- Une chaleur spécifique élevée de sorte que le matériau puisse disposer d'une chaleur sensible significative.
- Une fusion congruente.
- Une petite augmentation de volume pendant la phase de transition.

I.5.2 - critères cinétiques :

Le matériau à changement de phase ne doit montrer ou presque pas le phénomène de surfusion.

Le matériau fondu doit se cristalliser à la température de solidification indiquée par les tables thermodynamiques.

I.5.3- critères chimiques :

Le matériau à changement de phase doit montrer:

- Une stabilité chimique.

- Aucune décomposition chimique de sorte qu'un système de stockage par chaleur latente soit viable.
- Aucune action corrosive sur les matériaux de constructions ou sur leur contenant; Aussi le matériau ne doit pas être nocif; il doit être non inflammable et nonexplosif.

I.5.4 - critères économiques :

Le matériau à changement de phase doit être:

- Disponible en grande quantité.
- A bon marché.

A priori aucun matériau à changement de phase ne peut satisfaire tous ces critères. Beaucoup de matériaux ont été étudiés comme de potentiels matériaux à changement de phase, mais peu d'entre eux sont commercialisés. Les matériaux à changement de phase se classent en trois grandes familles: les composés minéraux et les composés organiques et les mélanges de ces composés.

I.6-Méthodes de conditionnement des MCP dans les applications de stockage thermique :

Le conditionnement des MCP pour leur application dans les dispositifs et systèmes de stockage thermique doit obéir à certaines exigences :

- ❖ Le matériau du conteneur de conditionnement doit être compatible avec le MCP et ne doit subir ni oxydation, ni ramollissement ou toutes autres dégradations.
- ❖ le conteneur de conditionnement doit assurer une parfaite étanchéité quand le MCP change de l'état solide à l'état liquide, le liquide ayant une faible viscosité le taux de fuite se trouvant fortement augmenté.
- ❖ Le conteneur doit pouvoir résister à la dilation et au changement de volume du MCP

En phase liquide ; ce changement peut casser le conteneur si celui-ci ne peut pas absorber le changement de volume.

I.7 -Classe de MCP :

Il a plusieurs classes de MCP, les MCP plus utilisés c'est :

I.7.1-Matériaux changement de phase SP :

La création de la chaleur latente mêlée SP a conduit d'une nouvelle et innovante classe des MCP non inflammables. SP consiste en une composition unique d'hydrates de sel et de composés organiques qui rend vraiment le cycle stable sans détérioration au fil du temps [10]

I.7.2-Matériaux changement de phase RT :

Le stockage d'énergie thermique avec un matériau RT absorbe une grande quantité de chaleur

; appelée chaleur latente, à une température relativement constante. Lorsque ce processus de changement de phase est inversé, c'est-à-dire du liquide à solide ; la chaleur latente précédemment stockée est libérée [11]

I.8-Applications des MCP :

I.8.1 Le transport des produits alimentaires :

Les MCP sont utilisés dans l'industrie agroalimentaire, pharmaceutique et médicale pour limiter au maximum les variations de température que subissent les aliments, les médicaments ou les composants sensibles par exemple le cas du transport du sang. Ils se présentent principalement sous la forme de « petits sacs » plastiques contenant le matériau choisi disposé au plus près du produit à conserver [12].



Figure I.3: Les applications Transport de produits alimentaires.

I.8.2-Stockage de l'énergie thermique :

Les MCP stockent l'énergie en changeant de phase solide-liquide (fusion) puis ils restituent la chaleur par le changement de phase liquide-solide (solidification).

Un MCP connu pour cette application est l'acétate de sodium tri-hydraté ayant un point de fusion vers 58 °C. Ce matériau a été mis en œuvre dans des conteneurs déplaçables par camions pour stocker la chaleur évacuée d'incinérateurs d'ordures ménagères.

La restitution de l'énergie se fait alors à distance sur des stations équipées, à une température d'environ 50 °C [13].

I.8.3-L'industrie textile :

Les matériaux à changement de phase peuvent être appliqués dans des nombreux domaines d'application de l'industrie qui sont appropriés pour optimiser le confort thermophysique de vêtements, de couette à matelas, de sacs de couchage.

Il devient alors particulièrement important de trouver des matériaux dont les températures de fusion et de cristallisation sont très proches de la température superficielle du corps humain [12].

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

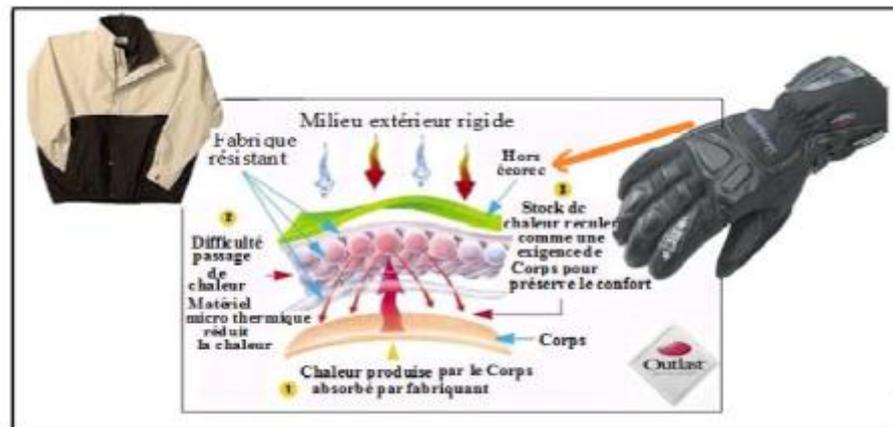


Figure. I.4: L'efficacité de MCP dans les textiles.

I.8.4 - Application aux bâtiments :

L'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) en vue du stockage de chaleur dans les bâtiments a été l'une des premières applications pour ces matériaux. Les premiers panneaux de construction de bâtiment contenant les MCP sont réalisés au Mexique par Wright et Balcomb[14]. Actuellement, la majorité des études concernant les matériaux à changement de phase (MCP) sont orientés vers :

_ Leur utilisation, lorsqu'ils sont intégrés à l'enveloppe du bâtiment, pour des applications de chauffage.

_ Leur intégration à l'enveloppe de bâtiments à faible inertie thermique dans le but d'améliorer le confort d'été.

L'utilisation des MCP pour chauffer ou refroidir un bâtiment, peut se faire de trois façons différentes [15].

- ✓ intégration dans les murs du bâtiment ;
- ✓ intégration dans les éléments de constructions autres que les murs ;
- ✓ intégration dans les unités de stockages à chaud et/ou à froid.

L'intégration de matériau à changement de phase (MCP) dans l'enveloppe d'un bâtiment constitué une solution pour améliorer la performance thermique de celui-ci, notamment en termes de confort d'été.

I.8.5 Applications médicales :

Dans le secteur médical, une des applications principales est le transport de sang Fig. 2.6 et organes. Récipients usagé pour ce travail des buts semblable à ceux expliqués avant. D'autres applications médicales peuvent être des coussin et chauds ou froids pour traiter la douleur locale dans le corps [12].



Figure I.5. Récipients contenant sang et des organes qui contiennent MCP.

II.1.Introduction :

Le stockage d'énergie est l'action qui consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure. Le stockage de l'énergie est un des principaux thèmes de recherche développé en énergétique. Il est aussi un des moyens les plus adaptés à la modulation d'une source variable comme c'est le cas avec le soleil.

II.2. Stockage de l'Énergie :

Le stockage d'énergie est l'action qui consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure. Le stockage de l'énergie est un des principaux thèmes de recherche développé en énergétique. Il est aussi un des moyens les plus adaptés à la modulation d'une source variable comme c'est le cas avec le soleil.

II.3. Différentes types de stockage :

L'énergie peut être stockée par différentes options:

II.3.1. Le Stockage de l'énergie thermique:

En général, et les matériaux à changement de phase en particulier, ont été un sujet principal dans la recherche au cours des 20 dernières années, mais bien que l'information est quantitativement énorme, il est également largement répandu dans la littérature, et difficile à trouver.

II.3.1.1. Différentes méthodes de stockage de l'énergie thermique:

Le stockage de l'énergie thermique peut être réalisé à travers trois phénomènes différents : chaleur sensible, chaleur latente et stockage par réaction chimique.

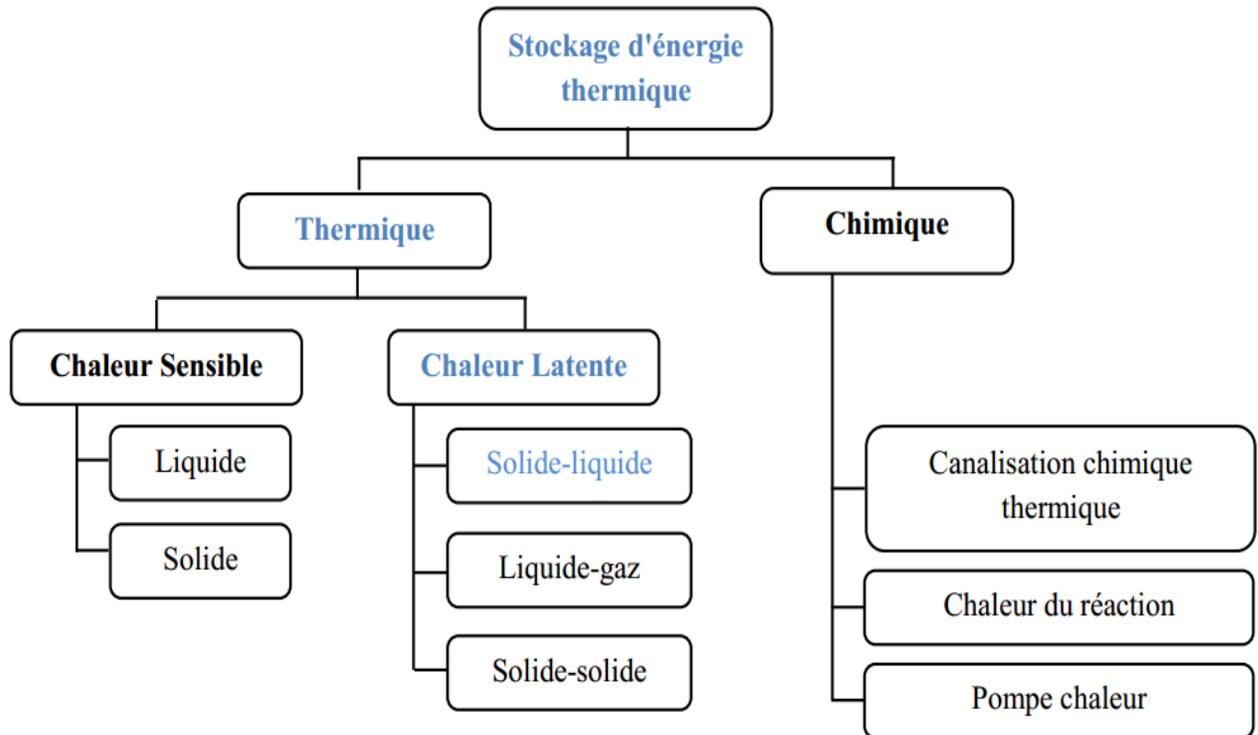


Figure II.1 : Principales techniques de stockage de l'énergie thermique [16].

Parmi les applications usuelles du stockage thermique on peut citer [17]:

- la récupération dans les installations industrielles de la chaleur perdue pendant la durée de leur fonctionnement pour l'utiliser ultérieurement pour d'autres besoins.
- Le stockage sous forme thermique du surplus d'énergie électrique produite pendant les heures creuses pour couvrir des besoins qui auraient nécessités le recours à la consommation d'énergie pendant les heures de pointes où les appels en puissance peuvent dépasser les capacités des centrales.
- Le stockage de l'énergie frigorifique en froid industriel et en climatisation quand la capacité libre de production de froid en heures creuses peut être utilisée pour couvrir les besoins lors de pointes de consommation, comme dans le cas de la gestion de l'énergie électrique.
- Le stockage de l'énergie produite dans les systèmes solaires passifs pendant le jour ensoleillé pour l'utiliser pendant la nuit ou dans une autre période.
- le refroidissement des circuits électroniques ou le fonctionnement en transitoire des circuits électroniques nécessite généralement des puissances de refroidissement bien supérieures aux puissances nominales qui conduisent à sur-dimensionner les circuits, leurs alimentations et leur système de refroidissement.

A. Stockage Thermique par chaleur sensible :

Dans le stockage de chaleur sensible de l'énergie thermique est stockée en élevant la température d'un solide ou d'un liquide ; la température du matériau de stockage varie avec la quantité d'énergie stockée.

Les cycles de stockage et de récupération de la chaleur accumulée, peuvent être répétés plusieurs fois en utilisant le système de stockage de chaleur sensible sans aucun problème. C'est le plus important avantage de cette méthode. Dans ce système, la quantité de chaleur dépend de la capacité calorifique du support de stockage, du changement de température et de la masse du matériau de stockage. La chaleur sensible peut être stockée à l'aide d'un lit de roches ou galets, dans le sol, la brique, le sable, l'eau, l'huile et l'air.

Cependant, l'exigence d'un volume important du support de stockage peut être considéré comme un inconvénient pour ce système.

L'expression de la chaleur sensible pouvant être stockée découle du premier principe de la thermodynamique

$$Q_{stock\acute{e}} = m \cdot C_p \cdot \Delta T = m \cdot C_p (T_f - T_i) = m(h_f - h_i) \quad (\text{II.1})$$

Avec :

Q stockée : la chaleur sensible (J)

m: la masse du matériau de stockage (kg)

C_p : la chaleur massique du matériau (J.kg⁻¹K⁻¹)

ΔT: la différence entre températures moyennes finale et initiale (K)

Les critères de choix des matériaux pour le stockage par chaleur sensible sont les suivants :

- Chaleur spécifique élevée.
- Stabilité à long terme avec cycles thermiques.
- Compatibilité avec son contenant.
- Faible coût.

B. Stockage thermique par chaleur latente :

Dans le stockage par chaleur latente, l'énergie est emmagasinée grâce au changement d'état d'un matériau de stockage. La chaleur latente est la quantité de chaleur absorbée ou restituée par un matériau lors de son changement de phase, à température et pression constantes. Elle s'exprime ainsi :

$$Q_{Latente} = m \cdot L_f \quad (\text{II.2})$$

Avec :

m : la masse du matériau de stockage (kg).

L_f : la chaleur massique de changement d'état du matériau (J.kg⁻¹).

Dans le stockage par chaleur latente, l'énergie est stockée sous la forme d'un changement d'état du matériau de stockage (fusion ou vaporisation). L'énergie stockée dépend alors de la chaleur latente et de la quantité du matériau de stockage qui change d'état. La capacité du stockage de systèmes du stockage de la chaleur latents est influencée par: **[18]**

- Pèsent de moyen du stockage de la chaleur.
- Chaleur spécifique dans phase solide et liquide.
- Différence entre la température initiale et température de fusion.
- Différence entre température de fusion et température finale.
- Chaleur spécifique de fusion.

Dans le cas d'un changement d'état (fusion), la quantité de chaleur mise en jeu s'écrit:

$$Q = M \times (h_f - h_i) = M \times \Delta h_f \text{ (J)} \quad \text{(II.3)}$$

Où Δh_f est l'enthalpie spécifique de fusion.

h_i : l'enthalpie massique initiale [j/kg] ;

h_f : l'enthalpie massique finale [k/kg] ;

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

$$Q = M \times (h_f - h_i) = M \times C_p \times (T_f - T_i) + M \times \Delta h_f \text{ (J)} \quad \text{(II.4)}$$

$$Q = m [C_{solide} (T_{final} - T_{initial}) + L + C_{liquide} (T_{final} - T_{initial})] \quad \text{(II.5)}$$

Avec :

T_i : la température initiale [°k] ;

T_f : la température finale [°k] ;

C. Stockage thermochimique :

L'énergie thermochimique est la chaleur absorbée ou libérée au cours d'une réaction chimique endothermique ou exothermique. Le stockage d'énergie thermochimique est basée sur l'énergie des liaisons des composés chimiques mise en jeu au cours des réactions chimiques réversibles [19].

Dans ce système, la capacité de stockage de chaleur est généralement élevée parce qu'une énergie chimique élevée se produit au cours de la rupture et de la recombinaison des liaisons moléculaires dans une réaction chimique réversible [20].

Ce système est plus compliqué que le stockage de la chaleur sensible et latente. Pour ce système, la réaction chimique doit être réversible et les composés chimiques utilisés doivent être inoffensifs et non corrosifs.

II.3.1.2 Les avantages du stockage par chaleur latente :

Par rapport au stockage par chaleur sensible, les principaux avantages du stockage par chaleur latente peuvent être résumés ainsi:

- La chaleur latente est beaucoup plus importante que la chaleur sensible (pour un écart de température pas trop important).
- Les matériaux utilisés, dans la gamme des températures de confort en thermique du bâtiment (20 à 30°C), peuvent stocker de 5 à 14 fois plus de chaleur que les matériaux de stockage à chaleur sensible.
- Quand la décharge d'énergie thermique a lieu, la température de la surface de MCP reste proche de la valeur de la température de changement d'état. On a donc un contrôle passif de la température de la surface. La quantité d'énergie de la décharge ne dépend donc que de la température de l'environnement.
- Le stockage par chaleur latente ne pose pas de problème de surchauffe saisonnière grâce à sa faible masse.

II.3.2 Stockage chimique :

Le stockage d'énergie par réactions chimiques est un procédé lors duquel les molécules d'adsorbat sont fixées par liaison covalente à la surface de l'adsorbant provoquant l'irréversibilité du mécanisme. Ce type de stockage consiste par exemple à utiliser l'énergie

solaire pour initier une réaction chimique endothermique. La chaleur est stockée au sein du système et peut être restituée souvent à l'aide d'un catalyseur.

II.3.3. Stockage mécanique :

Stockage sous forme potentielle :

L'énergie est stockée sous forme d'un fluide (eau ou air comprimé).

Stockage sous forme cinétique : Exemple : Stockage par volant d'inertie.

II.3.4 Stockage thermochimique :

Les systèmes thermochimiques comptent sur l'énergie absorbée et libérée dans la rupture et la réformation des attaches moléculaires dans une réaction chimique complètement réversible

$$Q_r = a m \Delta h_r \text{ (II .6)}$$

Cette technologie est à l'heure actuelle encore en développement, toutefois il est intéressant de connaître ses principales caractéristiques. L'utilisation principale de ce système reste le stockage de l'énergie solaire.

II.3.5 Stockage électrique :

Photovoltaïque (batteries, accumulateur) Stockage à très basse température : supraconducteurs magnétiques (stockage électromagnétique).

II.3.6. L'amélioration des transferts thermiques dans les MCP :

II .3.6.1. Les échangeurs à ailettes :

L'amélioration des transferts thermiques par l'ajout d'ailettes se décompose en deux facteurs. Le premier est l'augmentation de la surface d'échange et le second est la diminution de la distance caractéristique de solidification. Les différents types d'ailettes sont représentés dans la figure ci-après (Figure II .2).



Figure II.2 : Récapitulatif des différents types d'ailettes.

II 3.6.2 Les mousses métalliques :

Récemment, plusieurs publications ont mis en avant l'intérêt des mousses métalliques³⁹, à forte porosité et à pores ouverts (Figure II .3, a), comme media d'échange d'énergie thermique dans les systèmes de stockage par matériau à changement de phase [21-22]. En comparaison d'un système à ailettes, les mousses métalliques permettent un allègement de la structure (moins de matière) tout en augmentant la surface d'échange. Par conséquent les systèmes thermiques utilisant des mousses métalliques ont une meilleure densité énergétique (moins de métal, donc plus de MCP). Par ailleurs, la mousse est poreuse et ne va jamais bloquer complètement les échanges par convection naturelle, bien qu'elle les réduise en occasionnant des pertes de charges.

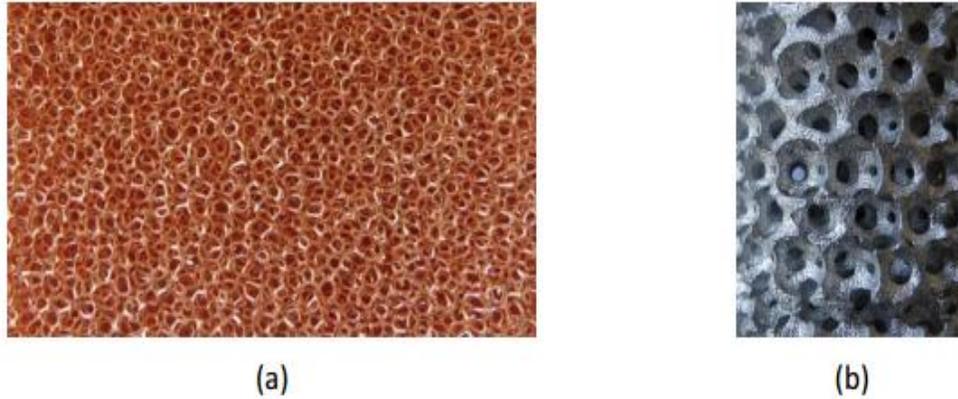


Figure II .3 : mousses métalliques stochastiques en cuivre (a) et régulière en aluminium (b)

II .3.6.3 Le graphite expansé:

Le graphite expansé est obtenu en immergeant des flocons de graphite dans un bain d'acide chromique puis d'acide sulfurique. Le graphite expansé peut alors être utilisé tel quel ou être compacté en feuille de graphite (comme ça a été le cas dans le projet DISTOR mentionné précédemment) .Les performances thermiques obtenues en mélangeant un MCP avec du graphite expansé dépendent à la fois de la fraction massique de graphite, mais aussi de la densité du graphite expansé utilisé. Le matériau composite ainsi obtenu subit un changement de volume proportionnel à la fraction de MCP imprégné et permet, en parallèle, un maintien physique du MCP dans les pores, même lorsque celui-ci est liquide. Quelques exemples d'utilisation de graphite expansé sont donnés dans le tableau ci-après (Tableau II .1). Même si les performances thermiques des matrices en graphite expansé sont bonnes, le facteur de capacité de l'échangeur est faible du fait de l'important volume dédié au graphite. Le MCP ne représente, au mieux, que 50 % du volume utile.

Tableau II .1 : Exemples de composites de MCP et graphite expansé [23]

MCP	Densité du composite	Fraction massique EG	Fraction volumique EG	λ_{eff} [w/m/k]
NaNO	1,69	20%	35%	7
LiNO ₃ /KCl[166]	1	10%	55%	5
		20%	60%	9
		30%	65%	13
KNO ₃ /NaNO ₃ [168]	0,52	30%	77%	20
PARAFFINE [88]	0,88	25%	15%	22

II .3.6.4 L'intensification des transferts thermiques à l'intérieur du tube :

Jusqu'ici les ailettes/structures/méthodes présentées sont des améliorations externes uniquement : elles sont situées autour du tube. Pratiquement, dans un système à tubes et calandre, les deux résistances thermiques principales sont la résistance thermique de convection à l'intérieur du tube et la résistance thermique de conduction/convection dans le MCP. Augmenter la conductivité thermique effective dans le MCP n'a pas de sens si la limitation thermique principale est dans le tube, au niveau de l'écoulement du fluide caloporteur. Il faut donc trouver un compromis dans la réduction des différentes résistances thermiques.



Figure II .4 : Tubes Wieland à structuration interne

Il peut s'avérer nécessaire d'avoir recours à des structures d'amélioration des transferts thermiques qui sont internes au tube (Figure II .4). Comme évoqué précédemment, le filage d'un métal permet d'obtenir des tubes profilés à structuration interne et/ou externe.

Une alternative est de réaliser d'une part les tubes et d'autre part les profils en aluminium. Les profils sont, par la suite, rapportés et liés aux tubes. Cette seconde solution est privilégiée pour les géométries complexes (plusieurs corps fermés) qui sont difficiles à obtenir par filage [24]. D'autres solutions consistent à rajouter des inserts à l'intérieur des tubes. Il peut s'agir de tabulateur (ruban torsadé ou ressort) ou de réducteur de section. L'utilisation de tubes corrigés (Figure 2.5) pour augmenter la surface d'échange et casser la couche limite en proximité de la paroi est aussi une possibilité.



Figure II .5: Tubes Wieland à structuration interne et externe

II.4 Quelques phénomènes ayant un impact sur l'efficacité du stockage

❖ La surfusion:

Quand on refroidit un liquide, on n'observe pas en général la solidification au moment où on atteint la température de fusion. Le matériau peut rester à l'état liquide jusqu'à plusieurs dizaines de degrés au-dessous de la température de changement d'état. Lorsque la solidification se déclenche, elle dégage de la chaleur et si la masse de liquide est assez grande et les échanges de chaleur avec l'extérieur faibles le déclenchement de la solidification provoque une remontée de la température du matériau jusqu'à la température de changement d'état. En effet, la décharge de la chaleur (pendant la solidification) a lieu à des températures inférieures de celles où le stockage de cette chaleur a eu lieu. On a donc une différence entre la chaleur absorbée pendant le chauffage et celle restituée pendant le refroidissement [25]

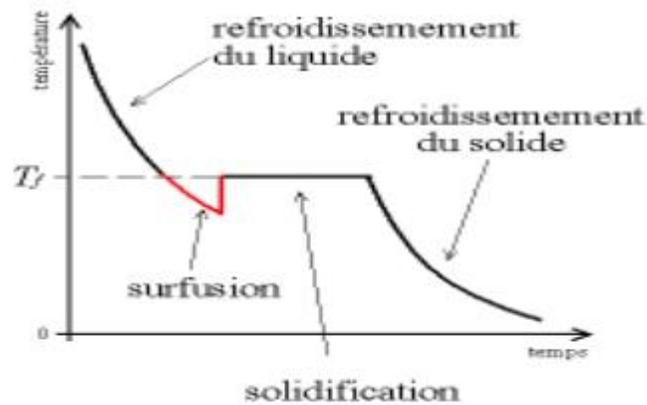


Figure II.6: Représente le phénomène de surfusion.

❖ La surchauffe

La surchauffe d'un corps est le réchauffement de ce corps après son changement d'état (réchauffement de la phase liquide après la fusion du corps, de la phase vapeur après la vaporisation du corps). Si cette surchauffe s'effectue pendant une courte durée, elle n'est considérée que comme une chaleur sensible supplémentaire stockée dans le système. Si elle s'effectue pendant une longue durée, le stockage par chaleur latente perd l'essentiel de ses avantages par rapport au stockage par chaleur sensible [25]

❖ La dilatation

Pendant le changement de phase de solide à liquide, le matériau change de densité et donc de volume. Ceci peut poser problème dans quelques applications en particulier quand on utilise un conteneur fermé qui doit supporter l'augmentation de pression [25].

II.5-Synthèse bibliographiques sur le stockage thermique par MCP:

Le stockage est un moyen très important pour une gestion optimale de l'énergie thermique. Il permet en effet d'adapter la production aux besoins et de créer les conditions les plus favorables à cette gestion en réalisant une relation constante entre l'énergie demandée et l'énergie fournie. Le stockage thermique par changement de phase est une technologie innovante et prometteuse en matière d'économie d'énergie. C'est un domaine de recherche relativement nouveau et qui a débuté avec le *Dr. Telkes* dans les années 40

Dans ce cadre, des multiples études traitaient ce genre de problème afin d'améliorer leur performances.

La première application d'un PCM décrite dans la littérature était leur utilisation pour le chauffage et la climatisation dans les bâtiments, par *Telkes (1975) [1]*, et *Lane (1983) [2]*.

Fouzi BENMOUSSA et al[26] ont présenté une analyse numérique du phénomène de transfert thermique pendant le processus de charge et de décharge d'un système de stockage thermique par chaleur latente LTES constitué de deux tubes concentriques. Le système est composé d'un récipient contenant des tubes dans lesquels l'écoulement du fluide caloporteur HTF circule. Le MCP (paraffine) remplit l'espace entre le récipient et les tubes. Dans leur étude une comparaison quantitative a été développée, sous l'effet de plusieurs conditions variables, l'effet de la vitesse, de la température d'entrée du fluide caloporteur HTF (Heat Transfer Fluid) et des paramètres géométriques sur le temps du processus de fusion, le taux de stockage thermique et la fraction de fusion du PCM (Phase Change Material). ses résultats prouvent que bien que l'augmentation de la vitesse d'entrer du fluide caloporteur ainsi que sa température puisse augmenter le taux de fusion du PCM et améliorer les performances de l'unité LHS. L'effet de la géométrie est plus faible.

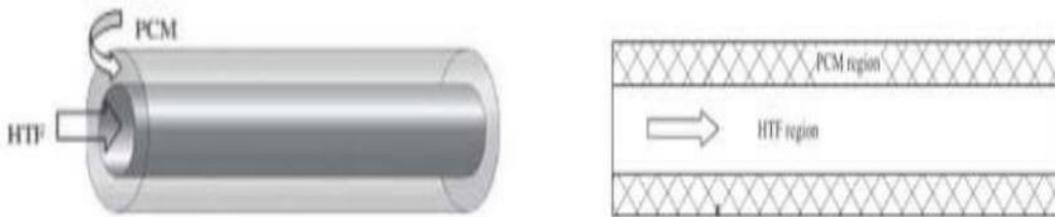


Figure II.7: Schémas du système de stockage et du modèle physique étudié.

M.J. Hosseini[27] ont réalisé une étude expérimentale comme la figure ci-dessous indique et numérique combinée, dans le but de comprendre le rôle de la convection induite par la flottabilité lors de la fusion de matériaux à changement de phase (MCP) rempli à l'intérieur d'Un tube d'un échangeur de chaleur comme la figure ci-dessous indique.

Une série d'expériences est menée pour étudier l'effet de l'augmentation de la température d'entrée du fluide caloporteur (HTF) sur le processus de charge (fusion) du PCM. Les calculs sont basés sur une procédure numérique itérative de volume fini. Il a été observé à partir des résultats expérimentaux que la fusion est apparue à différents moments à des positions proches du tube HTF et progressant à différents taux vers l'extérieur de l'échangeur. Les résultats des calculs

montrent qu'en augmentant la température de l'eau d'entrée à 80 °C, le temps de fusion total est réduit à 37 %.

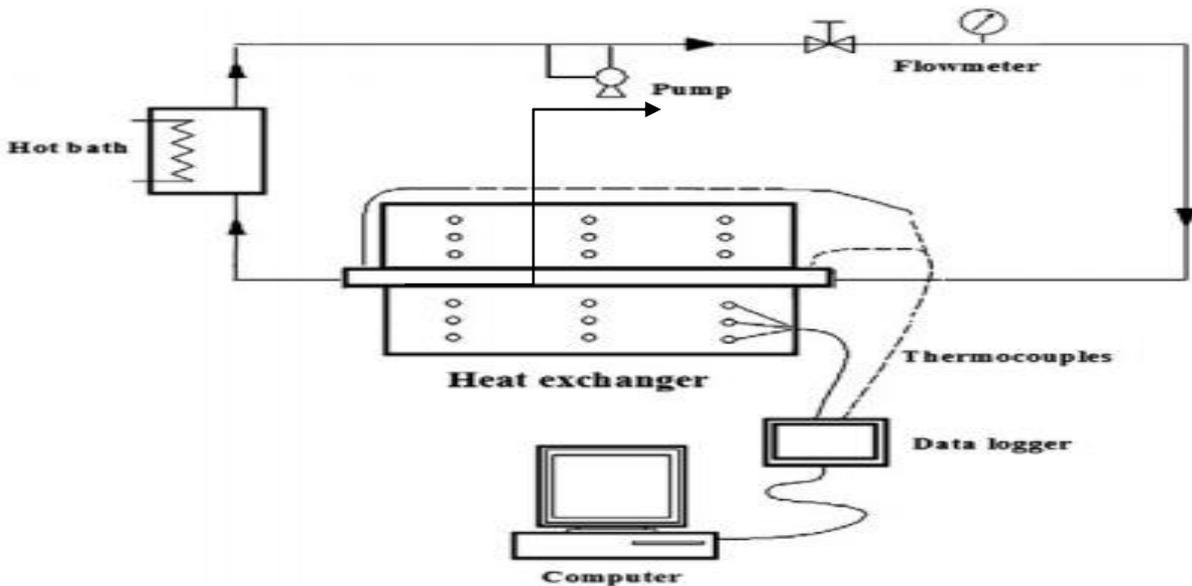


Figure II.8 : Schéma du montage expérimental

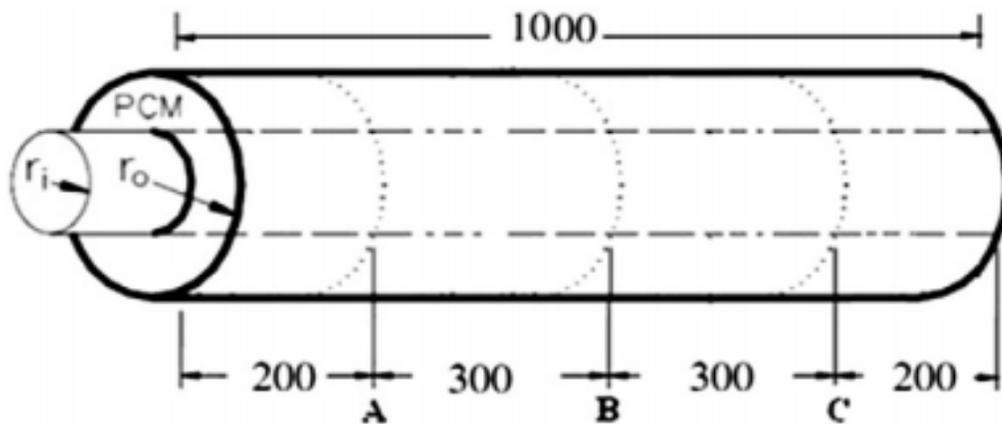


Figure II.9:localisation desThermocouples dans le système de stockage

Ainsi M.J. Hossein[28] ont étudié numériquement et expérimentales Une série les effets de l'augmentation de la température d'entrée du fluide caloporteur (HTF) sur les processus de charge et de décharge deMCP. Les résultats expérimentaux montrent que lorsque en augmentant la température d'entrée du HTF de $T_H = 70\text{ °C}$ à 75 et 80 °C, l'efficacité théorique de processus

charge et de décharge passe respectivement de 81,1 % à 88,4 % et de 79,7 % à 81,4 %. Comme (la figure (II.10)) indique l'énergie accumulée ou gagnée par l'eau pendant le processus de charge (a) et de décharge (b) en fonction du temps

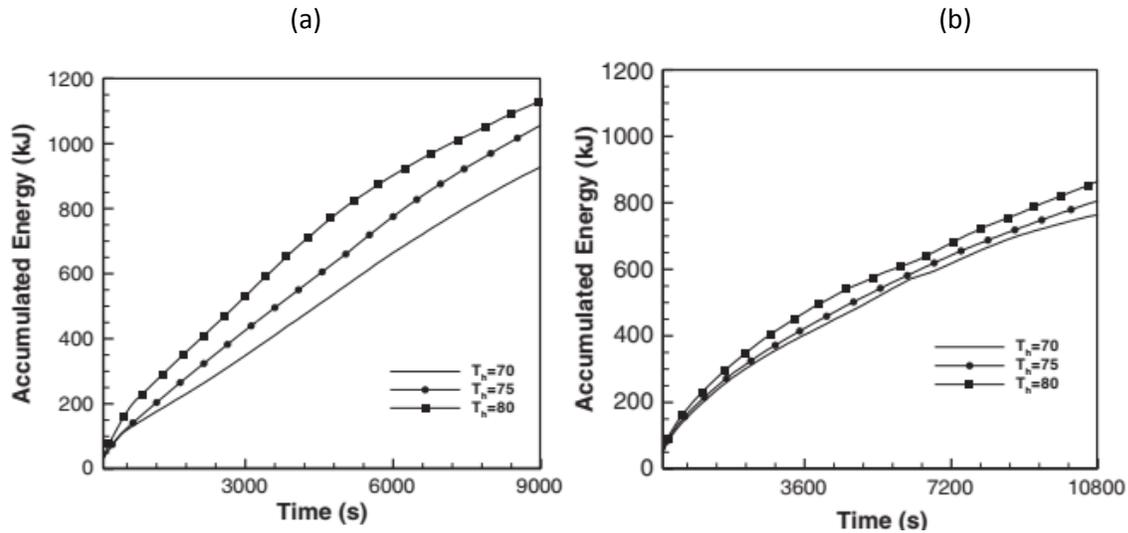


Figure II.10: Evolution de l'énergie accumulée pendant le processus de charge (a) et de décharge (b) MCP à différentes températures d'entrée d'eau.

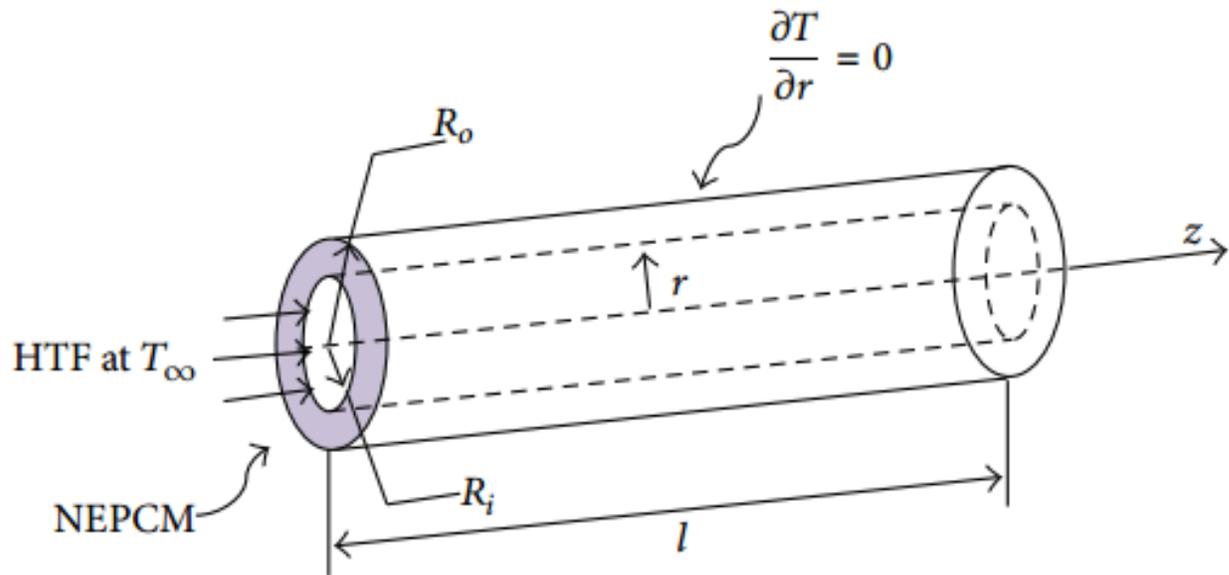


Figure II.11 : Schéma du modèle physique.

Khodadadi et Hosseinizadeh [29] 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.

Ahmed.h et al[16] 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 (PCM). Cet échangeur a été comparé par deux types d'échangeurs de chaleur comme la (figure II.12) 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 PCM accélère de **41 %**.

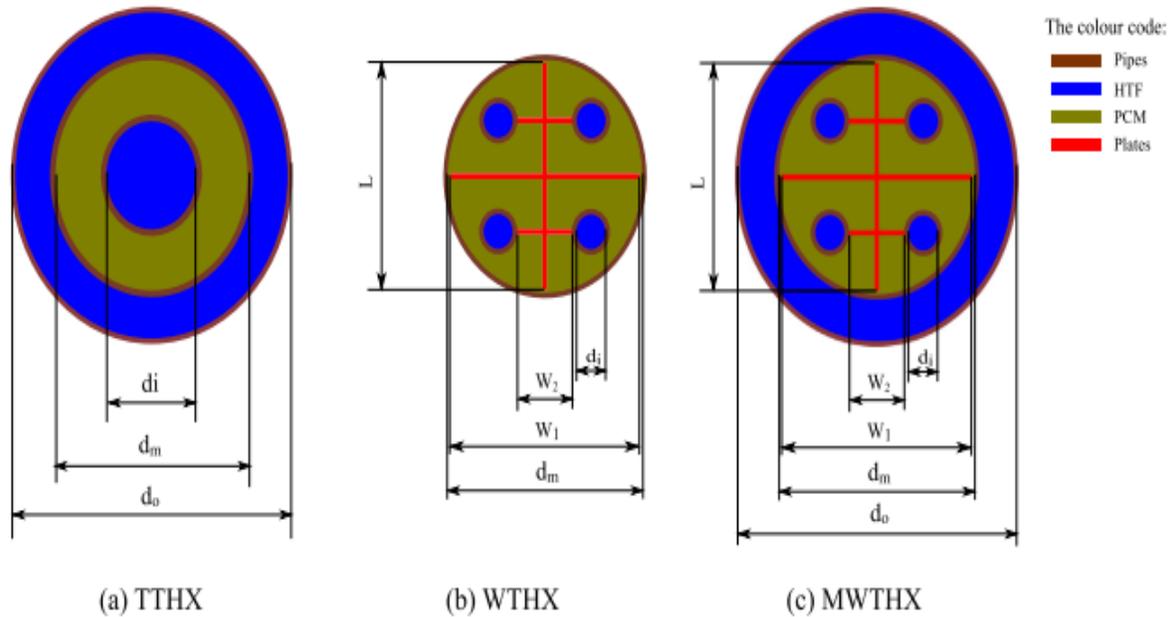
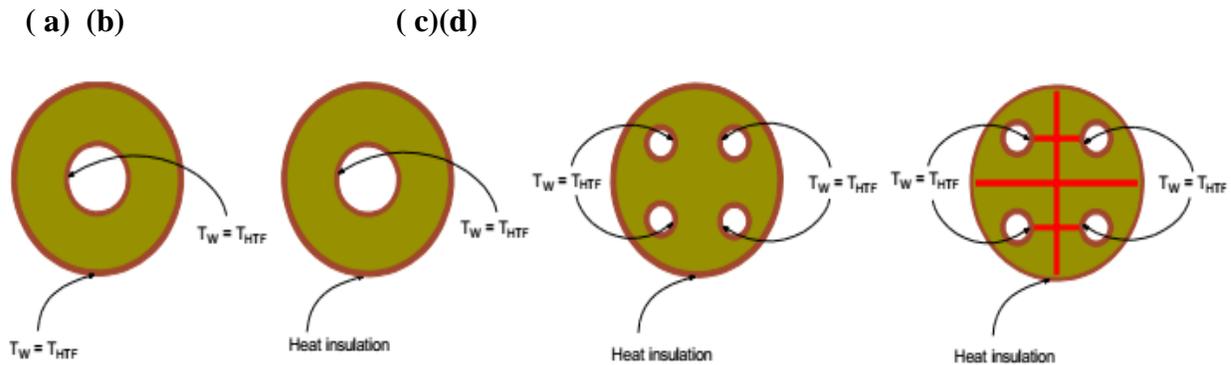


Figure II.12 : (a) échangeur de chaleur à triple tube (b) échangeur de chaleur à tubes palmés (c) échangeur de chaleur à tubes palmés modifiés.

Ainsi que Ahmed.h et al [30] 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 II.13).

Dans le modèle (a) le fluide caloporteur circule à l'intérieur et à 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 modèle (d) pour augmenter la surface de transfert de 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 modèle (d). Pendant le même intervalle de temps de 3 heures seulement environ 10 %, 30 % et 60 % de PCM est fondu lors de l'utilisation de (b), (c) et (a) respectivement.



FigureII.13 : Domaines de calcul avec les conditions aux limites indiquées.

A.Sciacovelli et al [31] ils ont fait une recherche pour améliorer les performances d'une unité LHTES à de forme tube par l'utilisation d'ailettes en forme d'arbre .car la technologie de LHTES nécessite l'augmentation de la conductivité thermique de des MCP. Ainsi, l'une utilisation à grande échelle du système LHTES dépend fortement du développement de techniques pour améliorer le transfert de chaleur entre le fluide caloporteur et le MCP. La géométrie des ailettes en forme de Y (figureII.14) est optimisée par l'utilisation de la modélisation CFD, les résultats obtenus montrent qu'une augmentation de 24 % de la l'efficacité du système peut être réaliser.



FigureII.14 : système de LHTES

Bari , s GÜREL [32] il a étudié le transfert de chaleur de fusion dans les systèmes d'échangeurs de chaleur à plaques LHTES (Latent Heat Thermal Energy Storage) numériquement, par la

méthode des volumes finis. Le processus de changement de phase a été examiné pour différentes géométries d'échangeurs de chaleur et du même volume MCP (figure II.15). Les résultats obtenus montrent que le temps de fusion complet du MCP dans un système d'échangeur de chaleur à plaques LHTES avec différentes géométries pourraient être réduit de 75 % par rapport à un système LHTES cylindrique, et la performance thermique maximale a été enregistrée pour la géométrie A.

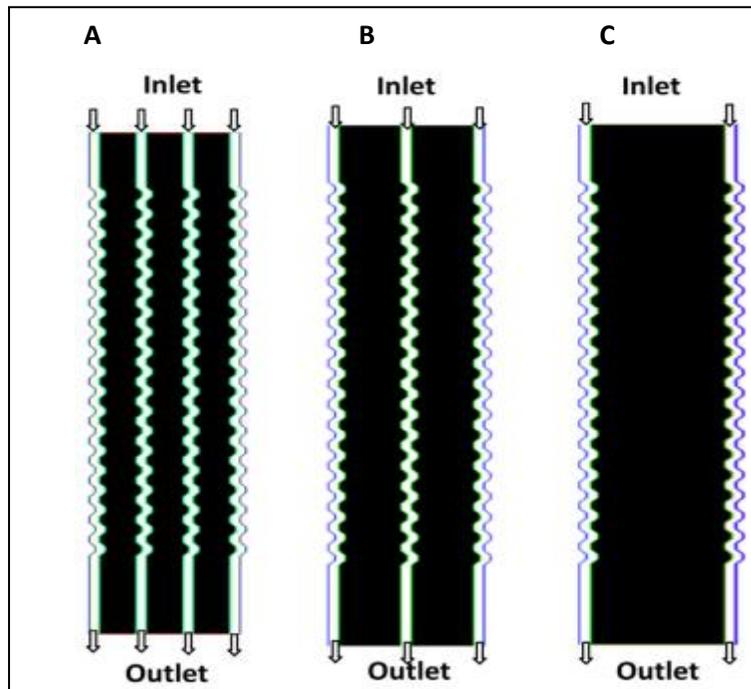


Figure II.15 : échangeur à plaques de système LHTES simplifié à 2D.

Elisa Guelpa, et al [33] ont étudié les améliorations de conception d'un système thermique à chaleur latente à tube. Utilisant une approche basée sur l'analyse de la génération d'entropie pour les systèmes à ailettes comme la (figure II.16) indique Le présent article constitue une première étude détaillée de l'évolution temporelle de la génération d'entropie survenant au cours d'un processus instable.

Les résultats montrent que le système amélioré permet de réduire le temps de solidification de MCP afin d'augmenter l'efficacité de la deuxième loi.

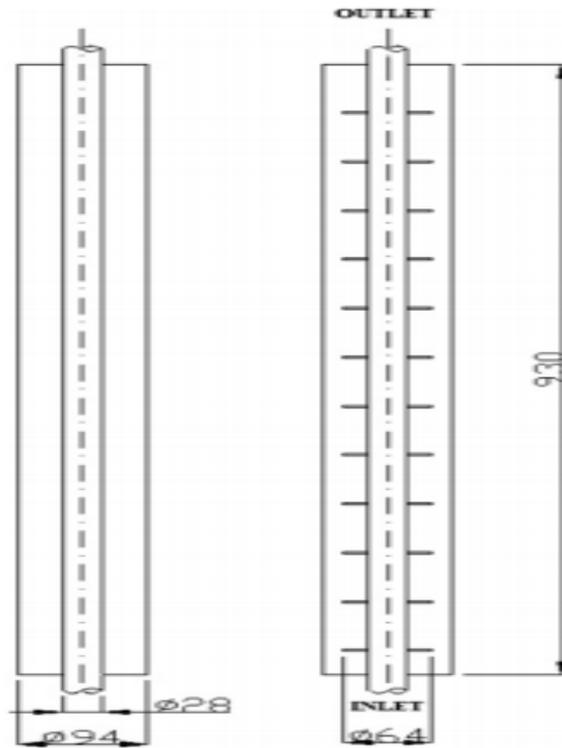


Figure II.16 : système de LHTES avec ailettes

II.6-Conclusion :

Le stockage de l'énergie thermique est à la base de toutes les applications que ce soit dans l'industrie ou dans le bâtiment.

Cette stockage d'énergie peuvent être faites avec les matières du changement de la phase (MCP), ou aussi appelé des matières du stockage de la chaleur latentes comme les Cires, les eutectiques et les hydrates salines...etc. La paraffine est considérée comme la plus utilisée en raison de ses caractéristiques telles que la grande capacité thermique, la faible température de fusion etc....

III.1-RAPPEL théorique sur le Transfer de chaleur:

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

III.1.1-Conduction:

Ce transfert de chaleur est le seul que l'on puisse rencontrer dans les solides. La propagation de la chaleur s'effectue d'atome en atome, de proche en proche, par transmission d'énergie d'agitation thermique. En milieu solide les atomes, dont les positions d'équilibre sont fixes dans l'espace. Transfèrent de la chaleur sans déplacement de matière

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier. Le flux de chaleur est proportionnel au gradient de température.

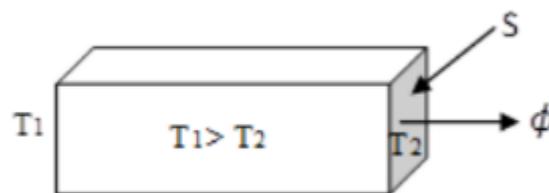


Figure III.1 : Schéma de transfert de chaleur conductive dans une barre.

$$\phi = -\lambda S \frac{dT}{dx} \text{ (III.1)}$$

ϕ : Puissance transférée (W)

S : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m²)

x : Variable d'espace dans la direction du flux.

Le signe (−) dans l'équation est dû au fait que le flux de chaleur circule dans le sens opposé au gradient de température.

λ : Conductivité thermique du matériau en W.m⁻¹.K⁻¹

III.1.2- Convection :

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

Le transfert de chaleur s'effectue en 2 phases:

- 1ère phase : la chaleur est échangée par conduction entre la surface solide et une mince couche de fluide (appelée "film"), au voisinage de la surface.
- 2ème phase : le fluide du film est déplacé dans la masse du fluide ; ce déplacement du fluide est, soit naturel (variation de la masse volumique du film chauffé ou refroidi, par rapport celle du fluide en masse), soit artificiel (action d'une pompe, d'un agitateur). On parle alors soit de convection naturelle, soit de convection forcée

Donc, le transfert de chaleur par convection est provoqué par le déplacement d'un fluide, qui transporte avec lui l'énergie qu'il contient.

Quelle que soit le type de convection (libre ou forcée) et quelle que soit le régime d'écoulement du fluide (laminaire ou turbulent), le flux de chaleur transmis est donné par la relation dite loi de Newton.

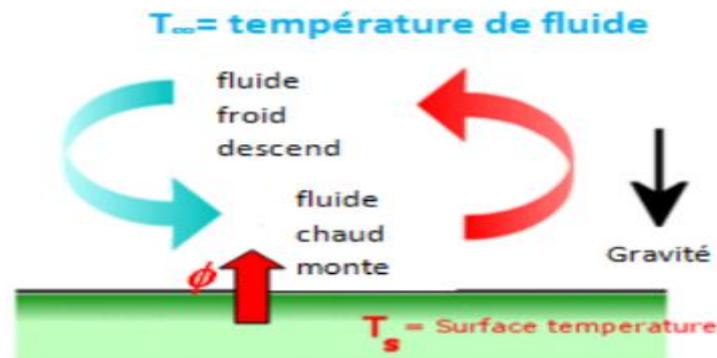


Figure III.2 : Mécanisme de la convection.

$$\phi = hS(T_s - T_\infty) \text{ (III.2)}$$

Φ : Puissance transférée (W)

S : Surface traversée (m²)

T_s : Température de la surface (K)

T_∞ : Température moyenne du fluide (K)

h : Coefficient moyen de transfert convectif (W/m²K)

III.1.3- Rayonnement:

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

Le rayonnement thermique correspond à un transfert de chaleur ne nécessitant aucun support matériel, c'est ainsi que la terre est "chauffée" par le rayonnement thermique du soleil qui s'est propagé dans le vide, de la surface solaire, qui l'a émis, jusqu'à la terre qui l'absorbe.

Le flux de chaleur échangé entre la surface S et l'environnement est donné par loi de Stefan-Boltzmann.

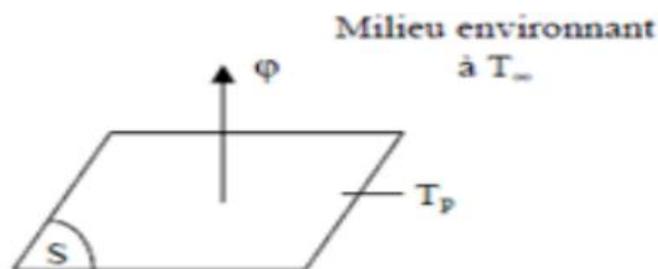


Figure III.3:transfert de chaleur par rayonnement.

$$\phi = \sigma \varepsilon S (T_s^4 - T_\infty^4) \text{ (III.3)}$$

ϕ : Puissance transférée (W°)

σ : constante de Stefan Boltzmann = $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

S : Surface traversée (m^2)

T_s : Température de la surface (K)

T_∞ : Température du milieu environnant la surface (K)

ε : Émissivité de la surface

III .2-Rappel théorique sur le processus de changement de phase :

III.2.1-Rappels sur les propriétés thermo physiques :

Dans cette partie les définitions usuelles de la conductivité thermique, de la masse volumique, de la chaleur massique, de la chaleur latente de changement de phase, de la température de changement de phase et de l'enthalpie sont rappelées.

III .2.1.1- La conductivité thermique :

Le transfert d'énergie par conduction se produit dès qu'il y a un gradient de température dans un élément matériel quelconque [13]. Les porteurs élémentaires (photons, électrons, ions et phonons) sont responsables de ce phénomène de transport.

La loi fondamentale qui décrit le processus de conduction de chaleur est basée sur des observations expérimentales et a été proposée par Joseph Fourier en 1807.

Dans le cas d'un milieu homogène et isotrope la loi de Fourier définit la densité de flux de chaleur ϕ comme étant proportionnelle au gradient de température local ΔT soit :

$$\phi = -\lambda(T) x \Delta T \quad \text{(III.4)}$$

Où $-\lambda(T)$ est la conductivité thermique en fonction de la température T qui s'exprime en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. C'est une propriété intrinsèque des matériaux qui caractérise la conduction de la chaleur dans un milieu fluide au repos ou solide.

III .2.1.2-La masse volumique :

La masse volumique ρ d'un corps pur non poreux (fluide ou solide) est définie par le rapport de sa masse M au volume V occupé par ce même corps de sorte que

$$\rho = \frac{m}{v} \text{(III. 5)}$$

III .2.1. 3-La chaleur massique :

La chaleur massique est définie par une variable qui quantifie la quantité de chaleur q nécessaire pour augmenter la température de un degré T par unité de masse m d'un corps pur monophasique [10] (liquide, solide ou gaz). D'après l'équation qui définit la première loi de la thermodynamique, si les variations d'énergies cinétique et potentielle sont négligeables, la chaleur massique est donnée par :

$$c_v = \frac{1}{m} X \left(\frac{\partial q}{\partial T} \right)_v \text{(III .6)}$$

$$c_p = \frac{1}{m} X \left(\frac{\partial q}{\partial T} \right)_p \text{(III .7)}$$

Où C_v est la chaleur massique déterminée à volume constant et C_p est la chaleur massique déterminée à pression p constante. C_v et C_p sont donnés en $J.kg^{-1}.k^{-1}$.

III .3-La chaleur latente de changement de phase :

La chaleur latente de changement de phase L est la quantité d'énergie nécessaire pour qu'un produit passe d'un niveau initial de symétrie cristalline à un nouveau niveau de symétrie cristalline : ce changement de symétrie est provoqué par le réarrangement des atomes. Selon la classification thermodynamique des transitions de phases [34], toutes les transitions liquide- solide peuvent être considérées comme étant du « premier ordre » car elles sont toutes associées à une discontinuité d'entropie correspondant à une chaleur latente de changement de phase qui est aussi le changement d'enthalpie à la transition.

Obéissant à la relation de Clapeyron, la chaleur latente de fusion L_f d'un corps pur est exprimé par :

$$L_f = T_f X \left(\frac{dp}{dT} \right) X \Delta V \text{(III .8)}$$

Où T_f est la température de fusion, ΔV est la variation de volume à la transition et e la pression.

III .3.1.La température de changement de phase :

Souvent dans la littérature [34] la température de changement de phase est considérée comme étant la température de fusion T_f . Cette démarche est adoptée dans le but de s'affranchir du problème de la surfusion phénomène lié à la nucléation lors de la solidification.

III .3.2-L'enthalpie :

L'enthalpie h est une propriété thermodynamique extensive [35] définie à partir de l'énergie interne d'un système par la relation :

$$h = u + p \times v \text{ (III .9)}$$

III .4-Théorie de la solidification-fusion :

Le changement de phase (solidification-fusion) d'un matériau est un phénomène très courant dans la nature et fait l'objet de nombreuses applications industrielles [36].

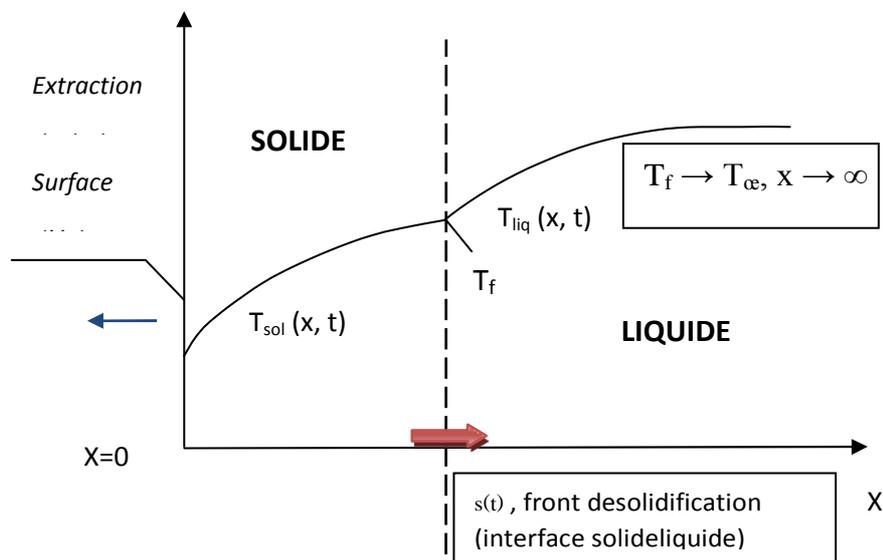
Dans cette partie le changement de phase n'est étudié que d'un point de vue exclusivement thermique. Les solutions présentées sont basés uniquement sur l'équation classique du transfert de chaleur par conduction. La solidification sera simplifiée comme étant l'inverse de la fusion. Dans ce cas, les phénomènes plus complexes comme la cinétique de cristallisation (régie par les phénomènes de nucléation et de croissance cristalline), la surfusion, les réactions chimiques et le transfert de masse ne sont pas considérés.

III .4.1-La solidification-fusion d'un produit pur :

La principale caractéristique du changement de phase d'un matériau pur est que le dégagement (ou absorption) de la chaleur latente de transformation se passe à une température bien précise [36]. Stefan a été un des premiers à étudier ce type de problème. En 1831 il a cherché à modéliser la fusion de la calotte glaciaire.

La figure (III.4) schématise la solidification d'une substance pure

(ou quasiment pure). Ici, on suppose que le processus de transfert de chaleur est dominé par la conduction seulement, bien que dans certains cas les transferts convectifs et par rayonnement peuvent jouer un rôle important. Dans cet exemple la chaleur est évacuée lentement par la surface d'échange. Sur cette figure T_0 est la température de la surface d'échange ($T_0 < T_f$) et T_f est la température du fluide loin de l'interface liquide- solide ($T_f < T_l$). On constate que la morphologie de l'interface solide-liquide est plane. Cette interface est le front de solidification. Elle se déplace en fonction du temps t au fur et à mesure que la phase solide avance et est repérée par l'abscisse $s(t)$.



La figure III.4 : Solidification d'une substance pure

III .5.-Solutions numériques du transfert de chaleur avec changement de phase:

Jusqu'à présent, les solutions analytiques disponibles dans la littérature pour résoudre les problèmes de changement de phase ne répondent qu'aux cas les plus simples (géométrie simple, conditions aux limites constantes, propriétés thermiques constantes dans chaque phase, etc.). Quand ces solutions deviennent inutilisables, dû à la complexité des problèmes réels, les solutions numériques viennent les remplacer.

Il y a deux grandes catégories de solutions numériques pour résoudre le problème de changement de phase :

- Les solutions où la position exacte du front de changement de phase doit être connu à chaque pas de temps
- Les solutions où il n'y a pas besoins de connaître la position exacte du front de transition de phase.

A- Les solutions où la position exacte du front de changement de phase doit être connue à chaque pas de temps :

La méthode du maillage mobile [37] est un exemple de ce type de solution. Dans cette méthode le pas de temps reste fixe et le pas d'espace est recalculé à chaque itération de façon que le front de changement de phase coïncide toujours avec un nœud du maillage. Une autre alternative est la méthode à maillage fixe. Dans cette méthode le pas d'espace reste fixe et le pas de temps est recalculé à chaque itération de façon à ce que le front de transition se déplace de nœud en nœud pour chaque pas de temps recalculé.

L'inconvénient de ces solutions numériques est qu'elles sont lourdes à mettre en œuvre les équations de transfert de chaleur doivent être discrétisées séparément pour chaque phase et liées par la discrétisation de l'équation du bilan d'énergie à l'interface solide-liquide.

De plus ces types de solutions ne sont applicables qu'aux cas du changement de phase de produits purs.

B- Les solutions où il n'y a pas besoins de connaître la position exacte du front de transition de phase :

La méthode du C_p apparent [38], la méthode enthalpique [39], et la méthode de Pham [38] sont quelques-uns des exemples les plus connus pour ces types de solutions. Dans ces méthodes le pas d'espace reste constant au cours du temps et le front de changement de phase peut se déplacer à l'intérieur du maillage.

En certains cas une connaissance approchée du déplacement du front de transition est nécessaire afin de permettre le calcul de corrections sur pas de temps de façon à minimiser les instabilités numériques provoquées par la discontinuité des gradients de température (non-linéarités) dans la région de changement de phase.

L'avantage de ces solutions numériques est qu'elles sont relativement simples à mettre en œuvre : le système décrit par les équations est réduit à une équation classique du transfert de chaleur. De plus ces solutions peuvent être employées tant pour le cas du changement de phase de produits purs que pour le cas du changement de phase de mélanges. Parmi les solutions citées dans le paragraphe ci-dessus la méthode enthalpique et la méthode du C_p apparent sont les plus connues. Elles sont décrites dans les deux paragraphes suivants.

III .5.1.La méthode enthalpique :

Dans les problèmes à changement de phase, la présence d'une condition limite mobile (front de changement de phase) rend difficile la mise en œuvre d'une solution numérique du système d'équations différentielles partielles de transfert de la chaleur

Est réduit à une seule équation du type :

$$\rho(T)X \frac{dH}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} (\lambda(T)X \frac{\partial T}{\partial x}) \quad (\text{III .10})$$

III .5.2. La méthode du C_p apparent

Ainsi comme dans le cas de la méthode enthalpique, la méthode du C_p apparent [40] réduit le système d'équations qui définit le processus de changement de phase en une seule équation du type:

$$\rho(T) X C_{app}(T) \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} (\lambda(T) X \frac{\partial T}{\partial x}) \quad (\text{III .11})$$

Où C_{app} est la chaleur massique apparente. Au moment du changement de phase, le dégagement (ou l'absorption) de la chaleur latente L est prise en compte par l'augmentation du C_{app} .

IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre on présente une étude de simulation numérique sur le stockage thermique par chaleur latente avec un matériau à changement de phase PCM. La simulation numérique est effectuée sur le logiciel **Fluent**. Le modèle physique étudié, est échangeur de chaleur remplis de MCP et un tube de forme 'U' est installé à l'intérieur de cet échangeur don't le but est de l'augmenter la surface d'échange entre le MCP et le HTF

Les méthodes des volumes est utilisée pour résoudre les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Le modèle est basé sur la conduction pure dans le PCM solide et la conduction plus la convection dans le PCM liquide

IV.2. Domaine de calcul et conditions aux limites :

Notre choix s'est porté sur l'étude menée par **hosseini [28]**, pour la validation de leurs résultats expérimentaux et numériques de la température moyenne de MCP en fonction de temps durant la charge et la décharge. La figure 1 montre un diagramme schématique du montage expérimental, d'une unité **LHTS** de forme tube cylindrique couvert avec une couche calorifugée est conçue pour étudier le comportement thermique d'un système de stockage de chaleur latente par le processus de fusion et de solidification, le banc d'essai se compose d'un système de contrôle et de mesure des différents paramètres de ce système.

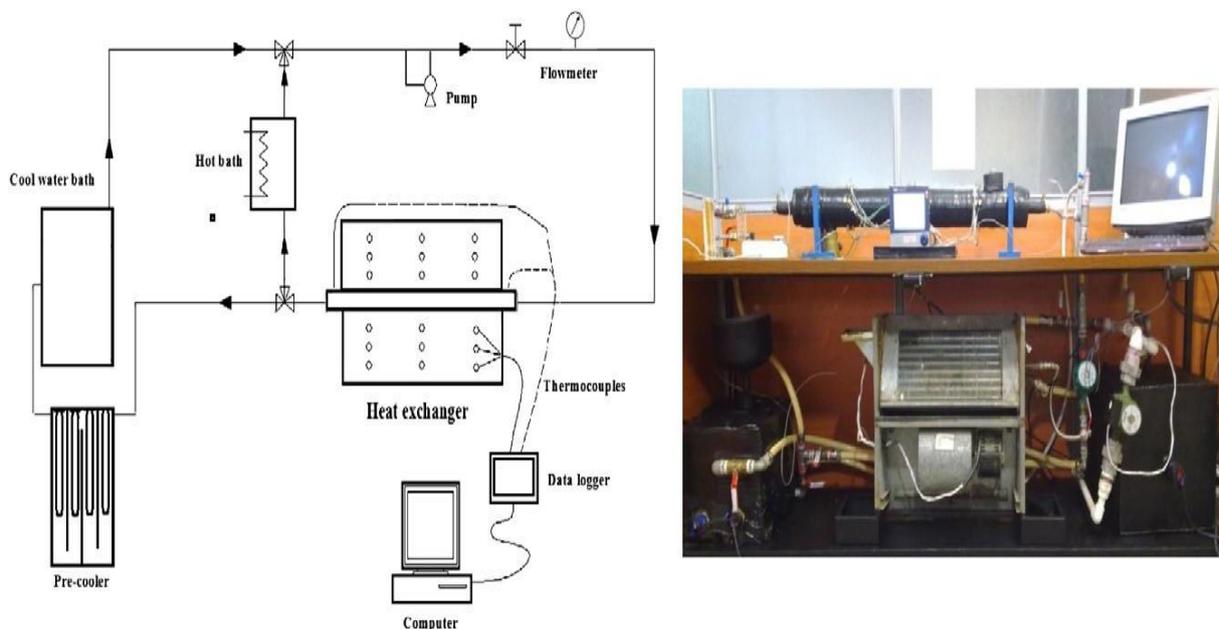


Figure IV.1 : Schéma et photographie du montage expérimental

IV .2.1. Maillage de la géométrie :

La génération du maillage ($2D$) est une phase très importante dans une analyse CFD , vu l'influence de ce paramètre sur le calcul. La génération d'une très bonne qualité de maillage est essentielle pour l'obtention d'un résultat de calcul précis, robuste et signifiant. La spécification du maillage dépend de la complexité de la géométrie et du code de simulation utilisé. Le maillage utilisé pour notre géométrie est un maillage de type quadrilatéral. il a été raffiné près des parois afin de capturer la grande variation des paramètres de convection (liquéfaction, température) dans ces régions.

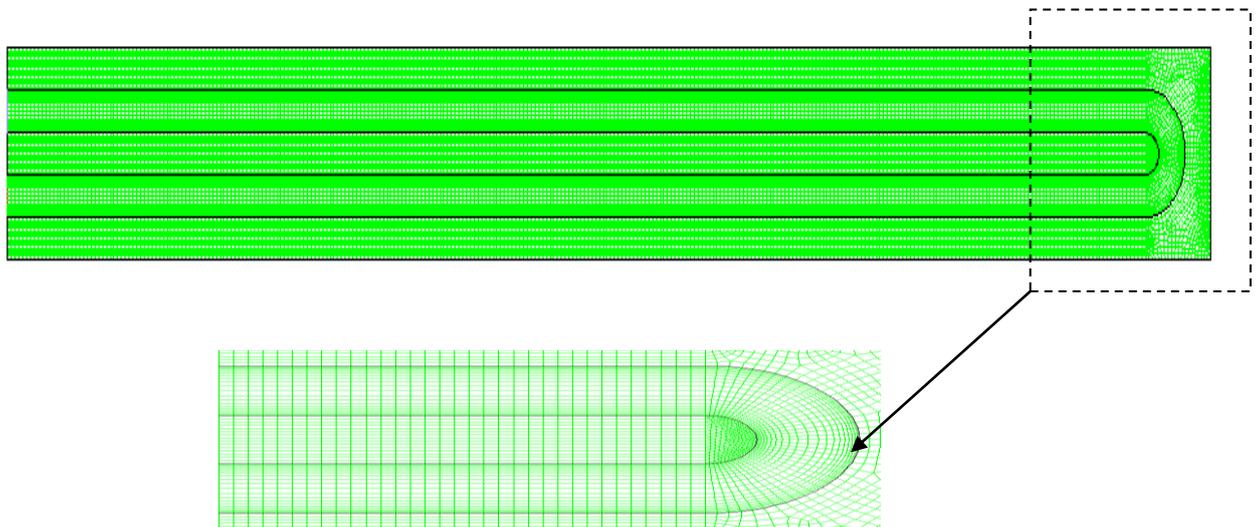


Figure IV. 2: Maillage du domaine

L'étude de la sensibilité du maillage sur les résultats des calculs est obtenue après le lancement de plusieurs simulations avec différents maillages.

Un nombre de mailles insuffisant pourra influencer les calculs (divergence ou diffusion numérique trop importante). Il faut trouver un compromis entre le nombre de mailles et le temps de calcul qui augmente considérablement avec le raffinement de la discrétisation du domaine.

Une bonne qualité de maillage repose sur les éléments suivants :

- Minimisation des éléments présentant des distorsions (skewness en anglais) ;
- Une bonne résolution dans les régions présentant un fort gradient (couches limites, ondes de choc ...etc.) ;

Enfin, la qualité de maillage à un impact important sur la convergence, la précision de la solution et surtout sur le temps de calcul.

IV.3. Procédure de résolution :

Pour simuler le changement de phase de la fusion et de la solidification dans un échangeur de chaleur à tubes, la méthode enthalpique [40] est utilisée. Compte tenu des contraintes de fusion et de solidification pour le PCM,

- L'écoulement est considéré comme in stationnaire, laminaire, incompressible et bidimensionnel.
- Le terme de dissipation visqueuse est considéré comme négligeable, de sorte que le débit incompressible et la distribution de température de l'espace sont décrits par les équations de Navier-Stokes et de l'énergie thermique, respectivement.
- Le changement de densité au sein de la phase liquide qui entraîne la convection est estimé par l'approximation de Boussinesq. [28]
- L'algorithme SIMPLE dans 2D est utilisé pour résoudre les équations gouvernantes [28]
- Le schéma QUICK est utilisé pour résoudre les équations de quantité de mouvement d'énergie [28]
- Le schéma PRESTO est adopté pour la correction de l'équation de pression. En résolvant les équations gouvernantes à chaque pas de temps, [28]
- Une disposition de 29139
- Grilles s'avèrent suffisantes pour la présente étude.
- Le pas de temps dans les calculs est 1s et le nombre d'itérations pour chaque pas de temps est de 20

IV.4. Validation du model :

Validation du code commercial ANSYS Fluent :

Afin de voir la capacité du code 15.0 prédite les écoulements multi phase, on a commencé par la validation avec des travaux antérieurs note choix porté sur les travaux de [28]

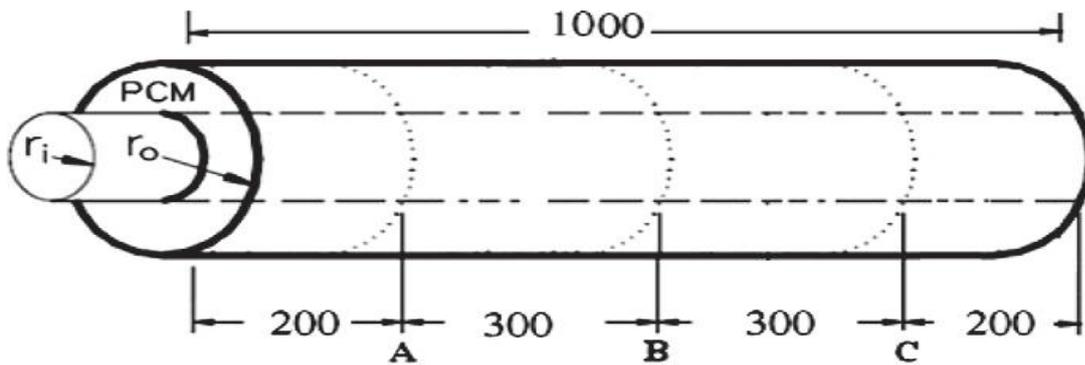


Figure IV.3 : Localisation des Thermocouples dans le système de stockage

IV.5. Critère de convergence :

Le code "ANSYS Fluent" cessera les itérations une fois tous les résidus calculés soient sous la valeur du critère de convergence entrée par l'utilisateur. Cette valeur est à fixer selon le degré de précision désiré de la solution approchée par le code de calcul. La convergence des résidus vers la valeur fixée est montrée dans la figure (2.6). Dans notre, la valeur de 10^{-6} a été prise.

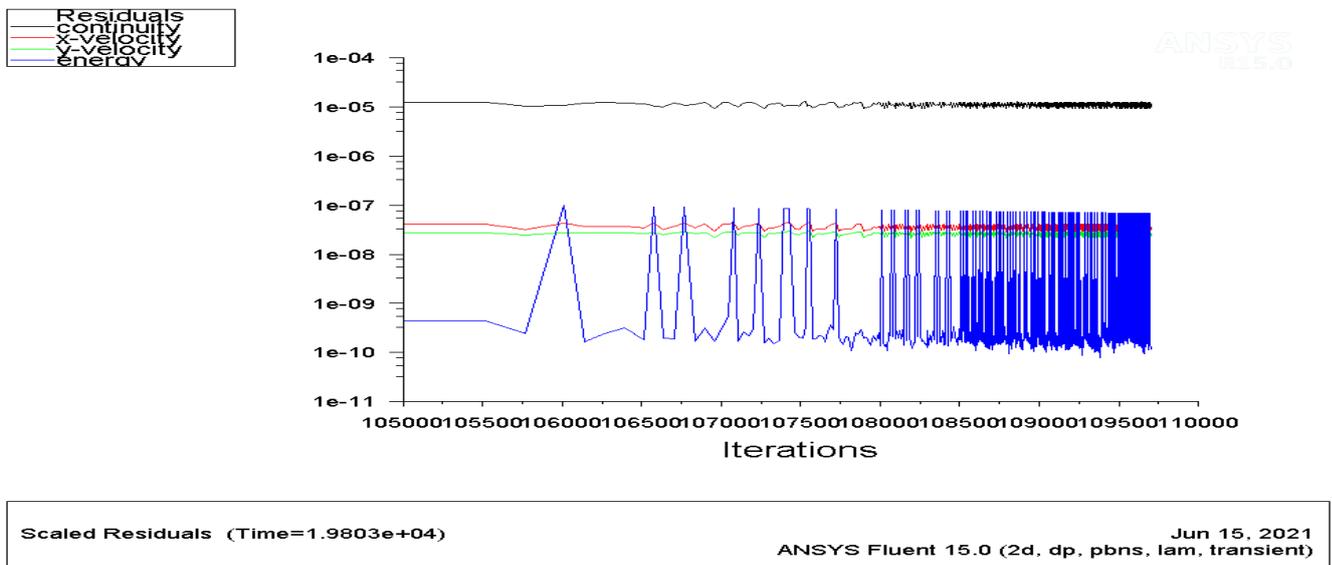


Figure IV.4 : Tracés des courbes de résidus

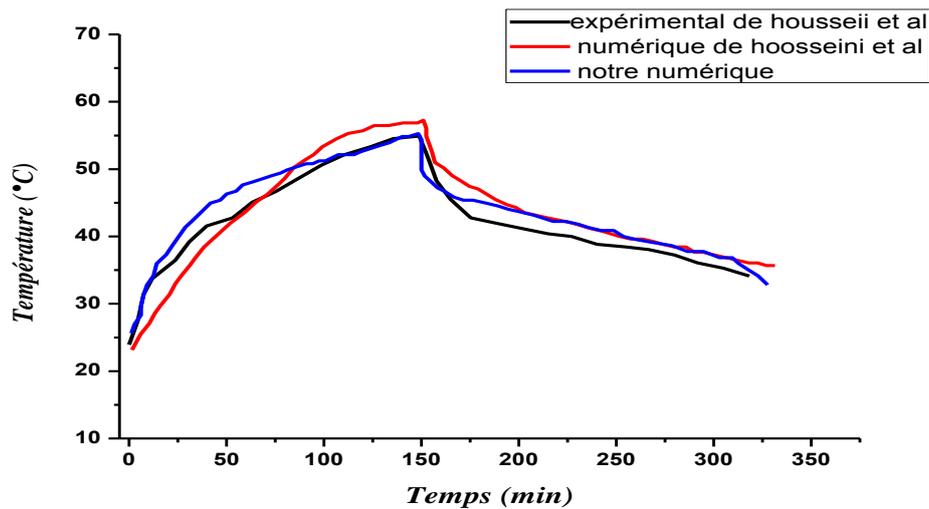


Figure IV.5: Comparaison entre la température moyenne de MCP de notre numériques et expérimental de [28].

Pour améliorer on a choisi le tube en U comme montre la figure(IV.6) :

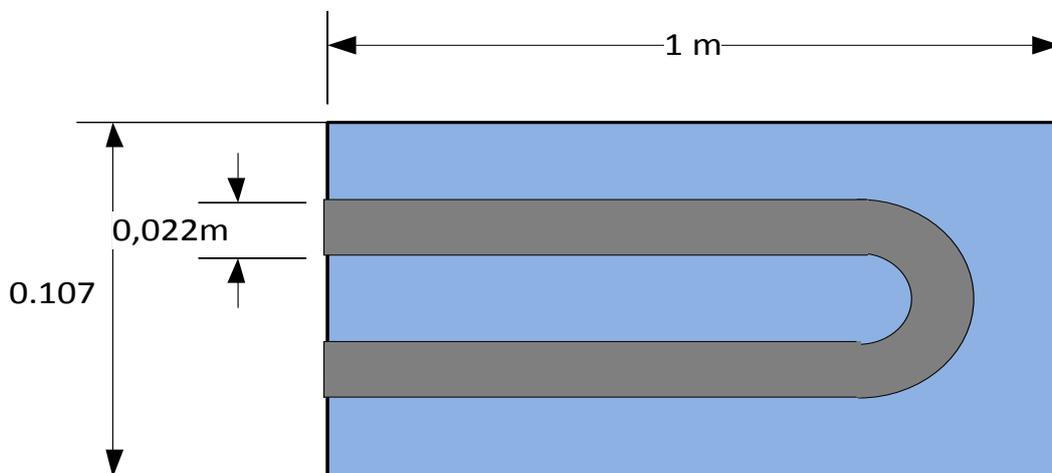


Figure IV.6: Domaine numérique.

La section de l'échangeur de chaleur est composée d'un cylindre horizontal de 1 m de long avec un diamètre intérieur de 107 mm et une épaisseur de 2,5 mm. Un tube en cuivre de 22 mm a également été placé au centre du cylindre rempli de PCM. Ce tube est le tube de transfert de chaleur à travers lequel l'eau chaude et froide circule pour échanger de la chaleur avec le PCM. La surface extérieure de l'échangeur de chaleur est bien isolée par de la laine de verre de 60 mm d'épaisseur afin d'éviter les pertes de chaleur vers l'environnement. Le

système est composé de deux boucles d'écoulement de fluide ; une boucle de charge, dans laquelle la chaleur est transférée de l'eau chaude au PCM et une boucle de décharge, dans laquelle l'énergie est transférée du PCM à l'eau.

IV.6. Conditions aux limites :

Dans notre étude Le domaine du calcul est limité par des conditions qui sont été utiliséepar [28]. Comme la figure 3 illustre.

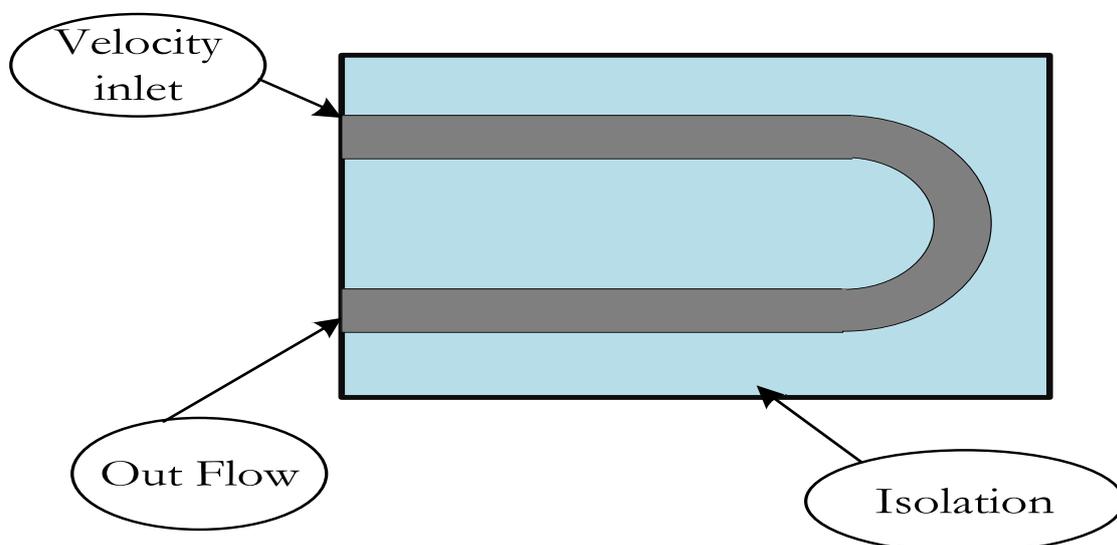


Figure IV.7: Conditions aux limite du domaine de calcul

- Le débit de l'eau est de 1 l/min est le même comme celui de [28]. Ceci, dans les conditions de notre simulation, correspond à une vitesse de $0,043 \text{ m/s}$ où l'eau est considérée toujours comme incompressible.

- La température initiale est de $22,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

IV .7. Hypothèses sur les MCP :

- Le MCP est homogène et isotrope.
- Les propriétés thermo physiques du PCM et HTF sont constantes
- L'écoulement est supposé laminaire

- Changements de phase pendant la solidification/fusion se produit dans une plage de température.
- La température initiale du MCP est uniforme.
- Le MCP liquide est Newtonien.
- L'effet de la convection naturel pour la phase liquide de PCM est négligé
- La paroi du tube intérieur est supposée mince et le matériau qui la constitue est supposé un bon conducteur thermique
- La surface externe de paroi est supposée adiabatique

IV .8. Mise en œuvre numérique

A l'heure actuelle, il existe un certain nombre de codes industriels conviviaux, aux meilleurs performants, permettant la prédiction d'écoulement fluides par la résolution des équations de Navier-Stokes grâce aux méthodes des volumes finis, des différences finies ou des éléments finis. Pour notre travail, nous avons eu recours au code ANSYS FLUENT, commercialisé par ANSYS. La première version était lancée en Octobre 1983, nous disposons de la version 15.0. C'est un code écrit avec le langage de programmation C et utilise pleinement la flexibilité et la puissance offertes par ce langage (allocation de la mémoire dynamique). En outre, il utilise une architecture qui lui permet de s'exécuter en tant que plusieurs processus simultanés sur le même poste de travail ou sur des postes séparés, pour une exécution plus efficace.

Pour la préparation de la configuration géométrique et la génération du maillage en 2D on utilise le Préprocesseur GAMBIT.

IV .9. Etapes de calcul : [28] Ce tableau représente la Température de l'eau à l'entrée en fonction de temps :

Tableau IV.1 : les étapes de calcul numérique

Les étapes	Température de l'eau à l'entrée	Durée (MIN)
charge	$T_{chaud} = 70 \text{ } ^\circ\text{C}$	150
Décharge	$T_{froid} = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$	180

Les propriétés thermo physiques de MCP utilisé dans cette étude sont menées par [28] sous un nom commercial RT50:

Tableau IV. 2 : Propriétés thermo physiques de MCP

Propriétés	MCP(RT55)[33]	MCP(lauric)[41]	MCP(RT50)[28]
Point de fusion ($T_M(^{\circ}k)$)	T solide 324	T solide 316	Tsolide 318
	T liquide 333	T liquide 320	T liquide 324
La chaleur latente (J/kg)	249.10^3	$170. 10^3$	168.10^3
Conductivité thermique (W /m.K)	0.2	0.2	0.2
La masse volumique (kg/ m^3)	794	860	780
Chaleur spécifique (J/kg.k)	2600	2600	2000

IV.10.Les équations gouvernantes:

❖ **Equation de continuity:**

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \tag{IV.1}$$

❖ **Equation de quantité de mouvement :**

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = \frac{1}{\rho} \left(-\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho \beta \vec{V} (T - T_{ref}) \right) + \vec{S} \tag{IV.2}$$

❖ **Equation de l'énergiethermique :**

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V}h) = \nabla \cdot \left(\frac{K}{c_p} \nabla h \right) \tag{IV.3}$$

L'enthalpie du matériau est calculée comme la somme dès l'enthalpies sensibles, h, et la chaleur latente, ΔH :

$$H = h + \Delta H \tag{IV .4}$$

Avec :

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \tag{IV .5}$$

Le contenu de chaleur latente peut être écrit en termes de chaleur latente de matériau, L :

$$\Delta H = \Omega L \tag{IV .6}$$

Où ΔH peut varier de zéro (solide) à L (liquide). Par conséquent, la fraction liquide, peut être définie comme:

$$\Omega = \begin{cases} \frac{\Delta H}{L} = 0 & \text{si } T < T_{Solide} \\ \frac{\Delta H}{L} = 1 & \text{si } T > T_{Liquide} \\ \frac{\Delta H}{L} = \frac{T - T_{Solide}}{T_{Liquide} - T_{Solide}} & \text{si } T_{Solide} < T < T_{Liquide} \end{cases} \tag{IV .7}$$

L’approximation de boussinesq : la loi de L’approximation de boussinesq est :

$$\rho = \rho_L (\beta(T - T_L) + 1)^{-1} \tag{IV .8}$$

Dans Equation (IV .8) T_L est la température de changement de phase, β est le coefficient de dilatation thermique isobare. On considère que le changement de phase se produit dans un intervalle de température dans lequel les phases liquides et solides coexistent. Cette région est communément appelée zone pâteuse. La fraction de fusion (φ), c'est-à-dire le paramètre non dimensionnel qui quantifie le pourcentage de phase liquide contenu dans la zone de poussée, est évaluée comme suit:

$$\varphi(T) = \frac{T - T_s}{T_L - T_s} = \frac{T - T_M + \Delta T_M}{2\Delta T_M} = \begin{cases} 0 & \text{pour } T < T_s \\ -1 & \text{pour } T_s \leq T \leq T_L \\ 1 & \text{pour } T > T_L \end{cases} \tag{IV .9}$$

Dans Equation (IV .9) ΔT_M est l’intervalle de température de changement de phase, T_s est la température à laquelle le matériau dans la zone de poussée est complètement dans la phase solide, et T_L est la température à laquelle le matériau est complètement dans la phase liquide.

\bar{F}_b : Représente l’approximation de boussinesq ajoutée à l’équation d’impulsion pour inclure les effets de flottabilité, évaluée selon l’équation (IV .8)

IV.11 : Résultats et discussions :

IV.11.1 : Effet de température de l'eau à l'entrée :

A. Profil de température de MCP :

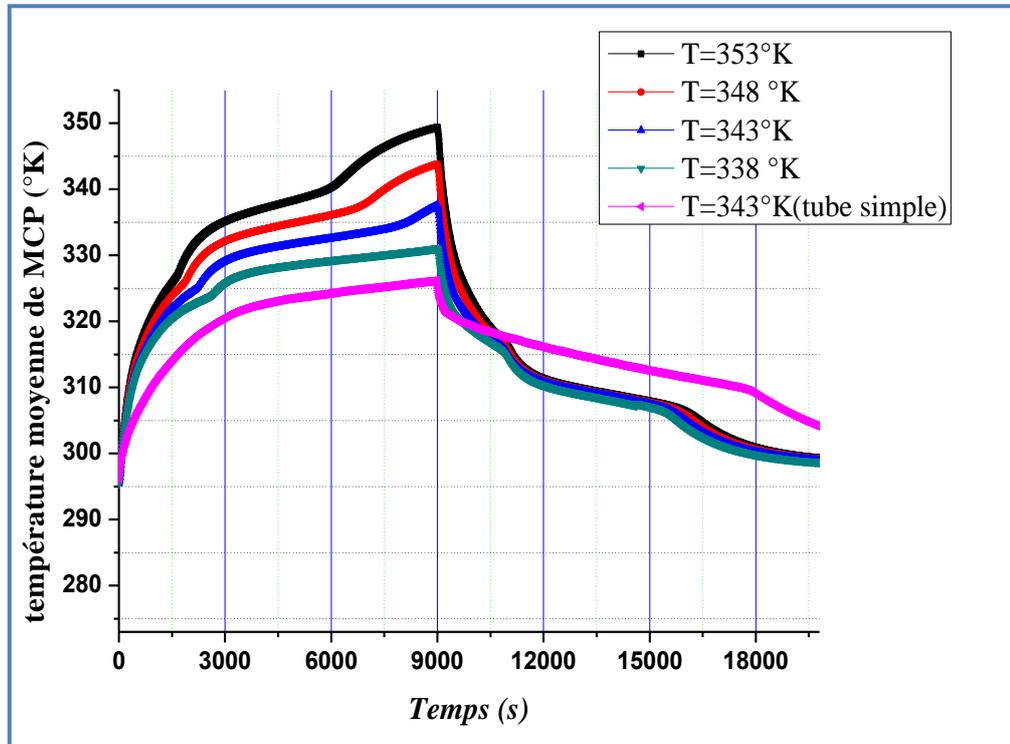


Figure IV.8: Comparaison du profil de température moyenne de PCM à différentes températures d'entrée du fluide caloporteur lors du processus de charge et de décharge.

La figure IV.7 représente l'évolution de la température moyenne MCP en fonction de temps pour des températures différentes de l'eau à l'entrée de l'échangeur pendant le processus de charge et de décharge, D'après la figure on remarque que la température de l'entrée de HTF à un effet sur le comportement thermique de MCP, dont on remarque que la courbe correspondante au processus de charge se compose de trois essentielles parties tel que :

Au premier temps, nous remarquons une augmentation rapide de la température moyenne du MCP pour différentes températures d'eau tel que on remarque que le temps de cette évolution rapide de température varie en fonction de température d'entrée de HTF, dont la courbe démunie sa pente environ 1800s pour la température $T_e = 80^\circ\text{C}$ et 2200s pour la température $T_e = 65^\circ\text{C}$, qui nous explique que le MCP atteint sa température de fusion rapidement pour une température d'entrée élevée. On peut dire que cette première période, le

MCP absorbe une quantité de chaleur sensible parce que il y a une variation de température importante.

Après on remarque une légère variation de la température du MCP pour les différentes températures d'eau dans le tube U et la même chose pour le tube horizontal simple[28], pour un intervalle important de temps qui nous démontre que le MCP gagne une quantité de chaleur latente de fusion, ainsi que la figure (IV.7) illustre que l'intervalle de temps de cette période varie inversement proportionnel en fonction de T_e .

En suite la troisième partie de la courbe est que la température de MCP varie avec le temps d'une façon plus rapide jusqu'à la fin de la charge où le MCP absorbe une quantité de chaleur sensible donc dans cette phase le MCP devient presque totalement liquide. Et à la fin de la charge après 150 min la température de MCP rapproche de T_e .

On remarque un écart important de la température du MCP dans les différentes formes géométriques. On retrouve dans le tube U le MCP profite davantage de la chaleur de l'eau qui s'écoule à l'intérieur du tube par rapport à un tube simple.

Après 9000s le processus décharge aura lieu pour la même température de l'entrée $T_e=25^\circ\text{C}$. On remarque une diminution de la température de MCP en fonction de temps dont la courbe de décharge se compose de deux parties :

La première partie on remarque une faible variation de T_{mcp} en fonction de temps qui nous explique le dégagement de la chaleur latente de MCP vers le HTF durant sa solidification.

La deuxième partie est après 16000s pour le tube U et 17500s pour le tube horizontal, la température diminue en fonction de temps c'est la partie de refroidissement de MCP donc la chaleur sensible mis en jeu.

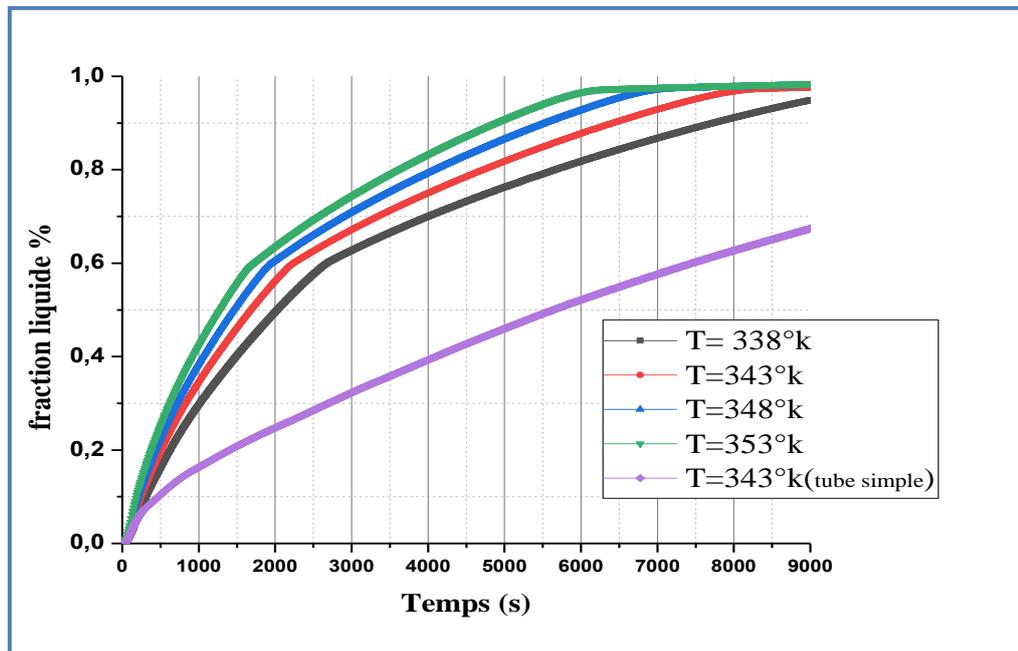
B.L'évolution de la fraction liquide durant la charge :

Figure IV.9: comparaison de fraction liquide de MCP (%) à différentes températures d'entrée du fluide caloporteur lors du processus de charge en fonction de temps (s).

La figure IV.8 représente la fraction liquide de MCP en fonction du temps à différentes T_e , tel que on remarque quela fraction liquide de MCP augmente avec le temps, ce que nous démontre la fusion de MCP.

La figure IV.8 montre que le temps de fusion total de MCP diminue quand on augmente la T_e où on remarque qu'après le passage de 6000s dans le cas du tube U à $T_e=353$ °C il atteint le taux de fusion total, et que tube simple prend plus de temps pour atteindre le stade de fusion totale (liquide), ce qui rend le tube U bien meilleur que le tube simple.

C. La différence de température ($T_s - T_e$) de l'eau :

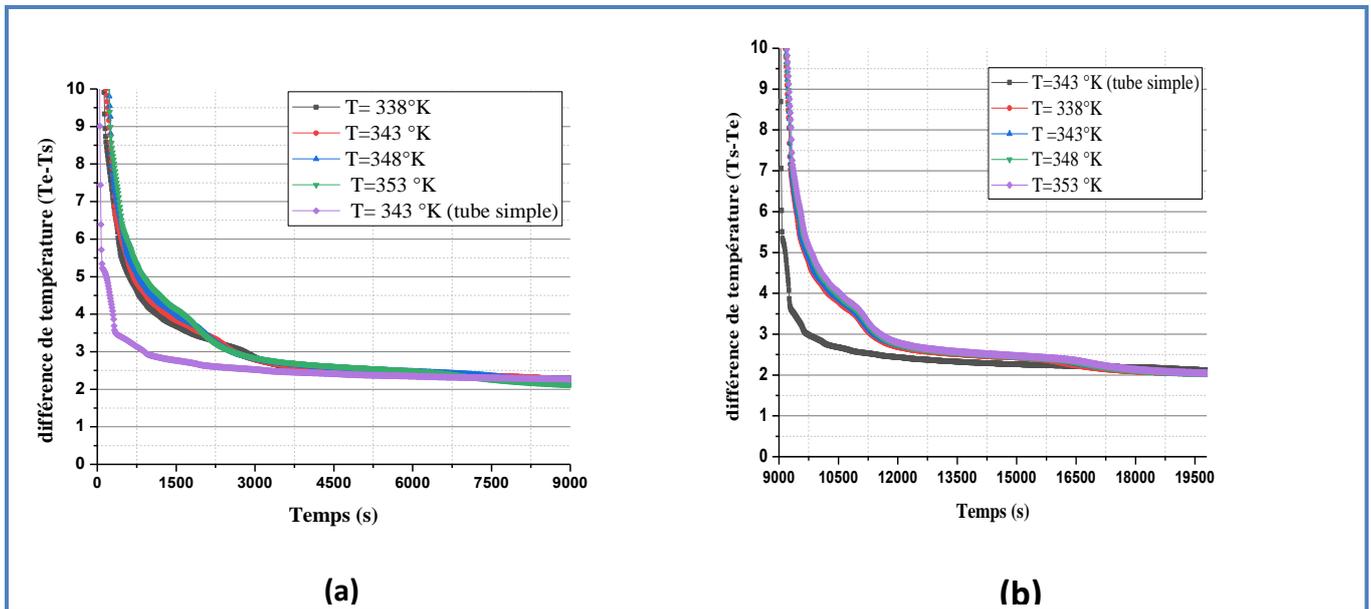


Figure IV.10: Différence de température (sortie-entrée) charge (a) décharge (b) en fonction de temps.

La figure ci-dessus représente la différence entre la température de l'eau (entrée et sortie) en charge et en décharge dans les différentes température d'entrée en fonction de temps. La figure montre deux courbes (a) et (b) qui expriment la différence de la température de HTF entre l'entrée et la sortie lors de la charge (fusion) et la décharge (solidification) la température à l'entrée de l'eau ($T = 338, 343, 348, 353^\circ\text{K}$) et une vitesse $V = 0.043 \text{ m/s}$. Nous notons que la différence de température de l'eau à l'entrée n'affecte pas la différence, En outre ce qui concerne la différence de forme du tube normal et de forme U, nous constatons que ce dernier prend plus de temps de stockage thermique durant le processus de charge tel que la figure nous montre un gain de chaleur absorbée qui est due par ΔT élevée, et de chaleur évacuée dans le processus de décharge, où la forme du tube manifeste par l'augmentation de la surface d'échange, ce qui fait le but.

D. La chaleur accumulée (évacuée par l'eau) Durant la charge:

Puissance thermique instantanée (q) donnée par l'eau est exprimé par :

$$q_{ch} = \dot{m}c_p\Delta T = \dot{m}c_p(T_s - T_e) \quad (\text{W}) \quad (\text{IV .10})$$

Et l'énergie thermique donnée et accumulée par l'eau est donnée par :

$$Q_{ch} = \Sigma(q_{ch})\Delta t \quad (\text{J}) \quad (\text{IV .11})$$

Avec :

\dot{m} : Le débit massique de l'eau

c_p : La chaleur massique de l'eau

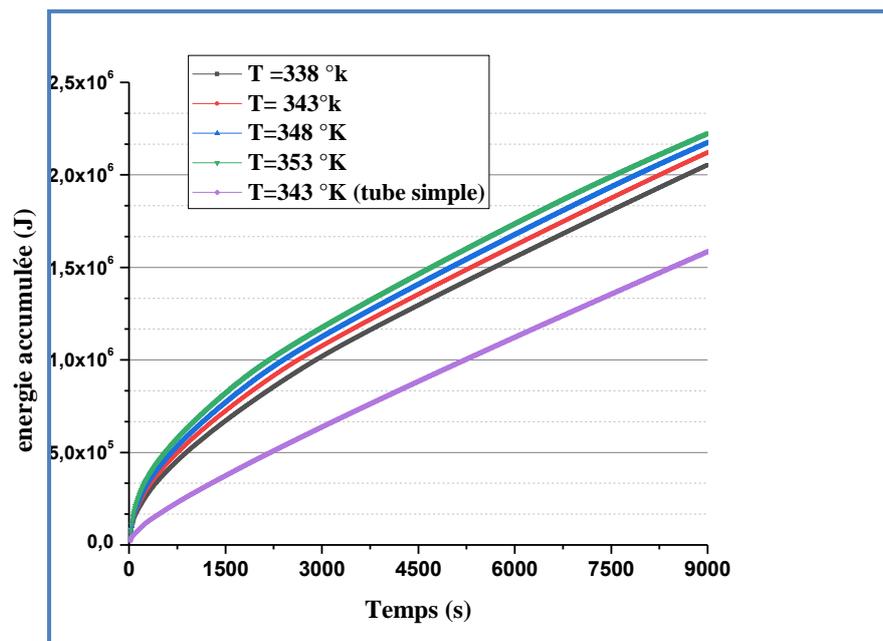


Figure IV.11: Variation de l'énergie accumulée durant la charge en fonction de temps pour des températures différentes.

Figure ci-dessus représente l'énergie accumulée durant le processus de charge pour des différentes températures et en comparant par rapport un échangeur qui menu d'un tube horizontal. Nous notons que l'effet de là de température d'entrée a un effet faible sur l'énergie accumulée avec une différence de 0,2 MJ entre $T_e=353^\circ\text{K}$ et $T_e=338^\circ\text{K}$, mais la forme de

tube a un grand effet sur la chaleur transmise de l'eau vers le MCP tel que la forme de tube U peut gager jusqu'à 0.5MJ pour la même température d'entrée de HTF.

E. La chaleur accumulée (absorbée par l'eau) Durant la décharge:

Puissance thermique instantanée (q) gagnée par l'eau est exprimé par :

$$q_{dech} = \dot{m}c_p \Delta T = \dot{m}c_p (T_e - T_s) \quad (\text{W}) \quad (\text{IV .12})$$

Et l'énergie thermique gagnée et accumulée par l'eau est donnée par :

$$Q_{dech} = \Sigma(q_{dech})\Delta t \quad (\text{J}) \quad (\text{IV .13})$$

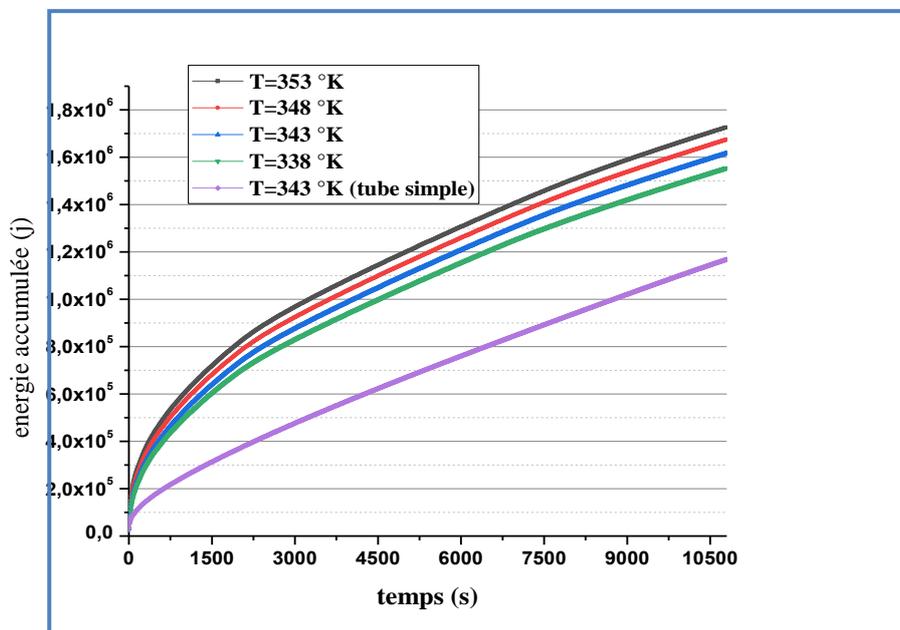


Figure IV.12: Variation de l'énergie accumulée en fonction de temps durant la décharge pour des températures différentes.

La figure IV.11 représente l'énergie thermique gagnée et accumulée par l'eau durant le processus de décharge, c'est-à-dire quand le MCP se solidifie afin d'évacuer la chaleur vers l'eau, on remarque une diminution de cette énergie accumulée et qui est due par la faible différence de température par rapport à la charge.

IV.11.2 : Effet de la nature de MCP :

A. La température moyenne de MCP :

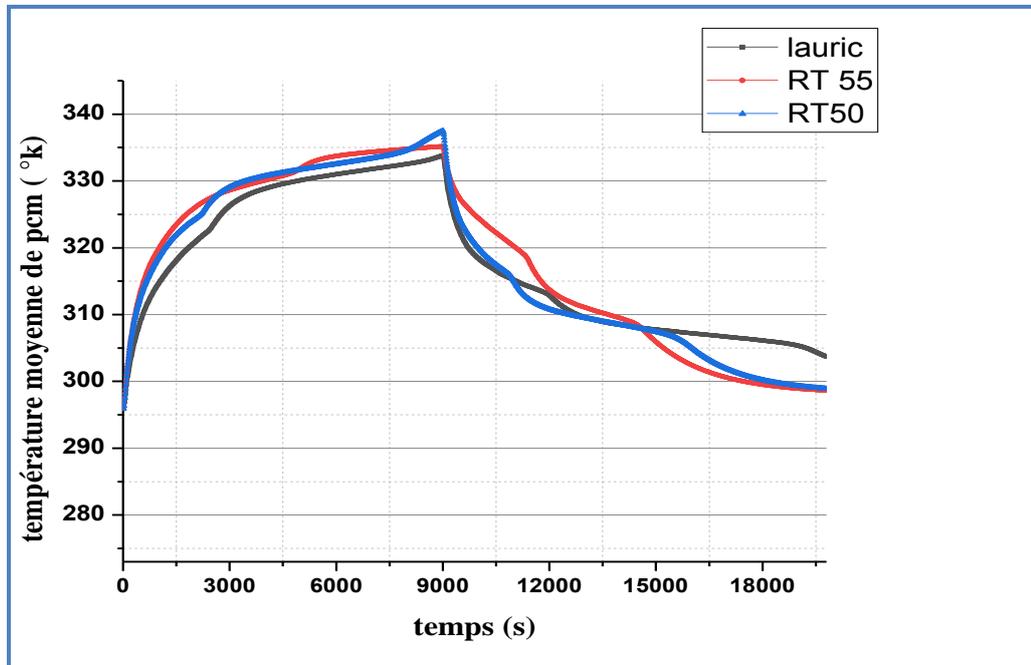


Figure IV.13: Variation de la température moyenne de MCP en fonction de temps pour différents MCP (acide de lauric, RT 55 et RT 50).

La Figure IV.12 indique l'évolution de la température moyenne de trois MCP utilisés on remarque que ils ont presque la même allure dont La température augmente rapidement pour les trois MCP qui indique une absorption de la chaleur sensible par le MCP jusqu'à ce que le MCP atteigne sa température de fusion puis on constate que La température est presque constante, le MCP commence à changer de son état physique pendant environ 100 minutes afin que la MCP se fonde complètement donc il acquiert de la chaleur latente.

Ensuite, nous remarquons une diminution de la température de 335k à 305k dans une période allant de 30 minutes, ce qui indique que MCP a commencé dans le processus de solidification (congélation) où MCP a déchargé de la chaleur sensible qu'il a été gagnée par l'eau

Puis on note que la température est stable de (15000-18000) seconde, ce qui indique que le MCP a acquis la chaleur latente dans le processus de décharge, puis on note à nouveau en train de baisser la température à 295,5 k

Lorsque le HTF s'écoule, il absorbe la chaleur latente du PCM liquide, qui devient alors solide. Ce processus s'appelle décharge car la chaleur stockée est libérée.

B. La fraction liquide de MCP :

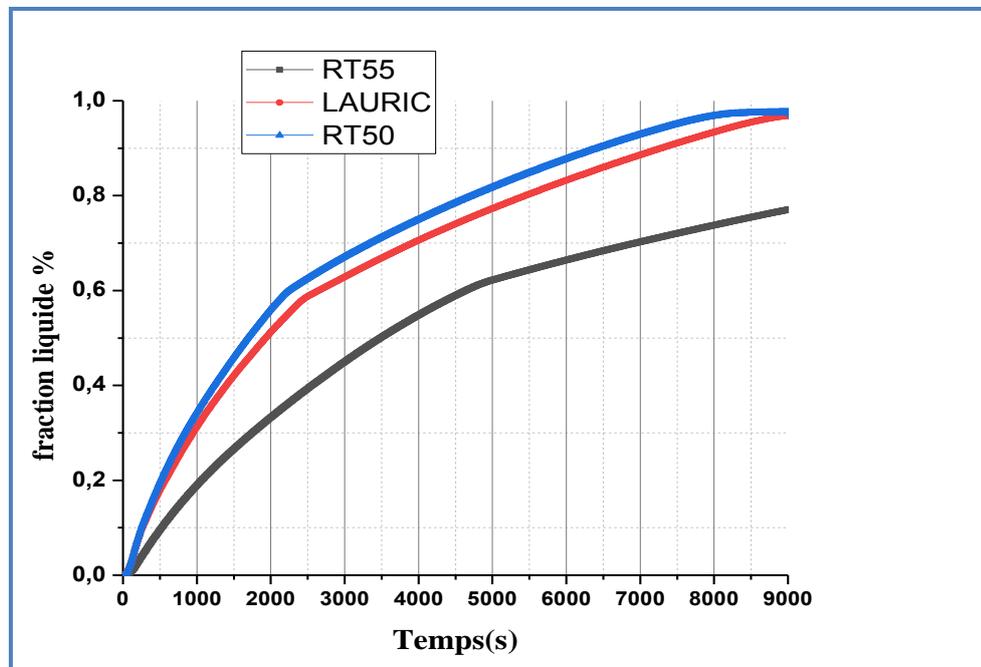


Figure IV.14: Variation de fraction liquide(%) pour différents types de MCP lors du processus de charge en fonction de temps.

La figure ci-dessus représente une comparaison de la fraction liquide de fusion de différents matériaux à changement de phase durant le processus de charge où la température d'entrée de HTF est de $T_e = 343 \text{ K}$, la différence entre chaque type de MCP se traduit par sa capacité à acquérir et à stocker de l'énergie.

Nous constatons que dans des conditions correspondantes, après un temps de 9000 s de charge, RT50 et l'acide de Lauric deviennent 100% liquide, mais le RT55 sa fraction liquide atteint 60%, ce qui indique que ce dernier a la capacité de recevoir et de gagner de l'énergie plus que les autres.

IV.11.3 : Effet de condition au limite :

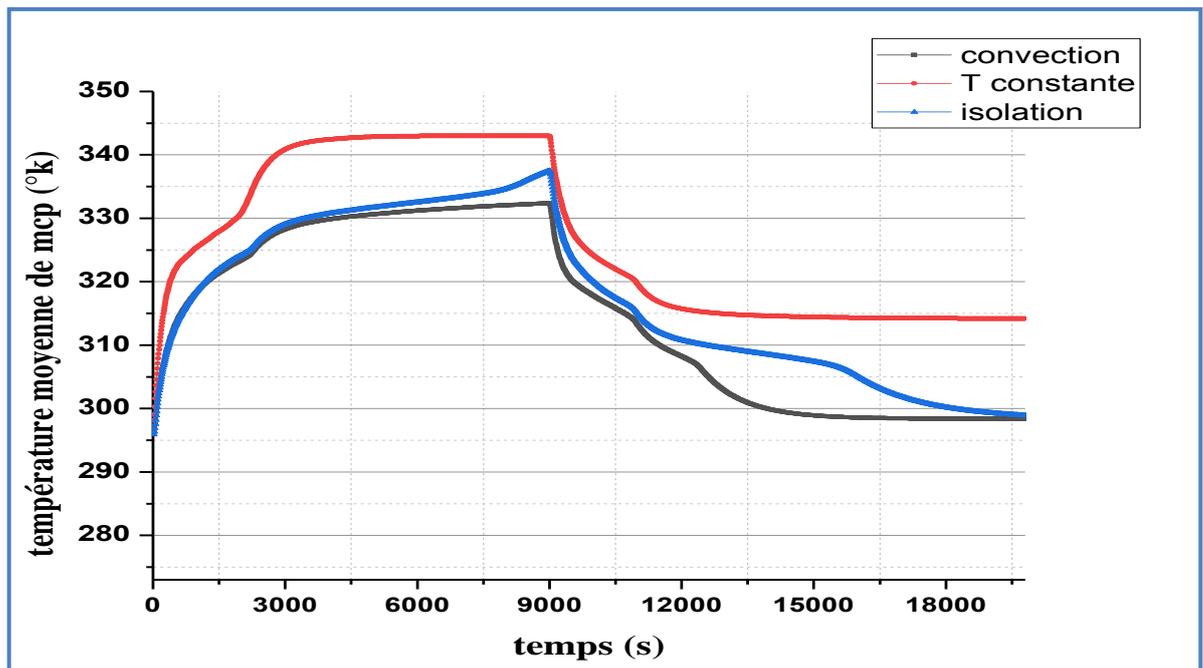


Figure IV.15: Variation de température moyenne de MCP en fonction de temps pour différentes conditions aux limites de l'échangeur.

La courbe représente des changements à la température moyenne en fonction du temps de charge et de décharge, dans cette configuration on a changé la condition au limite de la surface extérieure de l'échangeur, tel que on a fixé la température de la surface extérieure en prenant $T = T_e$ et encore on a choisi que la surface extérieure subit une convection avec le milieu extérieur qui a une température $T = 25\text{ °C}$ et un coefficient d'échange $h = 8.25\text{ w/m}^2\text{ °C}$. Dans les trois configurations la température $T_e = 343\text{ °K}$ et la vitesse d'entrée de HTF

$V = 0.043\text{ m/s}$.

On remarque que les courbes pour la convection et l'isolation ont presque la même allure par contre dans le cas de température constante on remarque que le MCP atteint rapidement son point de fusion parce que il y a un échange important de deux frontières de MCP.

Donc on peut conclure que d'exiger une isolation de l'échangeur est la meilleure configuration

IV.11.4 : Effet de la vitesse d'entrée :

A. La température moyenne de MCP :

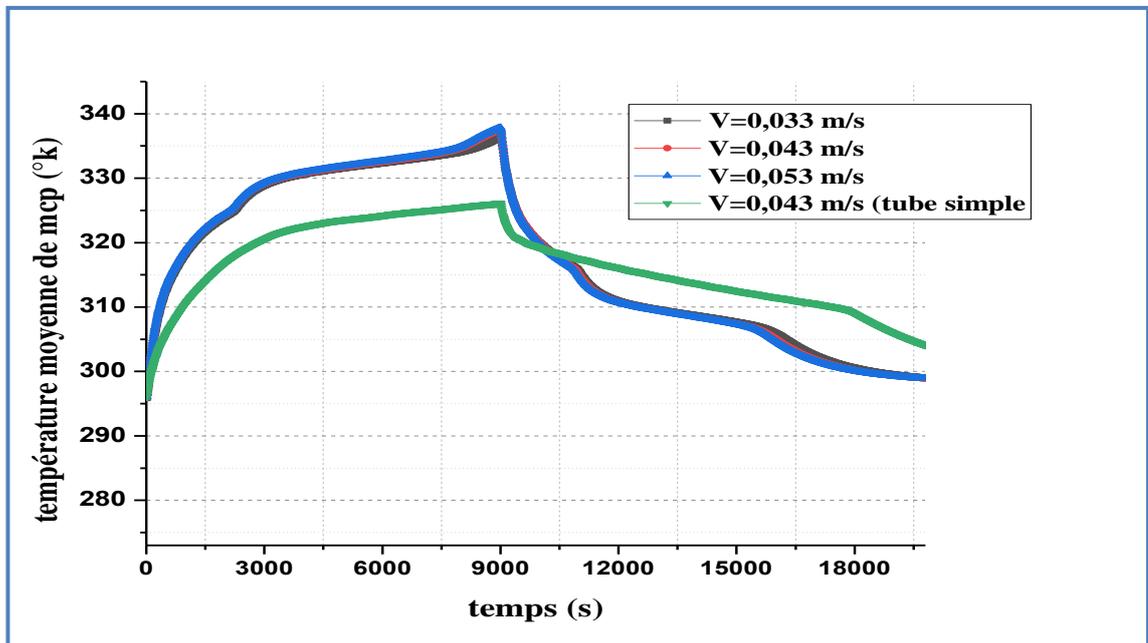


Figure IV.16: Variation de température moyenne de MCP en fonction de temps pour différente de vitesse.

La figure IV.15 indique la variation de température moyenne de MCP en fonction de temps pour différentes vitesses de l'entrée de HTF durant la charge et la décharge et $T_e=343$ °K on remarque que l'effet de vitesse est presque négligeable.

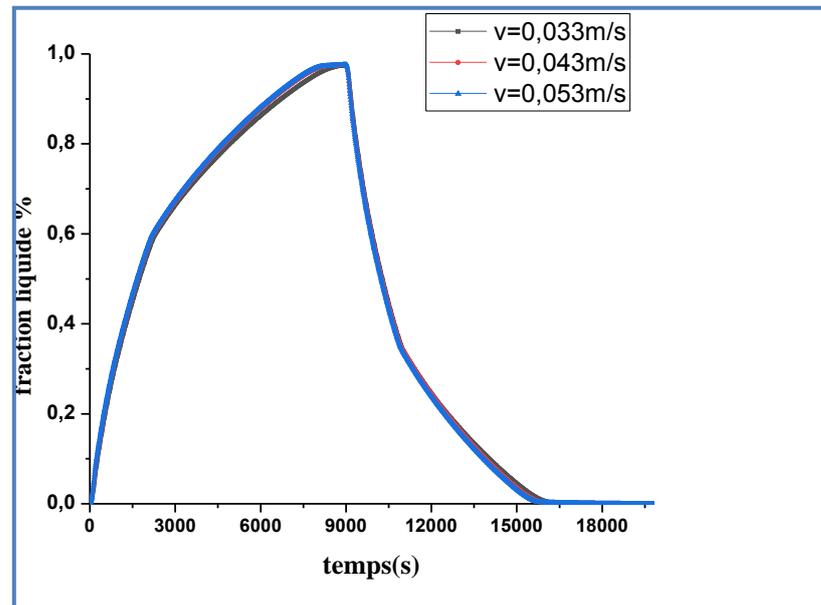
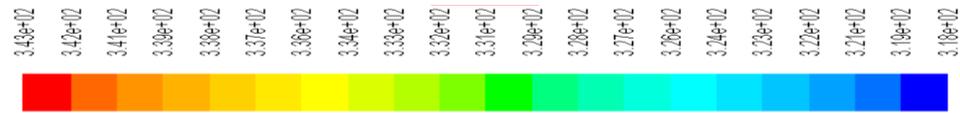
B. La fraction liquide de MCP :

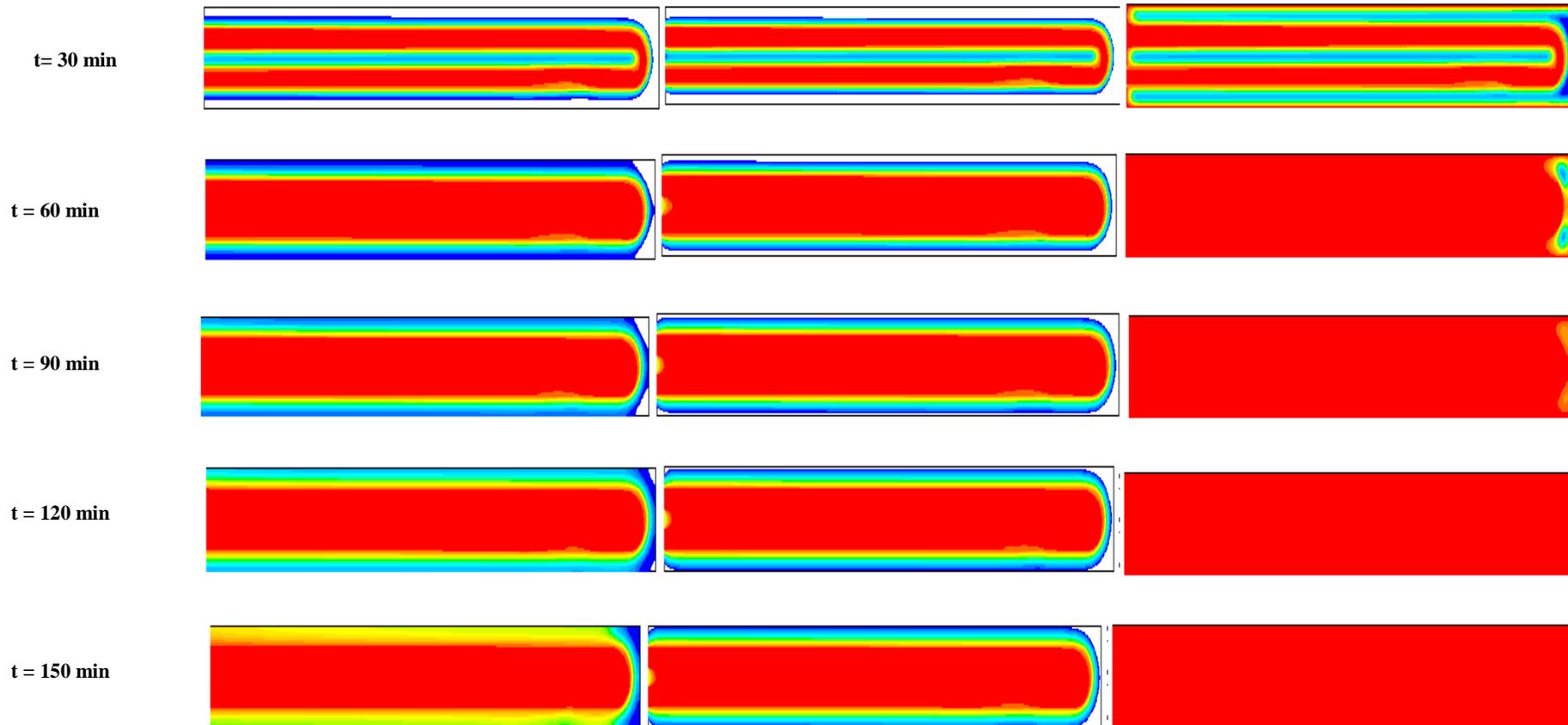
Figure IV.17:Variation de fraction liquide (%) en fonction de temps (s) pour déférente des vitesses.

A travers la courbe, on constate que la différence de vitesse d'entrée dans l'eau n'influe pas suffisamment sur le taux de fusion de MCP

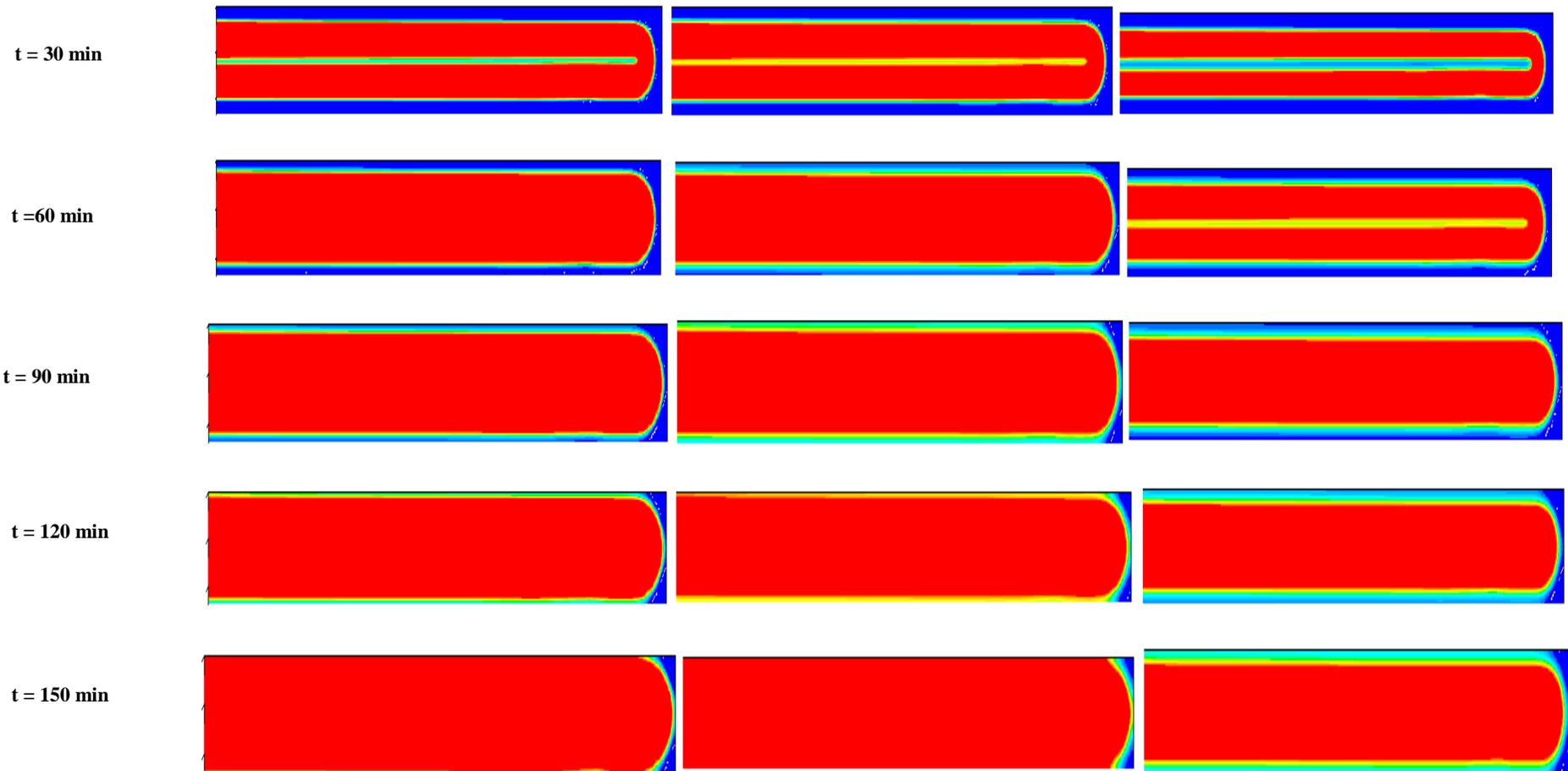
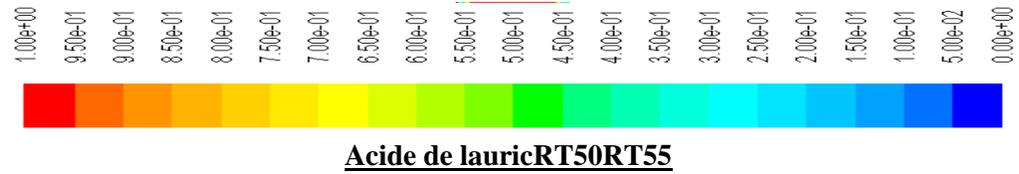
IV.11.5 : Contours des températures pour différentes conditions aux limite :



Isolation convection T constante



IV.11.6. Contours de la fraction liquide pour différents MCP :



Analyse LES COUNTEURS

Le document représente des formes montrant le point de fusion des trois types de MCP en termes de temps.

Dans le cas du RT50 :

On observe une fusion rapide en termes de temps, car on observe le début de la fusion à partir de 30 minutes jusqu'à ce que la fusion totale soit de 90 minutes, et la stabilité se poursuit jusqu'à 150 minutes, indiquant que le point de fusion est bas par rapport au RT55 et au Lauric.

Acide lauric :

Nous notons la vitesse moyenne de fusion en termes de temps, où nous notons que la fusion commence dans les 30 minutes, atteignant la fusion totale à 120 minutes, atteignant la stabilité à 150 minutes, ce qui indique que la température nécessaire à la fusion est supérieure à la température nécessaire RT50.

RT55 :

RT55 nous notons une fusion lente en termes de temps, où nous notons que la fusion n'a pas commencé à 30 et 60 minutes lentement, malgré avoir atteint 150 minutes, mais n'a pas atteint la fusion totale, indiquant que la température nécessaire à la fusion est élevée par rapport à RT50 et LAURIC.

Conclusion : A travers les formulaires, nous concluons que la température nécessaire à la fusion des 3 espèces diffère de la MCP(RT50, RT55, acide lauric).

Et que la RT 55 est celle qui nécessite la plus grande température de fusion, ce qui indique sa qualité et ses avantages à l'usage.

CONCLUSION GENERALE

Dans le cadre de ce travail de recherche, une solution d'économie d'énergie dans l'habitat peut être envisagée et qui consiste à accroître l'inertie thermique des parois par l'incorporation des matériaux à changement de phase, caractérisé par une faible masse structurelle et une inertie thermique améliorée.

L'objectif de cette étude est d'assurer la stabilité de la température du milieu ambiant intérieure d'une cavité soumise à des perturbations de température du milieu ambiant extérieur. Cette cavité pouvant désigner un espace habitable.

L'étude numérique est réalisée à l'aide d'un modèle physique traitant le couplage entre l'échangeur MCP et la cavité. Le transfert de chaleur avec changement de phase est modélisé numériquement par la méthode de la capacité thermique apparente. Cette dernière est utilisée pour modéliser le processus de changement de phase. La littérature montre que cette méthode ne peut être efficacement appliquée qu'avec une bonne connaissance de la marge de transition de phase du MCP. Cette marge est fournie expérimentalement. Cette difficulté est résolue numériquement par Hoseini, en adoptant une nouvelle méthode d'évaluation de la capacité thermique apparente. Cette démarche d'évaluation est utilisée dans notre modèle de calcul.

Les résultats de cette étude ont montré que le choix du MCP est basé sur sa température de fusion préférentiellement proche de la température du confort thermique avec une chaleur latente importante. La position optimale du MCP est liée principalement à la nature de l'environnement extérieur froid au chaud : pour les régions chaudes, l'isolant est situé du côté intérieur et le MCP du côté extérieur, pour les régions froides, on a un emplacement contraire. L'épaisseur optimale du MCP doit être choisie légèrement supérieure à celle de la limite de la fusion.

Enfin, pour de futurs travaux, il serait pertinent de procéder davantage à des validations, par le biais d'outils numériques plus adaptés ou d'expérimentations pratiques.

References bibliographiques:

- [1] Telkes, M. (1975). Thermal storage for solar heating and cooling. *Proceedings of the workshop on solar energy storage subsystems for the heating and cooling of buildings*. Charlottesville, Virginia, USA.
- [2] Lane, 1983. *Solar Heat Storage: Latent Heat Material, Volume 1: Background and Scientific Principles*. USA: CRC.
- [3] Raj, V., Anthony Raoul et R. Velraj, 2010. « Review on free cooling of buildings using phase change materials ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, p. 2819- 2829.
- [4] Abhat (1983) . Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage: Heat Storage Materials. *Solar Energy*, Vol. 30, No. 4, pp. 313-332.
- [5]: Serge Blaise EKOMY ANGO « Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase ». L'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2011.
- [6] SHARMA, A., TYAGI, V.V., CHEN, C.R., BUDDHI, D., 2009. Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13:318-345.
- [7] M. Kenisarinet K. Mahkamov "Salt hydrates as latent heat storage Materials : Thermophysical properties and costs" *Solar Energy Materials and Solar Cells*.
- [8] J. P. Kotzé, T. W. Von Backström, et P. J. Erens, "A combined latent thermal energy storage and steam generator concept using metallic phase change materials and metallic heat transfer fluids for concentrated solar power," 2011
- [9] H. Ge, H. Li, S. Mei, et J. Liu, "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, no. 0, pp. 331-346, May 2013
- [10] Saib Hind, Etude de simulation des phénomènes de transfert thermique lors de la solidification d'alliages, mémoire de master 2009.
- [11] 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.

- [12] A. Gontard, K. Gryska, L. Lallemand « Amélioration de la conductivité thermique de matériau à changement de phase », Université de Pau des pays de l'Adour 2012.
- [13] 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.
- [14] Bruno BINET « Etude de la fusion dans des enceintes munies de sources de chaleur discrètes».Sherbrooke (Québec),CANADA Novembre 1998.
- [15] Sharma, A, V.V, Tyagi, C.R, Chen, & D., Buddhi. 2009a. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. Renewable and sustainableenergy reviews, Vol.13, pages 318–345.
- [16]AKROUCHE Amina., Etude Du Stockage Et Déstockage D'énergie Dans Un Matériau A Changement De Phase, Mémoire De Magister, Université M'hamedBougara, Boumerdes, 2011).
- [17]AHMED MAHA (2005) et AL ,Thermal testing and numerical simulation of a prototype cellusing light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material, Energy and building, volume 38,issue6
- [18]Milan Ostrya, pavelCharval « Materials for advanced Heat storage in buildings » 11 th International Conferce on Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST 2013.
- [19]MAZMAN, M., 2006. Latent Heat Storage and Applications.PhD Thesis, Ç.Ü. Institute ofNatural and Applied Sciences, Adana. (In Turkish)110
- [20]ÖZTÜRK, H.H., 1997. The Research on Storage of Solar Energy in Phase Change Material(PCM) for Greenhouse Heating.PhD Thesis, Ç.Ü. Institute of Natural and Applied Sciences, Adana. (In Turkish)
- [21]H. T. Cui "Experimental investigation on the heat charging process by paraffin filled with high porosity copper foam" Applied Thermal Engineering **39** 26-8 2012.
- [22]S. Thapa, S. Chukwu, A. Khaliqet L. Weiss "Fabrication and analysis of small-scale thermal energy storage with conductivity enhancement" Energy Conversion and Management **79** 161-70 2014.
- [23] Z. Huang, X. Gao, T. Xu, Y. Fang et Z. Zhang "Thermal property measurement and heat storage analysis of LiNO₃/KCl– expanded graphite composite phase change material"Applied Energy**115** 265-71 2014.

[24] R. Develay "[m651] Mise en forme de l'aluminium - Filage ou extrusion" Techniques de l'Ingénieur 1997.

[25] Maha Ahmad, Couplage matériaux à changement de phase, supe isolation, apports solaire.

[26] Fouzi BENMOUSSA1, Hocine BENMOUSSA1, Ahmed BENZAOU1, STOCKAGE DE L'ÉNERGIE THERMIQUE: EFFET DES PARAMÈTRES PHYSIQUES ET GÉOMÉTRIQUES SUR LES PERFORMANCES DE STOCKAGE ICEMAEP2016, October 30-31, 2016, Constantine, Algeria.

[27] M.J. Hosseini, A.A. Ranjbar, K. Sedighi, M. Rahimi. A combined experimental and computational study on the melting behavior of a medium temperature phase change storage material inside shell and tube heat exchanger International Communications in Heat and Mass Transfer (2012).

[28] M.J. Hosseini a, M. Rahimia, b, R. Bahrampoury Experimental and computational evolution of a shell and tube heat exchanger as a PCM thermal storage system. International Communications in Heat and Mass Transfer 50 (2014) 128–136.

[29] J. M. Khodadadiet S. F. Hosseinizadeh, 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).

[30] Ahmed H.N. Al-Mudhafara, b, *, Andrzej F. Nowakowskia, Franck C.G.A. Nicolleau, Performance enhancement of PCM latent heat thermal energy storage system utilizing a modified webbed tube heat exchanger, Energy Reports 6 (2020).

[31] A. Sciacovelli, F. Gagliardi, V. Verda, Maximization of performance of a PCM latent heat storage system with innovative fins. Applied Energy 137 (2015) 707–715

[32] Bari, s GÜREL, A numerical investigation of the melting heat transfer characteristics of phase change materials in different plate heat exchanger (latent heat thermal energy storage) systems. International Journal of Heat and Mass Transfer 148 (2020).

[33] Elisa Guelpa, Adriano Sciacovelli*, Vittorio Verda, Entropy generation analysis for the design improvement of a latent heat storage system. Energy 53 (2013).

[34] PAPON P., LABLOND J. et MEIJER P. H. E. Physique des Transitions de phases. Paris Dunod, 1999. 390 p

[35] WYLEN V., SONNTAG et BORGNAKKE. Fundamentos da Termodinâmica. 5^{ème} Ed. Brazil : Edgard Blücher, 1998. 537p.

[36] CAREY V. P., CHEN J. et LION N. Phase-Change. In : KREITH F. The CRC Handbook of Mechanical Engineering. Boca Raton : CRC Press, 1998, 82-118p

[37] DELAUNAY D. Introduction aux transferts thermiques avec changement de phase. In : Ecole d'Été du CNRS, Pont à Mousson, Juillet 1990.

[38] COMINI G., GUIDICE S., EWIS R. W. et ZIENKIEWICZ O. C. Finite Element solution of Non-linear Heat Conduction problems with special reference to phase change. Int. J. Num. Meth. Engr., 1974, vol. 8, p613-624.

[39] OZISIK M. N. Heat conduction. 2^{ème} Ed. New York : Wiley-Interscience Publication, 1993. 692p.

[40] MINWU Y. et ARNON C. An alternative formulation of the apparent heat capacity method for phase-change problems. Numerical Heat Transfer, 1993, vol. 24, part B, n° 3, p279-300.

Résumé

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

L'objectif majeur de ce travail mémoire est d'effectuer une classification de MCP selon leur domaines d'application suivis par une étude comparative. Cette étude se base sur l'augmentation de la surface d'échange entre le MCP et le HTF on a choisi une forme U de tube où le HTF s'écoule en gardant le même volume de MCP comparant avec une littérature. Nous avons mené une simulation modélisant le changement de phase dans une cavité d'un MCP on a étudié l'effet de quelques paramètres. Les résultats montrent que la forme U améliore le processus de stockage thermique.

Les mots clés : Matériaux à changement de phase (MCP), application, comparaison, fluent, stockage, énergie thermique.

Abstract :

Phase change materials (PCMs) are materials that have been shown to be effective in storing thermal energy. They make it possible to replace storage by sensible heat with storage by latent heat which requires a much smaller volume and mass for the same quantity of thermal energy. The major objective of this thesis is to classify MCP according to their fields of application followed by a comparative study. This study is based on the increase in the exchange surface between the MCP and the HTF we have chose a U-shape of tube where the HTF flows while keeping the same volume of MCP comparing with a literature. We carried out a simulation modeling the phase change in a cavity of an MCP and we studied the effect of some parameters. Results show that U shape improves heat storage process.

Keywords: Phase change materials (PCM), application, comparison, fluent, storage, thermal energy.

ملخص

مواد تغيير مرحلة MCP هي المواد التي اثبتت فعاليتها في تخزين الطاقة الحرارية والتي تساعد على استبدال تخزين حرارة معقولة من الحرارة الكامنة الامر الذي يتطلب حجم اصغر بكثير والشامل لنفس كميته الطاقة الحرارية الهدف الرئيسي من هذا العمل هو اجراء تصنيف MCP وفقا لمجالات التطبيقات وتستند هذه الدراسة على عدة معايير بما في ذلك الخصائص الحرارية الفيزيائية للبيانات المتعلقة بالامن والخصائص الاقتصادية الى اخره اجرينا محاكاة لمرحلة تغيير تجويف مرشح MCP مع درجة الحرارة ذوبان بين 70 و 80

كلمات البحث: المرحلة تغيير المواد (MCP) التطبيق , على سبيل المقارنة والتخزين والطاقة الحرارية.