



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la  
Recherche Scientifique  
Centre Universitaire El-wancharissi de Tissemsilt



Institut de Sciences et de la Technologie  
Département de Sciences et de la Technologie

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme  
de Master académique en  
Filière : **génie mécanique**  
Spécialité : **Installations énergétiques et turbomachines**

Présentée par : **Chedad Belkacem**

**Dahmane farid**

*Thème*

---

## **Contribution a l'amélioration des performances d'une unité de stockage thermique par chaleur latente**

---

Soutenu le, .....

**Devant le Jury :**

Hamdi A	Président	Dr	CU-Tissemsilt
Benlakam M	Encadreur	Dr	CU-Tissemsilt
Trari T	Examinatrice	M	CU-Tissemsilt

**Année universitaire : 2019-2020**

# Remerciement

Nous tenons à remercier Allah le tout puissant de nous avoir donné le courage, la force et la volonté pour la réalisation de ce modeste travail.

Nous remercions notre encadreur Dr : BENLEKKAM MOHAMED LAMINE pour son aide, sa disponibilité ainsi que ses encouragements durant toute la période de la préparation de notre mémoire de fin de cycle.

Mes remerciements vont aux membres de jury qui ont pris soin d'examiner le travail présenté dans ce mémoire.

Enfin nos vifs remerciements sont adressés à toute personne ayant participé ou aidé, de loin ou de près, à l'achèvement de ce travail.

*Merci à tous*

# **Dédicaces**

Je dédie ce travail :

A ma très chère mère et mon très chère père

A mes frères et sœurs

A tous mes amies

***BELKACEM/FARID***

## Sommaire

Remerciement

Dédicaces

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Introduction général.....2

### Chapitre 1: Recherche bibliographique

Introduction .....5

Conclusion.....14

### Chapitre 02: Généralité sur les matériaux à changement de phase

Introduction .....16

2. Matériaux à changement de phase.....17

2.1. Types des matériaux à changement de phase (MCP).....17

2.1.1. Les MCP Organique .....17

2.1.2. Les MCP inorganiques.....17

2.1.3. MCP eutectiques ou composées .....17

2.2 Conditionnement des MCP.....18

2.3 Sélection du MCP.....20

2.4 Les problèmes liés au changement de phase .....21

2.5. Amélioration de la conductivité des MCP.....23

2.6. Les domaines d'applications des MCP.....23

2.7. Classe de MCP .....24

2.8. MCP les plus utilisés .....25

2.9. Le stockage thermique de l'énergie.....26

2.10. Les différents types de stockage de chaleur .....27

2.11. Comparaison des différents types de stockage d'énergie thermique.....30

2.12. Systèmes de stockage d'énergie par chaleur latente.....31

### Chapitre 03: Méthode numérique et position du problème

Introduction .....33

3.1. Définitions élémentaires.....34

3.2. Résolution numérique à l'aide de codes CFD .....34

3.2.1 Méthodes numériques .....35

3.3 Types de simulation (DNS, RANS, LES) .....36

3.4 Méthode des volumes finis.....38

3.4.1 Maillage.....39

3.5 Critère de convergence .....40

3.6 La modélisations des écoulements avec changement de phase.....40

3.6.1 Les schémas numériques avec maillage fixe .....	40
3.6.2 Les schémas avec maillage mobile .....	40
3.7 Méthode du Cp effective (ou apparent).....	41
3.8 Méthode Enthalpique.....	42
3.9 Position du problème et modélisation .....	42
3.9.1 Propriétés thermophysiques .....	43
3.10 Hypothèses simplificatrices .....	43
3.11 Formulation mathématique.....	44
3.11.1 Équation de continuité .....	44
3.11.2 Les équations de quantités de mouvements.....	44
3.11.3 Équation de la conservation d'énergie.....	44
3.12 Relations des propriétés thermo-physiques du Nano-MCP.....	46
3.13 Schéma du maillage du modèle physique adopté.....	46
3.14 Méthodologie computationnelle .....	47
Conclusion.....	49
<b>Chpitre4: Résultats et discussions</b>	
Introduction .....	51
4.1 Présentation de l'unité de stockage utilisée .....	51
4.2 Validation .....	52
4.3 Etude paramétriques .....	53
4.3.1 La charge.....	53
4.3.2 La décharge.....	57
Conclusion générale .....	60
Référence bibliographique.....	61

## Liste des figures

fig. 1- Present unit and related sample.....	5
fig. 2-Préparation steps of PA/TiO <sub>2</sub> composites .....	6
fig. 3- module utilise dans la simulation de transfert de chaleur .....	6
fig. 4- schéma de principe d'un système (a) de stockage d'énergie thermique a paroi active . .....	7
fig. 5- fraction liquide expérimentale de base et nano-mcp en fonction du temps pour différents flux thermique. ....	8
fig. 6- Schéma du lit de stockage.....	8
fig. 7- Evolution de la température moyenne du lit en fonction du temps au cours d'un cycle (stockage et déstockage). ....	9
fig. 8-Distribution de la température dans la température de l'air à l'entrée lit pour un constante, durant le stockage. ....	9
fig. 9- géométrie 3D de l'unité LHS et résultats de maillage de l'unité de stockage de chaleur latent .....	9
fig. 10- vue 3D de la géométrie du système LHTES .le sens découlement du fluide HTF est indique en rouge. ....	10
fig. 11-Schéma du modèle physique étudié. ....	10
fig. 12- schéma de (a) l'unité de stockage de chaleur latent (LHSU) et (b) le Domain de calcul. ....	11
fig. 13- canal poreux vertical.....	11
fig. 14- Comparaison du stockage thermique par Chaleur sensible et par chaleur latente .....	11
fig. 15- Plan de la situation expérimentale .....	12
fig. 16- Système solaire de changement de phase.....	13
fig. 17- Classification des matériaux à changement de phase .....	18
fig. 18- Exemple des MCP micro-encapsulés : à l'état poudre et à l'état liquide. ....	18
fig. 19-Critères de sélection d'un MCP pour le stockage de la chaleur latente .....	21
fig. 20- Les applications Transport de produits alimentaires. ....	24
fig. 21- Classification des MCP parmi les matériaux de stockage de chaleur.....	25
fig. 22- Les différentes étapes lors d'un stockage par chaleur latente (solide/liquide).....	29
fig. 23- schéma de principe du stockage thermochimique. ....	29
fig. 24- classification des systèmes des stockage de l'énergie thermique.....	30
fig. 25- Volume requis pour le stockage de 6,7 MJ .....	30
fig. 26- Modélisation du spectre d'énergie cinétique turbulente en fonction de l'approche .....	37
fig. 27- Volume de contrôle bidimensionnel. ....	38
fig. 28- Schéma du volume de contrôle (a), maillage décalé pour ue (b), maillage décalé pour vn (c).....	39
fig. 29- Evolution de la capacité thermique en fonction de la Température lors d'un changement de phase. ....	41
fig. 30-Modèle physique pour le calcul numérique. ....	43
fig. 31-maillage du domaine de calcule. ....	47
fig. 32-Modèle physique pour le calcul numérique. ....	51
fig. 33- La validation des températures de sortie du fluide caloporteur dans le cycle de charge et de décharge.....	52
fig. 34- La variation temporelle de l'énergie stockée des échantillons NPCM pendant le processus de charge.....	53

fig. 35- L'amélioration en pourcentage pour les échantillons NMCP pendant le processus de charge.....	53
fig. 36- La variation temporelle de fraction liquide du NMCP pendant le processus de charge.....	54
fig. 37- L'amélioration en pourcentage du temps de la fusion complète du NMCP .....	54
fig. 38- Le contour de la fraction liquide pendant la charge à 150 min.....	55
fig. 39- La variation temporelle de la température totale des NMCP pendant le processus de charge.....	56
fig. 40- Variation de l'énergie stockée avec le temps des échantillons NPCM pendant le processus de décharge.....	57
fig. 41- Variation de fraction liquide des NPCM avec le temps pendant le processus de dis charge.....	57
fig. 42- L'amélioration en pourcentage du temps de la solidification complète du NMCP .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
fig. 43- Le contour de la fraction liquide pendant la décharge à 150 min.....	57
fig. 44- La variation temporelle de la température totale des NMCP pendant le processus de décharge.....	58

## Liste des tableaux

Tableau 1- Avantages et inconvénients des MCP. ....	19
Tableau 2- Propriétés thermiques de certains MCP .....	20
Tableau 3- applications potontielles de stockage de lenergie thermique par les MCP .....	24
Tableau 4- les dimension de la géométrie .....	43
Tableau 5- Les propriétés du matériau à changement de phase de la cire de paraffine. ....	43
Tableau 6- Configuration pour la simulation FLUENT .....	47
Tableau 7- Le pas de temps et facteurs de sous-relaxation .....	48



## Nomenclature

### Symboles

$A$	surface avant du système [ $m^2$ ]
$Sh$	Terme de source [-]
$C_p$	capacité calorifique spécifique [J/kg]
$g$	accélération gravitationnelle [ $m/s^2$ ]
$T$	Température [K, °C]
$\beta$	Coefficient d'expansion thermique à pression constante [ $K^{-1}$ ]
$t$	Temps [s]
$x$	coordonnée horizontale [m]
$y$	coordonnée verticale [m]
$u_i$	Composante de vitesse dans la direction $x_i$ [-]
$u$	vitesse horizontale perpendiculaire à la paroi [ m/s]
$v$	vitesse verticale [m/s]
$\gamma$	La fraction liquide au cours du changement de phase [-]
$\Delta$	Taille du filtre LES (assimilée ici à la taille de maille)
$L$	Chaleur latente [J.kg <sup>-1</sup> ]
$Q$	Quantité de chaleur [J]
$m$	Masse [kg]

### Symboles grecs

$\lambda$	Conductivité thermique [W /m ·K]
$\rho$	Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_0$	Masse volumique de référence [kg/m <sup>3</sup> ]
$\mu$	Viscosité dynamique [Pa· s ]
$\nu$	Viscosité cinématique [m <sup>2</sup> /s]
$h$	L'enthalpie spécifique
$h_s$	L'enthalpie sensible
$h_{ref}$	L'enthalpie de référence
$\Phi$	Richesse

## Indices

$f$	Final
$F$	Fusion
$i$	initial, intérieur
$S$	Solide
$L$	Liquide

## Autres notations

$\Psi$	Grandeur quelconque
$\bar{\cdot}$	Opérateur de moyenne au sens de Reynolds
$\tilde{\cdot}$	Opérateur de moyenne au sens de Favre
$\cdot'$	Fluctuation au sens de Reynolds
$\cdot''$	Fluctuation au sens de Favre

## Abréviations

2D	Bidimensionnel
3D	Tridimensionnel
CFD	Computational Fluid Dynamics
DNS	Direct Numerical Simulation
LES	Large Eddy Simulation
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations
MCP	Matériau à changement de phase
LHS	Latent Heat Storage
LHTES	Latent Heat thermal energy Storage système
HTF	Heat Transfer fluid

# **Introduction général**

## **Introduction général**

Au cours des dernières décennies, le monde a connu un développement technologique incroyable, ainsi qu'une énorme croissance démographique ; ce qui a augmenté les besoins énergétiques mondiaux. Malgré son impact sur l'environnement (pollution, effet de serre ... etc.) L'énergie fossile représente la source la plus exploitée afin de répondre à la demande énergétique.

Alors, le recours aux autres sources nouvelles non polluantes est l'enjeu de la pluparts des gouvernements du mondes, ainsi la communauté scientifique dont le but est de répondre à ces besoins en dehors de énergie fossile ; selon l'accord de Kyoto sur le climat.

En fait, l'énergie solaire est considérée comme la source favorable qui peut remplacer celles polluantes. Ou elle peut utiliser directement pour la production de l'électricité par l'effet photovoltaïque, le chauffage et refroidissement des bâtiments ou l'eau sanitaire, aussi indirectement pour générer la vapeur d'eau utilisée pour entrainer les turbine à vapeur dans les centrales thermiques solaires (Tour solaire, panneaux solaires cylindro-paraboliques...etc.).

Cependant, la nature intermittente de l'énergie solaire et les fluctuations du rayonnement solaire constituent un énorme obstacle à l'utilisation efficace de l'énergie solaire thermique à tout moment. Ce qui pose un déséquilibre pendant une période où elle est abondante.

Cette limitation a poussé les chercheurs dans le domaine de l'énergie solaire thermique à trouver des techniques pour stocker des excès d'énergie solaire, qui sont ensuite libérés aux périodes déficitaires et de les adapter ainsi sa production à sa consommation. La technique de stockage se fait par de chaleur sensible ou latente.

Le stockage thermique sensible a une capacité de stockage élevée ; cependant, une masse et un volume élevé de matériaux sensibles sont nécessaires afin de stocker une quantité raisonnable de chaleur. Par contre, le stockage par chaleur latente à l'aide des matériaux a changement de phase MCP présente de nombreuses caractéristiques intéressantes, telles que des processus de charge/fusion et de décharge/solidification presque isothermes et un faible rapport volume/énergie. Ces caractéristiques attrayantes font les MCP comme une bonne solution dans de nombreuses applications, telles que le stockage d'énergie, la climatisation, la gestion thermique, les appareils médicaux et les réactions chimiques, ainsi que les batteries de véhicules électriques.

En dépit de leurs importances, les MCP souffrent de leur faible conductivité thermique de l'ordre de (0,2 - 0.7) w/m.K en moyenne ; ce qui ne permet pas d'avoir un bon transfert thermique pendant les processus de charge/décharge. L'une des solutions les plus prometteuse pour résoudre ce problème est la dispersion des nanoparticules solides à une grande conductivité thermique dans le MCP est le sujet de ce mémoire.

Dans le cadre de ce travail, nous avons intéressé par l'amélioration des propriétés thermo physiques du PCM utilisée dans un système de stockage par chaleur latente. Afin d'atteindre l'objectif fixé dans cette étude, on a subdivisé le travail en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique portant sur les publications réalisées sur le stockage d'énergie par chaleur latente et par chaleur sensible avec l'amélioration des performances du stockage d'énergie.

Dans le second chapitre on fait une étude le stockage thermique, en présentant les différents matériaux à changement de phase, leurs applications et les lois les plus utilisées.

Le troisième chapitre est consacré à la simulation numérique, la discussion et l'interprétation des résultats.

En fin une conclusion générale.

# **Chapitre 1 :**

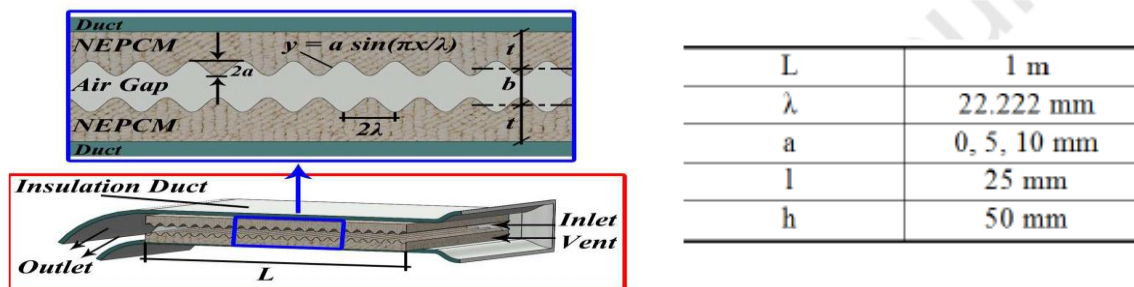
# **Recherche bibliographique**

## Introduction

Dans le contexte actuel de la demande en énergie croissante, la dépendance aux énergies fossiles conduira à une crise énergétique dans un futur proche. Actuellement, bien que les ressources énergétiques renouvelables soient utilisées à grande échelle, l'acceptabilité sociale reste un défi à relever. La faible densité du rayonnement solaire à la surface terrestre et ses fluctuations encourage à l'introduction d'un moyen de stockage d'énergie par chaleur latente.

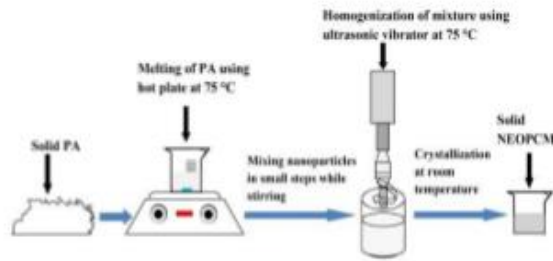
Les études effectuées dans le passé ont montré que la première application d'un matériau à changement de phase portait sur le chauffage et la climatisation dans les bâtiments. Vers les années 40, Telkes a conçu un système de chauffage solaire résidentiel et en 1948, l'étude expérimentale sur le changement de phase a débuté à Dover, dans le Massachusetts.

**Xiaojie Ma et al[1]** ont simulé le processus de solidification d'un matériaux à changement de phase MCP dispersées par des nanoparticules dans un échangeur de chaleur de deux tubes concentriques, dont le tube à l'intérieur a des paroi ondulées. Cette technique permet d'augmenter la conductivité thermique du MCP et améliore le taux de stockage d'énergie. Les résultats de leurs simulations numériques ont montré que la génération d'entropie diminue lorsque la concentration de nanoparticules augmente.



**Fig. 1- Unité actuelle et échantillon associé.**

**R.K. Sharma et al [2]** ont préparé un nouveaux MCP composé de l'acide palmitique dispersé par plusieurs quantités de nano-titane destiné pour le stockage de l'énergie thermique. En effet, les résultats montrent que la conductivité du nano-MCP augmente progressivement par 12.7, 20.6, 46.6 et 80% ce qui rend ce matériau plus efficace pour l'application au stockage de l'énergie thermique.

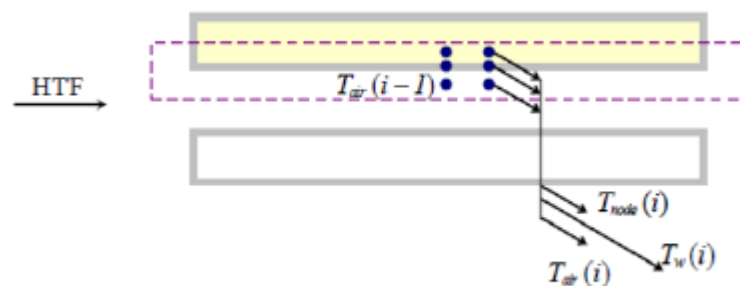


**Fig. 2-les étape de preparation des composites PA/TiO2.**

**Seeniraj et al [3]** ont étudié le comportement d'un MCP utilisé pour le stockage à haute température dans un système tube-calandre. En effet, Ils ont trouvé qu'une petite quantité du MCP à la sortie du tube reste à l'état solide lors de fusion. Cela est dû à la différence entre la température du fluide caloporteur et celle de la fusion du MCP. Il est également rapporté que la présence d'un petit nombre d'ailettes annulaires peuvent maintenir une différence de température relativement élevée entre le fluide caloporteur et le point de fusion du MCP et que l'on peut ainsi assurer une fusion homogène partout dans le système.

**Mettaweea et Assassab[4]** ont présenté une étude expérimentale d'un système composé de capteur solaire-MCP. En fait, l'excès de l'énergie solaire incidente est stockée dans le MCP solide ensuite cette l'énergie est récupérée par l'eau froide circulant dans un échangeur émergé dans le MCP. Les résultats expérimentaux ont montré que le coefficient moyen de transfert thermique est proportionnel à l'épaisseur de la couche du MCP.

**Zafer Saïd et al [5]** ont analysé le processus de solidification dans un système de stockage par chaleur latente composé de deux tube coaxiaux, dont la section transversale du tube se forme de flocon de neige. En outre, l'espace annulaire est rempli de MCP dispersé par des nanoparticules hybrides. Les résultats ont montré que l'augmentation du facteur de forme des nanoparticules entraîne une fraction solide plus élevée dans le système, ce qui accélère le processus de solidification.



**Fig. 3- le module utilisé dans la simulation de Transfer de chaleur.**

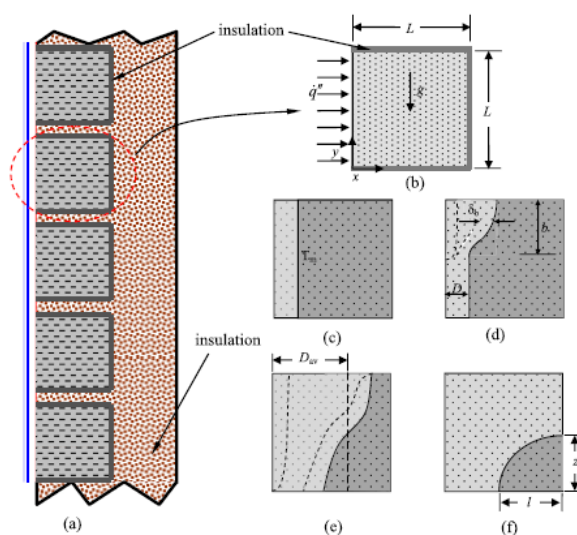


**Adriano scacovelli et al [6]** A l'aide d'un modèle d'informatique de dynamique de fluide leur étude a été réalisée et ils ont présenté une analyse numérique de la fusion du MCP dans une seule unité de stockage par chaleur latente a tube-enveloppe. Les résultats indiquent que le temps de fusion diminue de 7% lorsque le débit massique est doublé.

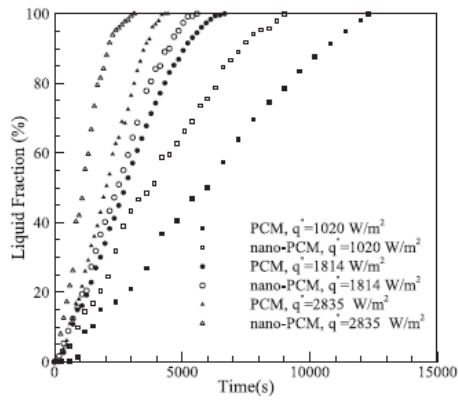
**M. Alizadeh,et al[7]** ils ont étudié le processus de solidification d'un MCP avec de nanoparticules dans un système de stockage thermique avec une section transversale ce forme de flacon de neige. Ils ont remarqué qu'en raison d'un facteur de forme relativement plus élevé, le taux de solidification du MCP avec des nanoparticules de lamina était plus élevé que celui de l'hexaèdre et des plaquettes. Cependant, l'énergie thermique totale était inversement proportionnelle au facteur de forme.

**Zhang et al [8]** ils ont étudié numériquement l'effet de la convection naturelle d'un MCP dans une enceinte sphérique. Leurs résultats montrent que la fusion du MCP se fait rapidement dans la partie supérieure de l'enceinte où le transfert de chaleur est dominé par la convection par rapport la partie inférieure où se manifeste la conduction.

**MANAR AL-JETHELAH et al [9]** ils ont étudié la performance thermique du stockage actif de l'énergie thermique des murs (AW-TES). Les expériences sont menées pour illustrer l'impact de l'addition de nanoparticules dans le MCP sur le processus de fusion. Les résultats expérimentaux montrent que les nanoparticules améliorent significativement le processus de fusion.

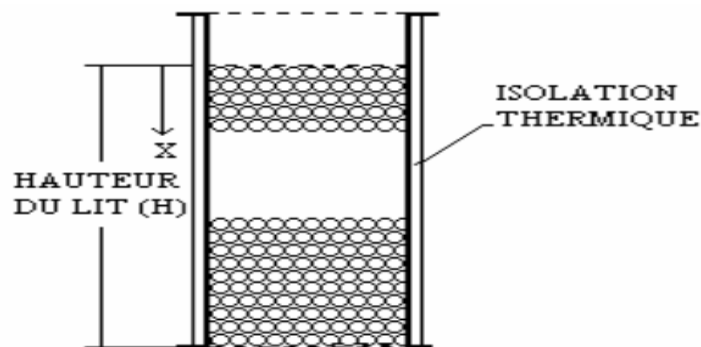


**Fig. 4- schéma de principe d'un système (a) de stockage d'énergie thermique a paroi active.**

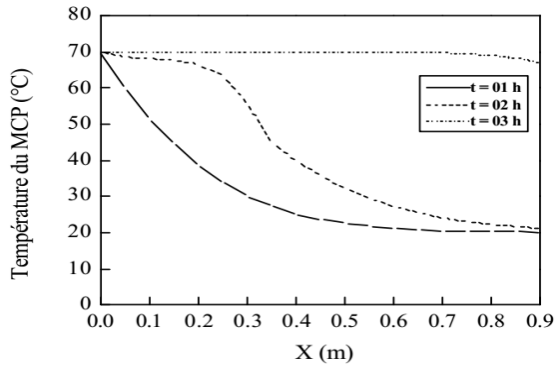


**Fig. 5- fraction liquide expérimentale de base et nano-mcp en fonction du temps pour différents flux thermique.**

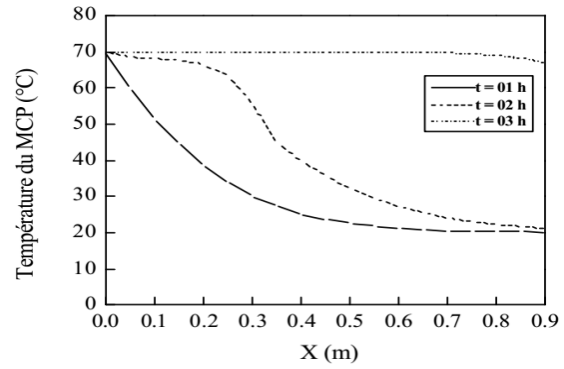
**Ben Mansour et Hamden[10]** ont présenté une étude numérique du stockage de l'énergie thermique par chaleur latente à basses températures ( $0^{\circ}\text{C}$  à  $100^{\circ}\text{C}$ ) dans un lit cylindrique rempli de sphères uniformes, disposées au hasard et contenant chacune un MCP, traversé par un flux d'air. Un modèle numérique mono dimensionnel à deux phases séparées est appliqué. Il a permis de prédire la distribution axiale de la température du fluide et du matériau fusible le long du lit ainsi que les performances de ce lit fixe dans les deux modes de stockage et de récupération de la chaleur pour une température du fluide à l'entrée constante et un nombre de Reynolds variable. Le modèle développé s'applique à la fois pour un processus de changement de phase isotherme et non isotherme. Il montre que la vitesse d'écoulement de l'air ainsi que le rapport hauteur/diamètre du lit avaient une influence notable sur le processus de stockage.



**Fig. 6- Schéma du lit de stockage**

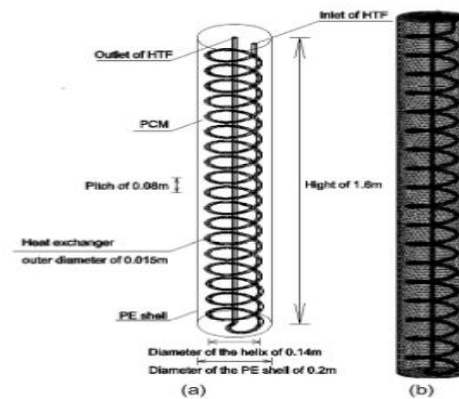


**fig. 7- Evolution de la température moyenne du lit en fonction du temps au cours d'un cycle (stockage et déstockage).**



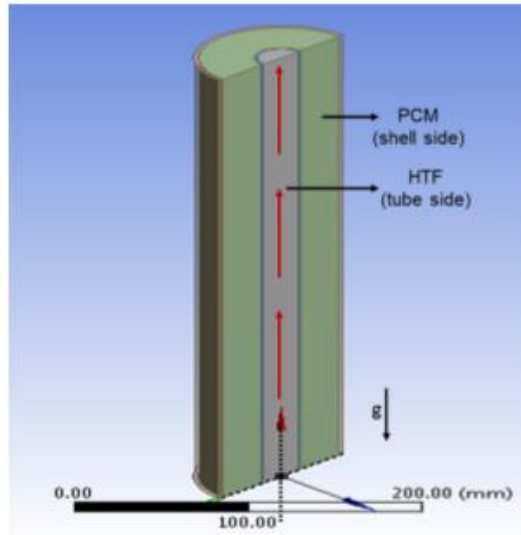
**fig. 8- Distribution de température de l'air à l'entrée, durant le stockage.**

**Rwiquig Du[11]** ont étudié numériquement un processus de fusion du MCP amélioré par des additifs nanométriques dans un système de stockage par chaleur latente en utilisant un échangeur thermique hélicoïdale. Leurs résultats montrent que le MCP amélioré par des nanoparticules peut économiser 19,6% du temps de fusion total consommé par le MCP pur. De plus, la dispersion des nanoparticules a considérablement atténué la non-uniformité de température dans l'unité.



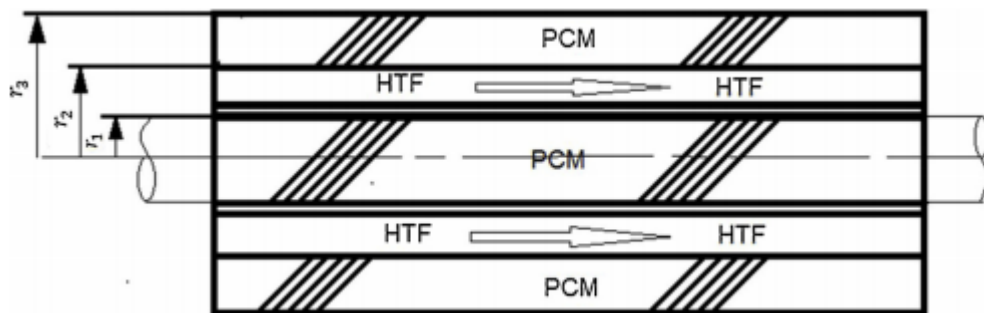
**Fig. 9- géométrie 3D de l'unité LHS.**

**Nitesh das et al [12]** ont étudiés numériquement le phénomène de fusion des nano composites à base de carbone dans un système de stockage de l'énergie thermique. En comparant l'effet de l'addition des nanoparticules sphériques et les nanostructures uni et bidimensionnelles, les résultats montrent que les nanoparticules sphérique n'améliorent pas la conductivité thermique du MCP, alors que celles des nanostructures uni et bidimensionnelle réduisent le taux de fusion de 15% et 25% en raison d'amélioration de la conductivité thermique.



**Fig. 10- vue 3D de la géométrie du système LHTES. Le sens d'écoulement du fluide HTF est indiqué en rouge.**

AJID GORZIN et al [13] ont étudié les performances thermiques d'une unité de stockage formée de trois tubes coaxiaux avec différents rayons, mais avec une masse constante du MCP. Ce dernier était situé dans le tube interne et la région entre le tube central et le tube externe **Fig.11**. Il a été constaté que les rayons optimaux des tubes intérieur, central et extérieur étaient de 20,2, 54 et 67,4 mm, respectivement et le temps de solidification du MCP a diminué de 62% par rapport une unité de stockage formée deux tubes.



**Fig. 11-Schéma du modèle physique étudié.**

Radouane Elbahjaoui[14] ont fait un étude numérique sur la fusion du Nano-MCP dans une unité de stockage rectangulaire LHSU (LHSU : constituée d'un certain nombre de plaques identiques de nano-MCP séparées par des canaux rectangulaires dans lesquels l'eau s'écoule sous forme de fluide caloporteur). Les résultats montrent que l'augmentation de la fraction volumétrique des nanoparticules améliore le taux de fusion.

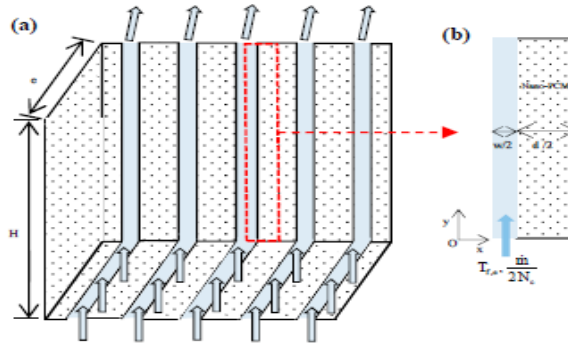


Fig. 12- schéma de (a) l'unité de stockage de chaleur latente (LHSU) et (b) le Domain de calcul.

Walid FOU DHIL et al [15] ont étudié les performances d'un système de stockage de l'énergie thermique dans un canal poreux vertical. Ils sont analysées pour deux modes de stockage : sensible et latente. Le canal poreux, qui est soumis à une ventilation d'air à faible vitesse, est limité par deux parois soumises à deux contraintes différentes : l'une est chauffée par une densité de flux constante alors que l'autre est supposée adiabatique. Pour décrire le comportement du système, les équations de conservation utilisant le modèle à deux températures et appliquant la loi de Darcy-Brinkman sont utilisées. Une modélisation de la quantité d'énergie stockée pour les deux modes de stockage a été effectuée. Les résultats indiquent que l'accroissement de l'énergie stockée dans des billes de MCP comparée à celle emmagasinée dans des billes de verre varie de 45 à 82 % lorsque la température d'entrée de l'air varie de 25 à 40 °C.

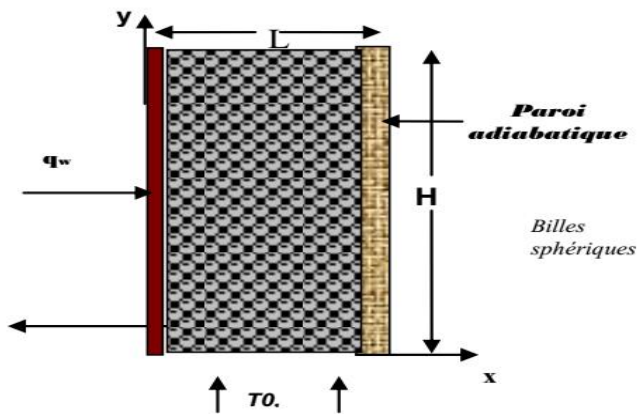


fig. 13- canal poreux vertical.

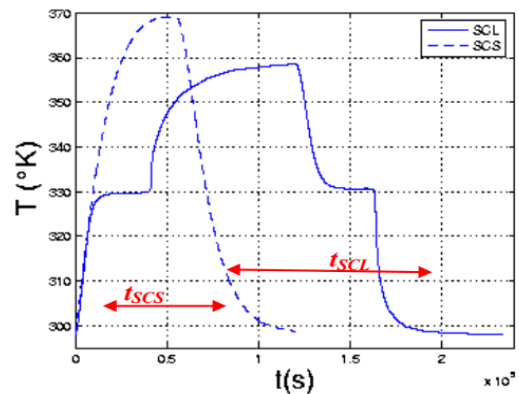


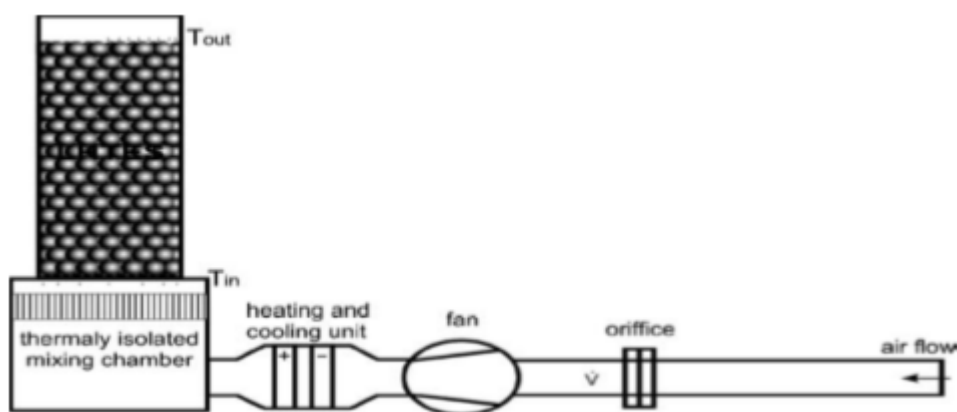
fig. 14- Comparaison du stockage thermique par Chaleur sensible et par chaleur latente.

Dhaidan[16] ont étudié expérimentalement et numériquement le processus de fusion des nano-PCM (nanoparticules de CUO dispersées dans MCP) dans une enceinte carrée. Une paroi verticale de l'enceinte a été exposée à un flux de chaleur constant, tandis que l'autre paroi supposées adiabatique. Les auteurs ont constaté que l'utilisation de nanoparticules améliore la conductivité thermique du nano-MCP et, par conséquent, le taux de transfert de chaleur augmente, ce qui accélère la fusion. Le processus de fusion s'améliore à mesure que la fraction

volumique des nanoparticules augmente. Cependant, des fractions volumiques plus élevées de nanoparticules pourraient provoquer une agglomération et une précipitation.

**Ho et Gao[17]** ont mené une étude expérimentale sur la fusion de nano-MCP (nanoparticules d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  dispersées dans du n-octadécane PCM) dans une enceinte carrée chauffée depuis la gauche avec un flux thermique constant et refroidie par la droite à température constante. Les résultats ont indiqué que l'addition de nanoparticules au MCP réduit l'effet du transfert de chaleur par convection naturelle.

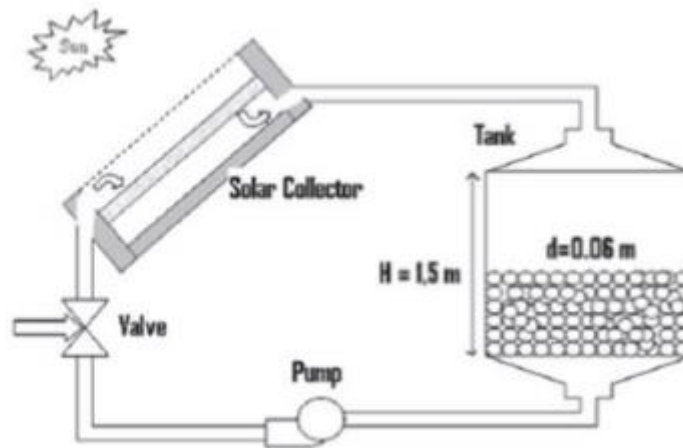
**Arkar[18]** a étudié un récipient cylindrique contenant des sphères remplies de paraffine. Leur modèle a été adapté pour tenir compte de la non-uniformité de la porosité et de la vitesse du fluide. Les deux sont la conséquence d'un petit rapport de diamètre tube / sphère de leur système. Une comparaison des résultats numériques et expérimentaux a confirmé le rôle important des propriétés thermiques du PCM, en particulier pendant les processus à fonctionnement lent.



**Fig. 15-** une illustration de l'expérience étudiée.

**Dhaidan[19]** ont étudié expérimentalement et numériquement la fusion d'un nano-PCM (nanoparticules de  $\text{CuO}$  dispersés dans du n-octadécane PCM) à l'intérieur d'une cavité annulaire formée entre deux cylindres circulaires, où le tube cylindrique interne est soumis à un flux thermique constant, tandis que la coque externe est isolée thermiquement. Ils ont rapporté que l'ajout de 3% de nanoparticules augmentait respectivement le nombre de Rayleigh et le nombre de Stefan de 6% et 2%. Les résultats de la simulation ont révélé le développement de la vitesse de fusion par suspension de nanoparticules dans le PCM. Ils ont également signalé que l'impact du sous-refroidissement avait une influence négative sur le processus de fusion dans lequel le sous-refroidissement prolongeait le temps de charge.

**Kouskso [20]** ont présenté un système consiste un chauffe air solaire associé avec un réservoir cylindrique contient des capsules sphériques rempli d'un MCP.



**Fig. 16-** Système solaire de changement de phase.

Les résultats numériques montrent que l'efficacité thermique du système peut être considérablement améliorée pour une certaine plage de température de fusion du PCM et peut également réduire l'irréversibilité à l'intérieur du système tout en utilisant un PCM multiple.

**Alomair[21]** ont étudié numériquement et expérimentalement le processus de fusion d'un MCP (oxyde de cuivre/huile de noix de coco bio-base MCP) dans un système de stockage d'énergie thermique formée de deux cylindriques concentriques. Ils ont comparé la fraction liquide du MCP, la distribution de la température, le taux de stockage de l'énergie et le transfert de chaleur du MCP pur et du nano-MCP. Les résultats numériques et expérimentaux ont montré que le taux de fusion était plus rapide dans la nano-MCP que dans la MCP pure grâce à l'amélioration effectuée par les nanoparticules.

**Farid et al. [22]** ont mis l'accent sur les MCP (paraffines, sels hydratés), l'encapsulation et d'autres applications, allant du stockage de chaleur et de fraîcheur dans les bâtiments à l'entreposage thermique dans les satellites, ainsi que les vêtements de protection.

**Kuznik et al. [23]** étaient intéressés par l'évaluation des MCP en se basant sur leurs propriétés et leurs applications. Premièrement, ils ont décrit le MCP comme un matériau possédant la capacité de stocker de l'énergie thermique. L'augmentation de la température provoque un changement d'état solide à liquide par réaction endothermique accompagnée d'une absorption de chaleur.

## Conclusion

A partir de cette synthèse bibliographique, nous pouvons constater que le stockage thermique par chaleur latente peut couvrir largement suffisant les besoins énergétiques domestiques et de les équilibrer à cause de la nature intermittente de l'énergie solaire entre jour et nuit. Cependant, la faible conductivité thermique des matériaux à changement de phase MCP réduisent l'efficacité des systèmes de stockage. Cela provoque les scientifique de chercher à trouver une solution pour laquelle ils peuvent améliorer les propriétés thermique des MCP ainsi le transfert de chaleur au sein des unités de stockage.

Dans le présent mémoire, nous voulons étudier numériquement l'amélioration des performances thermiques d'une unité de stockage par chaleur latente formé de deux tubes concentrique. En effet, cette amélioration est basé sur l'addition des nanoparticules  $Al_2O_3$  dispersées dans un MCP avec plusieurs fractions volumiques 0.1%, 0.5%, 3%, 5% et 10% afin d'augmenter sa conductivité thermique. En fin des simulations numériques sont effectuées pour les cycles de charge et de décharge pour tous les échantillons nano-MCP, afin d'évaluer les performances thermiques comprennent le taux de charge/décharge, l'énergie totale stockée ou libérée, la distribution de la température et la propagation des interfaces solide-liquide dans l'unité de stockage.



# **Chapitre 02**

## **Généralité sur les matériaux à changement de phase**

## **Introduction**

Les MCP, appelés matériaux à changement de phase, sont des éléments de stockage de chaleur latente lors du processus de fusion et de sa restitution pendant la solidification en conservant une température constante. Ces matériaux possèdent une densité importante de stockage d'énergie et une capacité à maintenir une température constante tout en absorbant la chaleur pendant la fusion et en la restituant lors de la solidification. Cet intérêt s'est développé dans le domaine de la gestion thermique et des systèmes d'énergie solaire des bâtiments et des serres.

Les MCP fondent et se solidifient dans une large plage de températures, ce qui les rend attrayants pour diverses applications. Parmi ces matériaux, les cires de paraffine qui sont bon marché avec une densité de stockage thermique modérée et une faible conductivité thermique. Les sels hydratés sont des MCP avec une plus grande densité de stockage d'énergie et une plus grande conductivité thermique mais ils présentent un super-refroidissement et une ségrégation de phase.

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

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

## **2. Matériaux à changement de phase**

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

Parmi les MCP subissant cette transformation, nous avons trois groupes de matériaux : les organiques, les inorganiques et les eutectiques.

#### **2.1.1. Les MCP Organique**

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 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. Par contre ils ont une faible conductivité à l'état solide et à l'état liquide, ils ont une Chaleur latente de fusion plus faible et ils sont inflammables.

#### **2.1.2. Les MCP inorganiques**

Les matériaux ou les substances inorganiques ont une température ou une plage de températures de fusion comprise entre -100 °C et +1000°C. Les plus utilisés sont : l'eau (température de fusion 0°C), les solutions aqueuses de sel (température de fusion inférieure à 0°C), des sels hydratés (température de fusion comprise entre 5°C et 130°C), des mélanges de sels, des mélanges de métaux (température de fusion supérieur à 150°C). Ils ont plusieurs avantages : ils ont une chaleur latente importante et une haute conductivité thermique, Ils 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 inconvénients 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.

#### **2.1.3. MCP eutectiques ou composées**

Les MCP eutectiques sont des substances composées de plusieurs MCP purs, ce sont des mélanges de MCP organiques et inorganiques (soit organique-organique soit organique inorganique ou bien inorganique-inorganique). Ils ont deux principaux avantages avec deux principaux inconvénients : 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, tandis que leurs inconvénients sont peu utilisés au niveau des systèmes industriels et ils qu'il n'y a pas assez de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux.

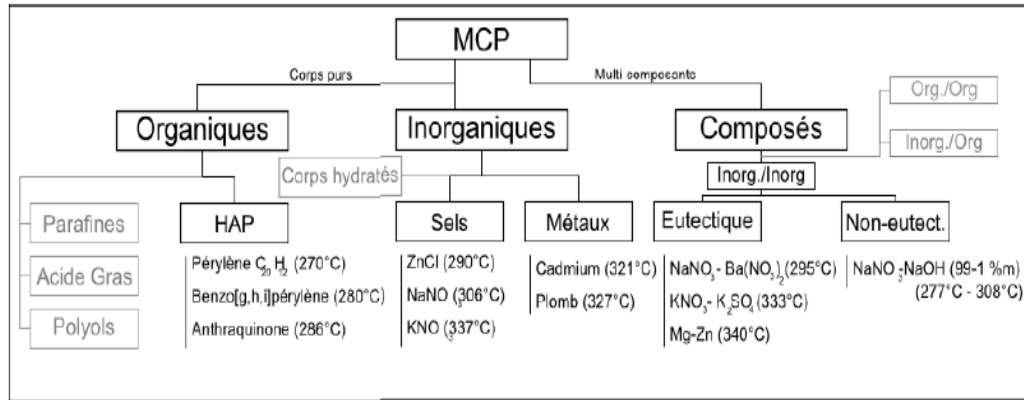


Fig. 17- Classification des matériaux à changement de phase

## 2.2 Conditionnement des MCP

Les MCP peuvent être conditionnées dans des billes microscopiques en plastique mélangées au plâtre ou au béton ou incorporés dans les pores d'un matériau porteur par imprégnation. La micro encapsulation est une méthode dans laquelle le MCP est confiné dans petites sphères dont le diamètre est de l'ordre du micromètre, sous forme sphérique ou de petits cylindres longitudinaux. Ce matériau de stockage est alors appelé coulis. La macro encapsulation est une méthode dans laquelle le MCP est emballé dans des contenants aux dimensions variant du décimètre au mètre. L'avantage de l'encapsulation du MCP permet de fournir une importante zone de transfert thermique. Lane a répertorié plus de 200 matériaux utilisés pour le stockage thermique avec un changement de phase dans une plage de température variant de 10 à 90 °C. Il a évalué la faisabilité technique et économique d'utilisation des MCP encapsulés pour des applications de chauffage solaire résidentiel et a développé des moyens d'encapsulation de certains matériaux dans des contenants métallique et en plastique. L'intégration des MCP sous forme de capsules dans les surfaces peut améliorer le stockage énergétique dans l'enveloppe du bâtiment.



Fig. 18- Exemple des MCP micro-encapsulés : à l'état poudre et à l'état liquide.

**Tableau 1- Avantages et inconvénients des MCP.**

	Avantages	Inconvénients
<b>Organiques</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Pas de ségrégation de phase.</li> <li>2. Sont chimiquement stables.</li> <li>3. La surfusion est négligeable.</li> <li>4. Facilement incorporés aux systèmes de stockage de chaleur.</li> <li>5. Sobriété écologiques.</li> <li>6. 100% recyclables.</li> <li>7. Peu sensible aux cycles de</li> <li>8. fusion/solidification.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Faible conductivité thermique</li> <li>2. Dilatation volumique élevée.</li> <li>3. Inflammables.</li> <li>4. Coût élevé par rapport aux sels hydratés.</li> </ol>
<b>Inorganiques</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Disponibles.</li> <li>2. Grande chaleur de fusion.</li> <li>3. une Conductivité thermique élevée.</li> <li>4. Une Faible dilatation volumique.</li> <li>5. Non inflammables.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. La ségrégation.</li> <li>2. Perte d'efficacité liée aux cycles de fusion/solidification.</li> <li>4. La surfusion.</li> <li>5. La corrosivité.</li> <li>6. La Déshydratation liée aux cycles thermiques.</li> </ol>

**Tableau 2- Propriétés thermiques de certains MCP**

Matériaux		Température de fusion (c)	Enthalpie de fusion (kJ kg)
MCP organiques	Eau	0	333.6
	Stéarate de butyle	19	140
	L'acide caprique-l'aurique	21	143
MCP inorganiques	KF.4H <sub>2</sub> O	18.5	231
	Mn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O	25.8	125.9
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .10H <sub>2</sub> O	32	251
	66.6% CaCL <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O+33.3 % Mgcl <sub>2</sub> O.6H <sub>2</sub> O	25	127
	48% CaCL <sub>2</sub> +4.3% NaCl+47.3% H <sub>2</sub> O	26.8	188
	47% Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O+53% Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O	30	136

### 2.3 Sélection du MCP

Elle est basée sur des diverses critères :

**2.3.1Température de fusion :** C'est une des caractéristiques essentielle du matériau, Elle représente la limite de stockage et de déstockage de la chaleur latente.

**2.3.2La cristallisation :** c'est le résultat de deux processus successifs : la nucléation puis la formation d'un cristal macroscopique : La nucléation est la genèse de noyaux solides puis La croissance des noyaux et formation du cristal macroscopique.

L'état cristallin obtenu est caractérisé par un arrangement régulier des atomes, des molécules ou des ions suivant un modèle rigide appelé réseau, alors c'est cet arrangement moléculaire qui fait la différence entre un solide cristallin et un solide amorphe (solide sans structure régulière).

### 2.3.3. Les critères économiques

**a. Prix ou le cout :** il est important de prendre ce paramètre en compte lors du choix du candidat. Le prix sera considéré comme élevé au-dessus de 40 \$.kWh et bas sous les 10 \$.kWh, il doit être le plus bas possible.

**b. La disponibilité :** L'objectif est d'avoir un matériau disponible à plus de 10 000 manuels avec un maximum de fournisseurs différents pour assurer une certaine stabilité des prix

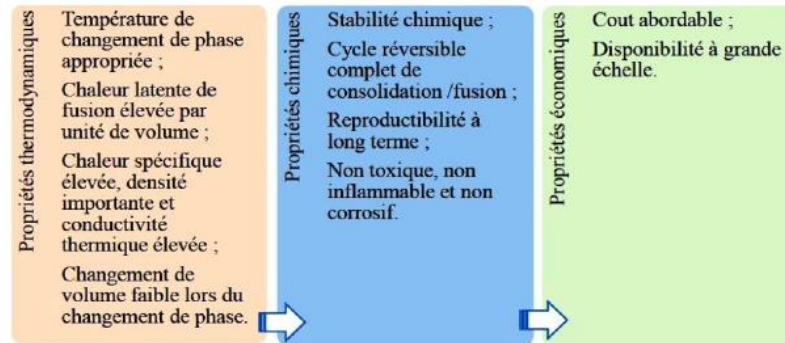


Fig. 19-Critères de sélection d'un MCP pour le stockage de la chaleur latente

### 2.3.4 Toxicité et l'inflammabilité :

Au regard des quantités de matériaux engagées, il est indispensable de minimiser l'impact écologique en éliminant les matériaux toxiques (Cela conduit également à l'élimination des composés de chromate ( $\text{CrO}_4$ ) et dichromate ( $\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) qui sont très toxiques.) aussi certains composés fluorés tels

Que le fluorure de sodium ( $\text{NaF}$ ), le di fluorure de Baryum ( $\text{BaF}_2$ ) et le fluorure de potassium ( $\text{KF}$ ) ont été éliminés à cause de leur toxicité aigüe, ainsi les HAP faisant l'objet de nombreuses études en raison de leur caractère cancérigène ou mutagène et ils sont aussi été écartés.

Au niveau de l'inflammabilité, il est nécessaire de limiter le maximum les risques, les chlorates ( $\text{ClO}_3$ ) et perchlorates ( $\text{ClO}_4$ ) ont été exclus par le consortium, car ce sont de forts

Combustibles utilisés dans la fabrication d'explosifs ou de carburants solides pour fusée.

### 2.4 Les problèmes liés au changement de phase

**a. La corrosion :** Le non stabilité du système MCP-container a Limité depuis longtemps l'expansion de l'utilisation des stockages à chaleur latente. Ce phénomène est dû soit : au manque de stabilité chimique du matériau lui-même, et/ou la corrosion entre le MCP et le container. Dans ce sens, les paraffines sont réputées pour la conservation de leurs propriétés thermiques au fil Des cycles charge/décharge. Par contre, la nature ionique des sels

Hydratés pose des problèmes de corrosion avec les containers métalliques.

**b. La surfusion** : est lié à la cristallisation, c'est l'une des Difficultés majeures affectant le stockage à chaleur latente. Pour comprendre la surfusion on revient à comprendre les mécanismes qui font lors du refroidissement d'un liquide, la solidification se fait en général lorsque la température de fusion est inférieure à la température de changement de phase, on a jamais un solide pur au-delà de la température de fusion par contre un matériau peut rester

Liquide jusqu'à dizaines de degrés en dessous de la température de Fusion. Il peut même arriver pour certains matériaux que la Fusion se déclenche à une température  $T$  inférieure à  $T_f$  ( $T$  très proche de  $T_f$ ) ; c'est le cas de certains matériaux comme les sels purs à fusion congruente.

Dans ce cas, pour cristalliser sous une pression atmosphérique (pression constante), la température d'un matériau à changement de phase Doit être inférieure à la température de solidification théorique  $T$  cette température est appelée température de nucléation. Entre ces deux températures, la solution est en surfusion, le matériau est liquide mais instable. Alors le départ d'un cristal peut engendrer à n'importe quel moment rapidement et complètement la cristallisation de l'ensemble.

Ce phénomène de surfusion réduit les performances énergétiques des matériaux de stockage par chaleur latente parce que la réaction exothermique (Décharge de la chaleur) s'opère à une température inférieure à celle de la réaction endothermique de fusion (charge). Cette différence de Température va entraîner une dégradation de flux restitué par rapport au flux absorbé.

**c. La ségrégation** : Dans le cas des sels hydratés à fusion non congruente (C'est à dire que la phase liquide est de la même composition que la phase solide) la partie la plus dense est en général le solide reste au fond de récipient. Cette dernière rend difficile l'utilisation de ces composés pour un stockage à chaleur latente, ce phénomène on le voit malheureusement dans la plus part des matériaux à changement de phase et pour éviter ce problème et stabiliser les composées quelque solutions sont proposées par les chercheurs :

- **La diminution des dimensions** : du récipient dans lequel le matériau est encapsulé car ceci confère au matériau une vitesse de refroidissement supérieure à la vitesse de décantation. L'application de cette méthode n'est cependant pas très réalisée dans les bâtiments.
- **L'agitation** : mais elle n'est pas réalisée dans la vie pratique car c'est une méthode de laboratoire, elle permet de rendre homogène le liquide de départ avant la solidification.



## 2.5. Amélioration de la conductivité des MCP

Le stockage de l'énergie thermique par MCP est une technologie mature. Elle permet l'optimisation des dépenses énergétiques en stockant l'énergie et en valorisant les rejets basse température (entre 40° et 150°C) des processus industriels, de ces avantages, les MCP peuvent stocker de 5 à 14 fois plus de chaleur que les matériaux de stockage à chaleur sensible, Réduction de la puissance frigorifique installé, Économies d'Énergie, Limitation des émissions de CO<sub>2</sub>.

Les ailettes jouent un rôle rentable dans le domaine de transfert de chaleur, de ces avantages, augmenter le coefficient d'échange par convection h et la vitesse d'écoulement, l'efficacité des ailettes triangulaires est la meilleure parmi les autres ailettes, Et d'inconvénients, comme elle est d'intérêt grande mais son inconvénient principal est sa poids élevé.

## 2.6. Les domaines d'applications des MCP

Ils sont utilisés dans des divers domaines citons parmi les :

- **Applications médicales :** Dans le secteur médical, une des applications principales est le transport de sang Et des organes. Ils se présentent principalement sous la forme de « petits sacs plastiques contenant le matériau choisi disposé au plus près du produit à conserver.
- . D'autres applications médicales : des coussinets chauds ou froids pour traiter la douleur localisé dans le corps
- **b. Le stockage de l'énergie thermique :** stockent l'énergie en changeant de phase solide-liquide (fusion) puis ils Restituent la chaleur par le changement de phase liquide-solide (la solidification). Le choix de MCP est basé sur des facteurs : le prix, la chaleur latente et la conductivité thermique (phases liquide et solide) etc... .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.

- **Le transport des produits alimentaires**

Les MCP sont utilisés dans les industries alimentaires Pour minimiser au maximum les variations de température que subissent les aliments.



**Fig. 20- Les applications Transport de produits alimentaires.**

**Tableau 3- applications potentielles de stockage de l'énergie thermique par les MCP**

Méthode d'utilisation du MCP	Applications	Objectif	Secteur
Stockage par MPC réparti dans la cloison (plâtre, ciment, PVC, mousse, verre, nids d'abeille)	Chauffage et conditionnement d'air des locaux	Consommation heures creuses et conservation	Tous
Chauffage électrique avec stockage MCP	Chauffage des locaux	Consommation heures creuses et conservation	Résidentiel, commercial et institutionnel
Stockage MCP dans les gaines aérauliques pour le chauffage et la climatisation	Chauffage et conditionnement d'air des locaux	Consommation heures creuses	Commercial, institutionnel et industriel
Préchauffage d'air à MCP pour pompe à chaleur	Chauffage des locaux	Consommation heures creuses et conservation	Résidentiel, commercial et institutionnel
Murs rideaux	Chauffage des locaux	Conservation	Commercial, industriel et institutionnel
Chauffe-eau avec le stockage par les MCP	Chauffage des locaux	Consommation heures creuses	Résidentiel, commercial et institutionnel

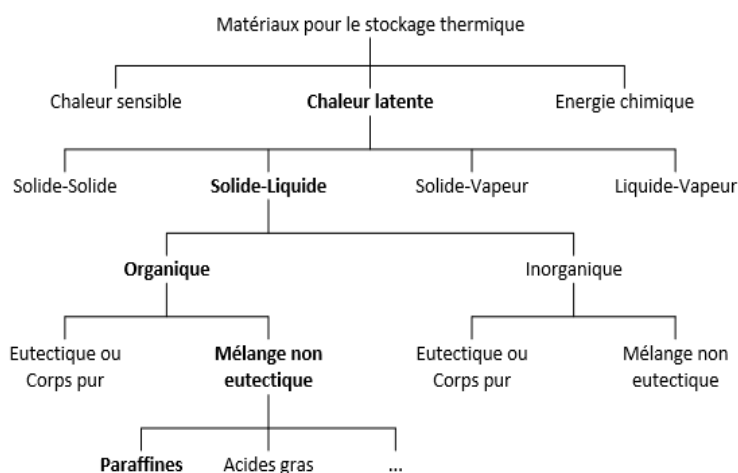
### 2.7. Classe de MCP

Le stockage thermique par chaleur latente utilise l'énergie d'un changement d'état réversible du matériau de stockage. Les intérêts du stockage d'énergie par chaleur latente sont multiples

- Stockage à un niveau de température et non pas sur une plage de température ;
- Densité de stockage plus élevée.

Les transitions de phases liquide-gaz (évaporation) ou solide-gaz (sublimation) sont les transformations les plus énergétiques. Néanmoins le stockage de grandes quantités de matériau

En phase gazeuse à haute pression (pour avoir une densité d'énergie volumique acceptable) et à haute température est assez délicat techniquement C'est notamment pour Cette raison que la transition solide-liquide est la plus couramment utilisée dans le domaine du stockage d'énergie par chaleur latente, les transitions de phase solide-solide étant aussi envisageables, mais globalement moins énergétiques . Tout matériau présentant des phases transitoire de phase réversible Solide et liquide thermodynamiquement stables donc potentiellement un MCP utilisable dans l'optique du stockage d'énergie thermique par chaleur latente Ainsi l'éventail de températures accessible par ce mode de stockage s'étale des Températures négatives jusqu'à de très hautes températures Supérieures à 500 °C.



**Fig. 21- Classification des MCP parmi les matériaux de stockage de chaleur.**

## 2.8. MCP les plus utilisés

### a. 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 Constante. A l'inverse, Lorsque ce processus de changement de phase c'est à dire du liquide à solide ; la chaleur latente précédemment stockée est libérée. Il est disponible dans une large gamme de températures de fonctionnement de  $-10^{\circ}\text{C}$  à environ  $82^{\circ}\text{C}$ .

On note parmi ses avantages :

- c'est un produit de longue durée.
- à une très grande capacité de stockage d'énergie thermique.
- le stockage de la chaleur et de la libération ont lieu à température Constante.
- Ils ont une gamme de températures de fusion entre env.  $-10^{\circ}\text{C}$  et  $90^{\circ}\text{C}$ .

- facilement à manipulé.
- écologiquement inoffensif parce qu'il est inttoxique Et 100% recyclable.

### **b. Matériaux changement de phase SP**

La création de la chaleur latente mêle 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.

Ses applications sont multiples Dans les systèmes de refroidissement actif et passif et de chauffage, comme par exemple des climatiseurs et des éléments de plafond et le mur. SP devient le matériau préféré dans le domaine de construction, ses propriétés peuvent être adaptées aux besoins Particuliers des clients. Il peut également être transformé en substance ou de la structure d'absorption

Ses avantages sont aussi multiples :

- stable tout au long des cycles de changement de phase.
- une capacité élevée de stockage thermique.
- une surfusion limitée.
- SP-21 à SP26E ininflammables.
  - non toxique.
  - Les températures de fusion différentes entre  $-21^{\circ}\text{C}$  et  $90^{\circ}\text{C}$  sont Disponibles.

### **2.9. Le stockage thermique de l'énergie**

Un des principaux problèmes de l'énergie solaire est son intermittence induite par les cycles jour/nuit ou la nébulosité. En plus, l'intensité de l'énergie émise par le soleil varie temporellement selon différentes échelles :

- à l'échelle quotidienne, l'irradiation solaire présente une forme gaussienne.
- à l'échelle annuelle, l'irradiation solaire varie avec les saisons.

Le stockage d'énergie propose une solution aux problèmes d'intermittence et de surproduction En découplant la production de chaleur et la production d'électricité, permettant ainsi d'adapter cette dernière à la demande du réseau. Il s'agit d'équilibrer dans le

Temps l'offre et la demande en énergie. Donc Les différents types de stockage ont été développés pour magasiner L'énergie pendant une période où elle est abondante et/ou moins coûteuse pour l'utiliser autrement l'ors qu'elle est rare ou très chère.

Il existe des solutions pour stocker de l'énergie. Le Choix d'une de ces solutions dépend de plusieurs paramètres, surtout la nature de l'énergie qui doit être stockée (mécanique, électrique ou thermique).et dépend aussi selon usage visée (transport, industrie, ou bâtiments).

- **Le stockage sous forme d'énergie cinétique**

Le stockage Consiste à entraîner une masse (disque, anneau ou tube) à haute vitesse, L'énergie stockée va se récupérer par la suite en freinant la masse en mouvement lors du déstockage, Ce système est utilisé pour la régulation des moteurs par exemple dans le domaine du transport, des volants d'inertie permettent de stocker l'énergie lors du freinage de véhicules pour la pour la récupérée lors du démarrage et c'est le même principe de Formula 1 depuis 2009.

- **Le stockage sous forme d'énergie potentielle**

C'est le cas dans Les stations de pompage permettent de stocker de l'électricité sous forme d'énergie potentielle de l'eau. Lors du stockage l'eau est pompée depuis un réservoir inférieur vers un réservoir supérieur augmentant ainsi son énergie potentielle, Elle revient ensuite à son point De départ à travers une turbine pour produire de l'électricité. Ce mode de stockage de l'électricité est le plus répandu avec pas moins de 127 GWe de capacité installée dans le monde, Soit environ 99 % de la capacité totale mondiale de stockage électrique.

- **Le stockage sous forme d'énergie interne**

Il est possible de stocker de l'électricité sous forme d'énergie interne par la compression de l'air stocké dans des cuves ou dans des cavités naturelles tel que les anciennes mines de sel, et les anciens réservoirs de gaz naturel à l'aide d'une turbine de décompression l'énergie va se récupérer par la suite. .La capacité mondiale installée pour ce type de stockage est environ 440 Mwe.

- **Le stockage sous forme d'énergie électrochimique**

L'énergie est stockée avec des batteries, des super condensateurs ou des piles à hydrogène la capacité mondiale installée de batteries est d'environ 400 MWe, avec une prépondérance de la technologie sodium-soufre représentant 80 % de cette capacité.

## **2.10. Les différents types de stockage de chaleur**

### **a. Stockage par chaleur sensible**

L'énergie est stockée sous forme d'une élévation de température du matériau de stockage au sein d'un système fermé au sens thermodynamique, c'est-à-dire sans échange avec le milieu extérieur. L'expression de la chaleur sensible pouvant être stockée découle du premier principe de la thermodynamique équation :

$$Q \text{ stocke} = m CP \Delta T$$

Avec :

Q stockée, la chaleur sensible (J), m : la masse du matériau de stockage (kg), CP : la chaleur massique du matériau (J.kg-1),  $\Delta T$  : la différence entre températures moyennes finale et initiale (K).

La quantité d'énergie stockée est proportionnelle à la masse, à la capacité calorifique et à la différence de températures entre l'entrée et la sortie du matériau de stockage.

Les matériaux de stockage par chaleur sensible se divisent en deux catégories : les liquides, comme l'eau, l'huile, les sels fondus etc., et les solides, tels que la pierre, la brique, le sable etc.

- **L'eau** est un fluide caloporteur intéressant car utilisable sur une plage de température étendue, et qui dispose d'un « bonus » de capacité de stockage lors de son changement de phase.
- **L'huile Thermique** ne stocke l'énergie que de manière sensible Et n'est plus utilisable au-delà de 400 °C, et limite l'efficacité du cycle énergétique en aval.
- **les sels fondus** stockent également l'énergie uniquement sous forme sensible jusqu'à de hautes températures, Mais ont l'inconvénient de se solidifier à des températures assez hautes.

Des inconvénients majeurs interviennent en sa défaveur puisque ce

Type de stockage est limité par :

- la différence de températures disponibles,
- les déperditions thermiques entre l'intérieur et l'extérieur du système qui requiert une bonne isolation,
- l'apparition de problèmes de dilatation plus ou moins gérables selon les matériaux considéré et les conditions imposées par les cahiers des charges des industriels (compatibilité avec les fluides caloporteurs et leur tenue dans le temps par exemple.

De nombreuses applications de ce type de stockage existent dans le secteur du bâtiment. Les matériaux entrant en jeu dans le stockage par chaleur sensible sont stockés dans des réservoirs de natures différentes comme des cuves de petites ou grandes tailles (notamment des ballons d'eau chaude), dans des systèmes de Stockage souterrain, en aquifère artificiel, ou encore dans des matériaux spéciaux : matériau utilisé pour fabriquer des briques réfractaires à haut pouvoir d'accumulation.

## b. stockage par chaleur latente

La chaleur latente est la quantité de chaleur absorbée ou restituée par un matériau lors de son changement de phase, à température et a pression constantes, donc c 'est de l'énergie emmagasinée grâce au Changement d'état d'un matériau de stockage.

Elle s'exprime ainsi équation :

$$Q \text{ latente} = m l_s$$

Avec :  $m$  : la masse du matériau de stockage (kg)

Et  $L_s$  : la chaleur massique de changement d'état du matériau (J.kg-1).

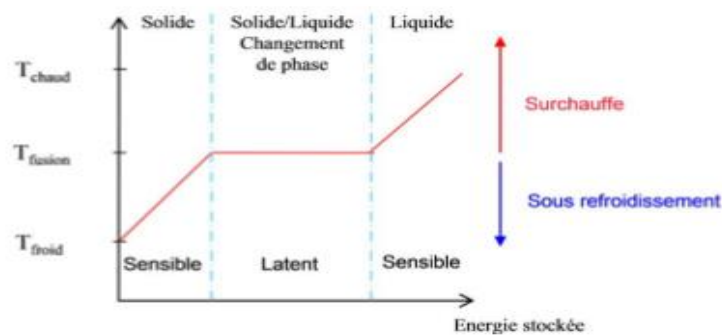


Fig. 22- Les différentes étapes lors d'un stockage par chaleur latente (solide/liquide).

## c. Stockage thermochimique

Certaines réactions chimiques réversibles peuvent être utilisées comme solution pour le stockage thermique de l'énergie. Ce type de stockage est dit : stockage thermochimique.

Pour ce type de stockage, la réaction mise en jeu doit être totalement réversible afin que le procédé ne perde pas sa capacité de stockage au cours des cycles. Le schéma de principe du stockage de chaleur par voie thermochimique est présenté sur la figure 23.

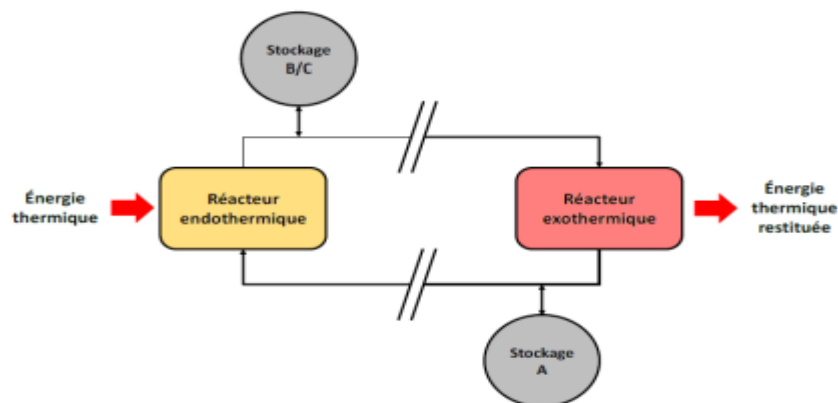


Fig. 23- schéma de principe du stockage thermochimique.

Lors de l'étape de charge, l'énergie thermique issue d'une source de chaleur, notamment du champ solaire, permet de mettre en œuvre la réaction endothermique. Les produits de cette réaction (A et B) sont séparés et stockés. Lorsque l'énergie thermique doit être restituée, les produits stockés (A et B) sont mis en contact afin de réaliser la réaction exothermique réversible et ainsi restituer la chaleur emmagasinée et régénérer le produit initial (AB).

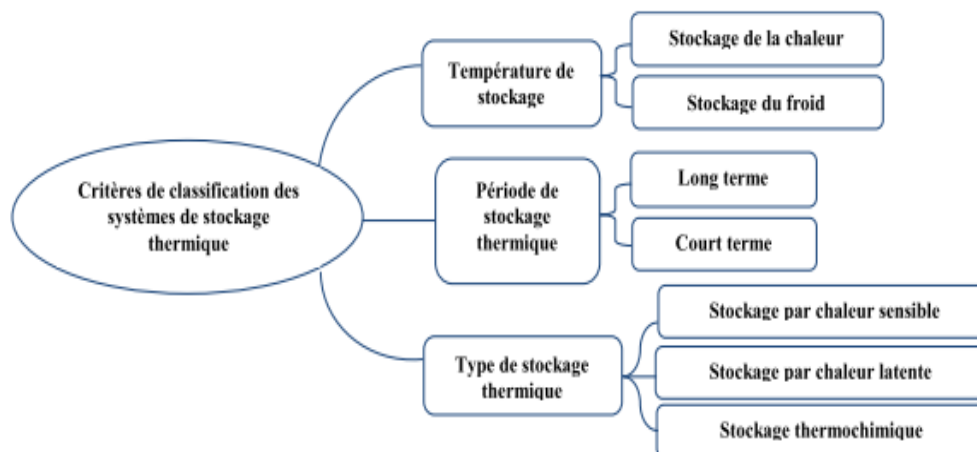


Fig. 24- classification des systèmes des stockages de l'énergie thermique.

### 2.11. Comparaison des différents types de stockage d'énergie thermique

Répertorie les caractéristiques des trois types de stockage d'énergie thermique présentés. Six paramètres fondamentaux ont été choisis : la densité énergétique, la température de stockage, la durée de stockage, le transport de l'énergie, la maturité du système et la complexité de mise en œuvre du système. Actuellement le stockage de chaleur par voie sensible est le procédé de stockage thermique le plus mature.

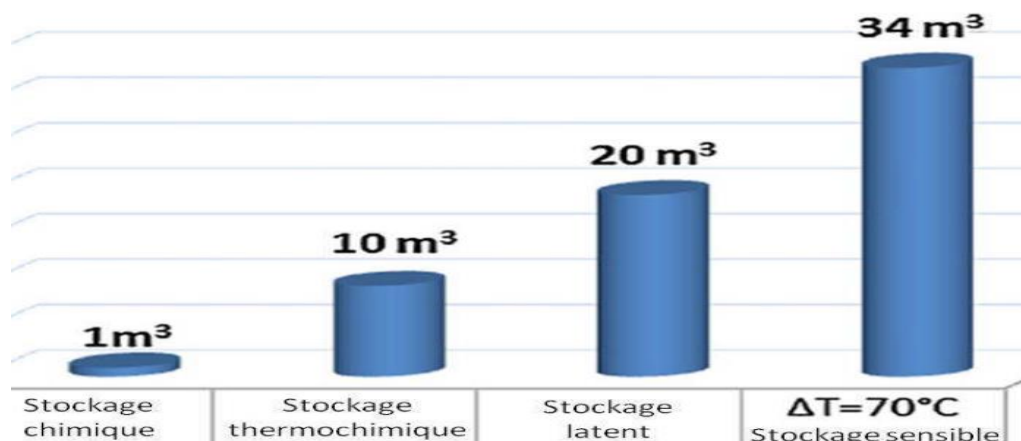


Fig. 25- Volume requis pour le stockage de 6,7 MJ.



## 2.12. Systèmes de stockage d'énergie par chaleur latente

Il existe différents procédés de stockage d'énergie par chaleur latente. Dans le domaine du froid, on rencontre essentiellement les Technologies suivantes : stockés dans des réservoirs de natures différentes comme des cuves de petites ou grandes tailles Des ballons d'eau chaude, dans des systèmes de stockage souterrain En aquifère artificiel, ou encore dans des matériaux spéciaux, Matériau utilisé pour fabriquer des briques réfractaires à haut pouvoir d'accumulation.

Dans le domaine du froid, on rencontre essentiellement les technologies suivantes :

- **Bacs à glace** : C'est un système qui est actuellement très répandu à cause de sa simplicité et de la très longue expérience des installateurs.

Il s'agit tout simplement d'une cuve contenant de l'eau en contact direct avec une batterie où circule un liquide froid qui peut être de l'eau glycol ou le fluide frigorigène lui-même

Autour de ce circuit va se former de la glace qui remplit complètement ou partiellement la cuve. Le déstockage S'effectue soit par pompage de l'eau à 0 °C mélangée à la glace (fusion externe) soit par circulation d'un liquide chaud (fusion interne) dans la batterie.

- **MCP encapsulés** : Le principe de ce stockage est d'utiliser un MCP confiné dans des récipients étanches de petites dimensions (quelques cm<sup>3</sup> à quelques litres).

Il suffit de les refroidir pour cristalliser leur contenu et de les mettre en Contact avec la charge chaude pour le déstockage.

Trois formes de capsules sont disponibles : des sphères, des bâtonnets et des plaques. Un fluide caloporteur procède à un échange d'énergie au contact des capsules.

Ce type de stockage, permet l'utilisation des différents types de MCP sans exception. En effet, l'utilisation des eutectiques par Exemple s'avère impossible ou très difficile dans les systèmes tels que le bac à glace car dans de gros volumes, nous rencontrons facilement les phénomènes de ségrégation.

- **Fluides frigoporteurs diphasiques** : les frigoporteurs diphasiques solide-liquide les plus étudiés ces dernières années sont les coulis de Glace formés de cristaux de glace en suspension dans une solution aqueuse. Ces coulis sont généralement produits sur des parois réfrigérées

Raclées ou brossées permettant leur détachement de la paroi. Pour l'instant, le coût élevé du dispositif de production et La faible fiabilité laisse utilisation de ce processus étroite.

# **Chapitre 03**

## **Méthode numérique et position du problème**

## **Introduction**

Trois équations fondamentales sont utilisées dans le modèle thermique de stockage par énergie latente : La conduction et convection (transfert de la chaleur), une pour le mouvement du PCM liquide (convection) et une pour la transformation du PCM de l'état solide vers liquide et inversement. Pour modéliser le changement d'état du PCM Une expression mathématique continue a été introduit.

Nous présentons dans ce chapitre quelques définitions fondamentales et les différentes méthodes numériques (différences finies, éléments finis, volumes finis) et les différentes approches utilisées dans les codes de simulation numérique pour traiter un écoulement (RANS, LES et DNS). On présente aussi la configuration géométrique, les propriétés thermo physiques de ses composants ainsi que les conditions aux limites. Ce chapitre sera achevé par une courte présentation des différentes étapes relatives à la mise en œuvre du problème sur le logiciel CFD Fluent, utilisé pour la résolution numérique des équations gouvernantes. Le modèle physique adopté et l'étude de simulation numérique sur le stockage thermique par chaleur latente.

Le code utilisé pour la simulation est le code de calcul FLUENT 15 dont la méthode de résolution de base est la méthode des volumes finis.

La méthode des volumes finis 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 les deux phases du MCP.

### 3.1. Définitions élémentaires

**a. température :** est Une grandeur physique liée à la sensation de chaud et froid d'un corps par rapport à un autre, donc Par définition, une température est une mesuré numérique d'une chaleur ; Lorsque deux parties d'un système thermodynamique sont en contact thermique, la chaleur s'écoulera d'une partie à l'autre. On dit que la chaleur est transférée spontanément de la partie la plus chaude, à la plus froide. Cet écoulement se poursuivra jusqu'à l'atteinte d'un équilibre, et on parle alors de la même température des parties en contact.

**b. chaleur :** Phénomène physique qui se transmet dont augmentation se traduit notamment par l'élévation de la température elle a été défini pour longtemps que c'est un fluide qui s'écoule spontanément d'un corps chaud à UN corps froid. Mais actuellement, on a bien compris que la chaleur n'est qu'une autre forme d'énergie.et que c'est une mesure d'un changement d'énergie interne d'un système thermodynamique, lorsqu'aucun travail n'est effectué. , la variation d'énergie interne est la somme du travail et de la chaleur.

**c. Chaleur latente de changement d'état :** La chaleur latente est la quantité d'énergie échangée entre un objet et le milieu lors d'un changement d'état de l'objet, c'est-à-dire lors d'une solidification, une fusion ou une ébullition.

On appelle chaleur latente de changement d'état d'une substance, la quantité de chaleur  $L$  nécessaire pour effectuer, a température constante, le changement d'état de l'unité de masse du corps, la pression restant constante et égale à la pression d'équilibre entre les deux états.

$$Q = m L$$

### 3.2. Résolution numérique à l'aide de codes CFD

La simulation numériques en mécanique des fluides (CFD ; Computational fluides Dynamics) est largement aujourd'hui utilisée dans l'industrie et l'un des outils incontournables de conception. Le choix de l'utilisation de telle méthode numérique va dépendre essentiellement du type et de la complexité du problème à résoudre : la nature du fluide, le comportement thermodynamique, la modélisation du milieu et le problème stationnaire ou instationnaire.

Les codes de simulation numérique des écoulements, ou codes CFD, résolvent les équations régissant les mouvements d'un fluide. Ces équations traduisent la conservation de la masse et de la quantité de mouvement du fluide (équations de Navier-Stokes), ainsi que la conservation de l'énergie. On peut observer que l'essentiel de ces codes utilisent la méthode des volumes finis.

### 3.2.1 Méthodes numériques

Une solution à ces équations aux dérivées partielles peut être calculée numériquement par application de la méthode :

1. aux différences finies.
2. aux éléments finis.
3. ou aux volumes finis.

Les méthodes des volumes finis et des éléments finis exploitent des approximations d'intégrales tandis que la méthode des différences finies met en jeu les approximations des dérivées, Toutefois, la méthode des volumes finis se base directement sur la forme dite forte de l'équation à résoudre, contrairement à la méthode des éléments finis qui se fonde sur une formulation variationnelle de l'équation (on parle aussi de formulation faible): on décompose la solution sur une base de fonctions tests. Dans le cas de la méthode aux volumes finis, les termes de flux sont évalués aux interfaces entre les volumes. Cette méthode est conservative, donc parfaitement adaptée à la résolution de lois de conservation. Plus de 90% des codes de calculs en CFD utilisent cette méthode. Les équations sont calculées de manière itérative en imposant des conditions initiales et des conditions aux limites du domaine. Le solveur cherche alors une solution des champs de pression, vitesse, température,... qui équilibre le système de lois de conservation (masse, quantité de mouvement, énergie, etc...). Le critère d'arrêt de ce calcul itératif, imposé par l'utilisateur, est souvent le résidu des variables  $u$ ,  $k$  ou encore  $\epsilon$ . C'est l'écart de la valeur d'une variable donnée entre deux itérations consécutives.

Lorsque celui-ci devient faible (de l'ordre de  $10^{-4}$  et moins), cela est un signe que le calcul convergé vers une valeur donnée et peut-être arrêté.

Il est nécessaire d'imposer d'autres critères de convergence, comme la conservation du débit, la constance aux cours des itérations d'une quantité d'intérêt qui ont un sens plus physique ou plus parlant par rapport au problème étudié.

### 3.3 Types de simulation (DNS, RANS, LES)

Les équations de Navier-Stokes ne présentent pas de solution analytique exacte dans le cas général. Il convient par conséquent d'utiliser une résolution numérique capable de rendre compte de l'ensemble des échelles mises en jeu par la turbulence. Pour cela, il existe plusieurs approches

**a. DNS Bien** qu'elle est très coûteuse en temps de calcul et en occupation de mémoire, elle reste une approche très utilisée sur les configurations à faible Reynolds et de dimensions réduites. Néanmoins, l'amélioration constante de la puissance de calcul permet de considérer des ormaies des configurations plus "pratiques" par exemple le calcul de la stabilisation d'une flamme non-pré mélangée détachée, à nombre de Reynolds modéré. Donc La Simulation Numérique Directe (ou DNS pour Direct Numerical Simulation) résout l'ensemble du spectre spatial et temporel des échelles de la turbulence. Le nombre de points de discrétisation est alors de l'ordre de  $ReL^{9/4}$ .

**b. RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes)** consiste à une description statistique de l'écoulement. La composante moyenne du vecteur de variables conservatives est transportée, tandis que sa composante fluctuante est modélisée grâce à une équation de fermeture. Chaque variable est composée d'une partie moyenne ( $\bar{\Psi}$ ) et d'une partie fluctuante ( $\Psi'$ ) de sorte que  $\Psi = \bar{\Psi} + \Psi'$ . L'opérateur de moyenne (opérateur de Reynolds) est linéaire, conserve les constantes, commute avec les opérateurs de dérivation et est idempotent ( $\bar{\bar{\Psi}} = \bar{\Psi}$  et  $\bar{\Psi}' = 0$ ). La quantité  $\bar{\Psi}$  est la moyenne sur un ensemble de réalisations de  $\Psi$ . En faisant une hypothèse d'ergodicité, cette quantité peut être assimilée à la moyenne temporelle de  $\Psi$

Dans des écoulements compressibles à masse volumique variable, un opérateur de moyenne pondéré par la masse volumique (opérateur de Favre) est usuellement utilisé :

$$\tilde{\Phi} = \frac{\overline{\rho\Phi}}{\bar{\rho}}$$

La décomposition du signal entre sa partie moyenne et sa partie fluctuante s'écrit alors  $\Psi = \tilde{\Psi} + \Psi''$ . L'introduction de ce type d'opérateur permet la simplification par la fluctuation de la masse volumique et le formalisme des équations instantanées est conservé. La différence des moyennes s'écrit :

$$\tilde{\Phi} - \bar{\Phi} = \frac{\overline{\rho'\Phi'}}{\bar{\rho}}$$

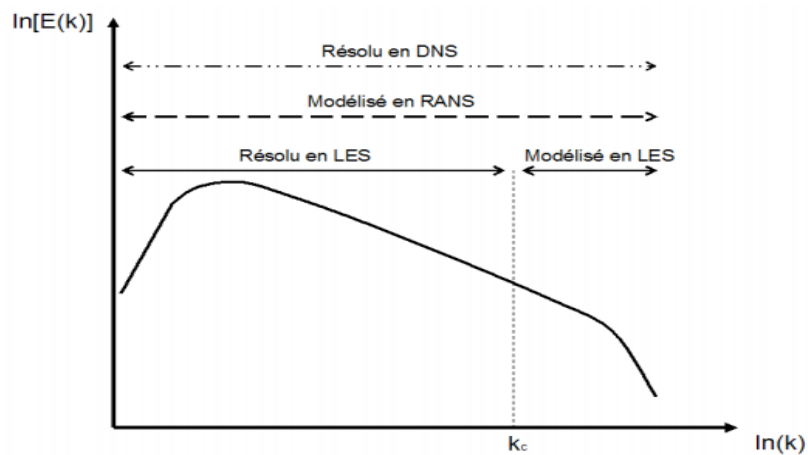
Lorsque la masse volumique est constante, les opérateurs de Reynolds et Favre sont strictement équivalents. La différence entre la moyenne au sens de Favre et au sens de Reynolds reste faible lorsque le nombre de Mach est inférieur à cinq et le taux de turbulence modéré . Donc la comparaison des grandeurs moyennes (au sens de Favre) calculées

aux grandeurs moyennes mesurées expérimentalement est justifiée, tant qu'aucune réaction chimique exothermique n'entre en jeu.

**c. LES** Dans la Simulation aux Grandes Échelles (ou LES pour Large Eddy Simulation), les structures turbulentes sont résolues, d'un point de vue spectral, des plus grandes échelles jusqu'à une échelle de coupure  $k_c$  (Fig. 26) située dans la zone inertielle. En dessous de ce nombre d'onde, le spectre est modélisé par un modèle de sous-maille. Cette opération de filtrage par un filtre passe-haut en échelle (et passe-bas en fréquence) dans l'espace spectral correspond à un produit de convolution dans l'espace physique : [24]

$$\bar{\Psi}(X, t) = \frac{1}{\Delta} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{F} \left( \frac{x-x'}{\Delta}, t-t' \right) \Psi(x', t') d^3x' dt'$$

Où  $\mathcal{F}$  est le filtre. Celui-ci possède les propriétés de conservation des constantes, de linéarité et de commutativité avec les opérateurs de dérivation. Chaque variable est donc composée d'une partie filtrée ( $\bar{\Psi}$ ) et d'une partie non-résolue ( $\Psi'$ ). Contrairement à l'opérateur de moyenne utilisé en RANS, l'opérateur de filtrage en LES perd sa projectivité ( $\bar{\bar{\Psi}} \neq \bar{\Psi}$ ). De plus, l'application du filtre à la partie non résolue ne donne plus zéro ( $\bar{\Psi}' \neq 0$ ). Le filtrage au sens LES des équations de Navier-Stokes n'est donc pas strictement équivalent à celui en RANS, et des termes supplémentaires apparaissent. Le filtre de Favre 1 est introduit, pondéré par la masse volumique, afin d'obtenir le même formalisme qu'en RANS. En pratique, le filtre est imposé dans l'espace physique à la fois par le maillage et par le schéma numérique. [24]



**Fig. 26- Modélisation du spectre d'énergie cinétique turbulente en fonction de l'approche.**

### 3.4 Méthode des volumes finis

Afin de résoudre numériquement les équations différentielles aux dérivées partielles, établies dans le chapitre précédent, nous allons procéder à leur discrétisation pour obtenir un système d'équations algébriques, dont la résolution permet de déterminer les champs de toutes les variables du problème considéré. La méthode des volumes finis a été utilisée pour accomplir cette discrétisation, ainsi que l'algorithme simple pour le couplage vitesse-pression. [25]

La méthode des volumes finis a été décrite pour la première fois en 1971 par Patankar et Spalding et publiée en 1980 par Patankar [26]; le principe de cette méthode repose sur une technique de discrétisation, qui convertit les équations différentielles aux dérivées partielles en équations algébriques non linéaires, qui peuvent par la suite être résolues numériquement. Elle se distingue par la fiabilité de ses résultats, son adaptation au problème physique, sa possibilité de traiter des géométries complexes, sa garantie pour la conservation de masse et de quantité de mouvement et de tout scalaire transportable sur chaque volume de contrôle, dans tout le domaine de calcul, ce qui n'est pas le cas pour les autres méthodes numériques. Le domaine de calcul est divisé en un nombre fini de sous-domaines élémentaires, appelés volumes de contrôle. Chacun de ces derniers englobe un nœud, dit nœud principal, comme il est indiqué sur la Fig. (27). La technique des volumes finis consiste à intégrer les équations aux dérivées partielles pour obtenir les équations discrétisées, qui conservent toutes les grandeurs physiques sur chaque volume de contrôle. Elle comporte essentiellement les étapes suivantes :

- La division du domaine considéré en volumes de contrôle.
- La formulation intégrale des équations différentielles aux dérivées partielles.
- Ecriture des équations algébriques aux nœuds du maillage.
- Résolution du système algébrique non linéaire obtenu. [25]

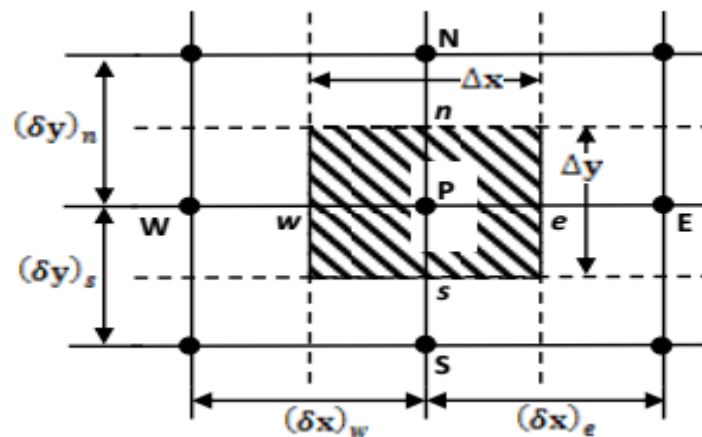


Fig. 27- Volume de contrôle bidimensionnel.

Pour un nœud principal P, les points E et W (Est et Ouest) sont des voisins dans la direction x, tandis que N et S (Nord et Sud) sont ceux dans la direction y. Le volume de contrôle entourant P est montré par des lignes discontinues, alors que les faces sont localisées



aux points e et w dans la direction x, n et s dans la direction y.

Dans ce mémoire, la résolution du problème est effectuée par le logiciel FLUENT, qui est basé sur la méthode des volumes finis. [25]

### 3.4.1 Maillage

C'est la subdivision du domaine d'étude en grilles longitudinale et transversale, dont l'intersection représente un nœud, où on trouve le point central P et les composantes u et v de la vectrice vitesse, qui se trouvent au milieu des segments, reliant deux nœuds adjacents. La discrétisation du domaine est obtenue par un maillage, constitué d'un réseau de points (nœuds).

Les grandeurs scalaires : pression, température, énergie cinétique et taux de dissipation sont stockées dans le nœud P du maillage, représenté par la Fig. (28-a), tandis que les grandeurs vectorielles u et v sont stockés au milieu des segments reliant les nœuds. [25]

L'équation générale de transport est intégrée sur le volume de contrôle, associé aux variables scalaires et les équations de quantité de mouvement sont intégrées sur le volume de contrôle, associé aux composantes de vitesse.

Le volume de contrôle de la composante transversale u est décalé suivant la direction x par rapport au volume de contrôle principal (voir la Fig. (28-b)), celui de la composante longitudinale v est décalé suivant la direction y (voir la Fig. (28-c)). Ce type de maillage, dit « maillage décalé », permet d'avoir une bonne approximation des flux convectifs et une meilleure évaluation des gradients de pression, ainsi qu'une stabilisation numérique de la solution.

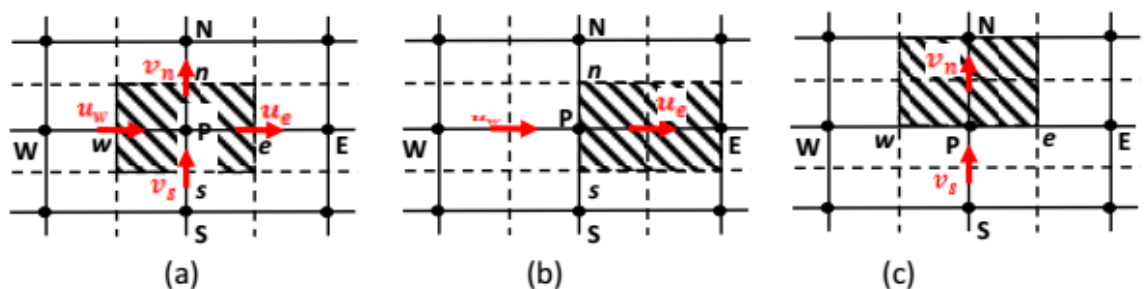


Fig. 28- Schéma du volume de contrôle (a), maillage décalé pour ue (b), maillage décalé pour vn (c).

### 3.5 Critère de convergence

La convergence est quantifiée par l'intermédiaire de résidus normalisés (définis pour chaque grandeur  $\phi$  comme la somme, sur tous les volumes de contrôles, des erreurs sur le bilan de  $\phi$  rapportée à la somme des termes de l'équation discrétisée qui concernent le centre des volumes. Ils permettent de suivre la convergence des calculs au fur et à mesure des itérations. Ce résidu est défini par :

$$R_{\phi} = \frac{\sum |\sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + s_c - a_p \phi_p|}{F_{in,\phi}} \quad (3.1)$$

$R_{\phi}$ : est la somme absolue des résidus correspondant à la variable  $\phi$  ;

$F_{in,\phi}$  : est le flux total à l'entrée de la variable  $\phi$ .

La convergence des résultats est testée selon deux critères : pour chaque grandeur calculée, les résidus normalisés doivent être inférieurs à  $10^{-6}$  et des itérations supplémentaires ne doivent pas modifier les résultats une fois la convergence atteinte. [27]

### 3.6 La modélisations des écoulements avec changement de phase

Généralement, il existe deux approches pour l'analyse des problèmes des changements de phase: [28]

Les schémas numériques avec maillage fixe ;

- les schémas numériques avec maillage mobile ("front tracking méthodes").

#### 3.6.1 Les schémas numériques avec maillage fixe

En ce qui concerne les schémas avec maillage fixe, la position de l'interface ne correspond pas nécessairement à un nœud en 1D ou à un ensemble d'arêtes en 2D. Le problème majeur avec ces schémas est la présence d'oscillations dans la solution. De plus, ces schémas demandent souvent d'utiliser des algorithmes de correction de la solution afin de ne pas manquer l'absorption ou la libération de la chaleur latente. L'avantage majeur de ces méthodes est qu'elles sont facilement applicables à des problèmes de changement de phase complexes de type industriel. [29]

#### 3.6.2 Les schémas avec maillage mobile

Dans les schémas avec maillage mobile, la position de l'interface doit toujours correspondre à un nœud ou à des arêtes du maillage. L'utilisation de ces schémas numériques permet habituellement d'éliminer les oscillations dans la solution et ainsi d'obtenir une plus grande précision. Ces schémas numériques sont habituellement plus complexes à mettre en œuvre que ceux avec maillage fixe. De plus, ils sont mal adaptés aux problèmes où plus d'un front de solidification ou de fusion sont présents et à ceux où le changement de phase se produit sur un intervalle de température. En fait, ils sont difficilement applicables à des problèmes très complexes.

### 3.7 Méthode du Cp effective (ou apparent)

La méthode du Cp effective ( $C_{eff}$ ) réduit le système d'équations qui définit le processus de changement de phase en une seule équation de la forme :

$$\rho(T) \cdot C_{eff}(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3.2)$$

Où  $C_{eff}$  est la chaleur massique apparente.

Au moment du changement de phase, l'absorption de la chaleur latente  $L_f$  est prise en compte par l'augmentation du  $C_{eff}$

- Dans la zone solide :

$$C_{eff} = C_{p_{sol}}(T) \quad (3.3)$$

- Dans la région de mélange :

$$C_{eff} = \frac{1}{2} \cdot (\overline{C_{p_{sol}}} + \overline{C_{p_{liq}}}) + \frac{dL_f(T)}{dT} \quad (3.4)$$

- Dans la zone liquide

$$C_{eff} = C_{p_{liq}}(T) \quad (3.5)$$

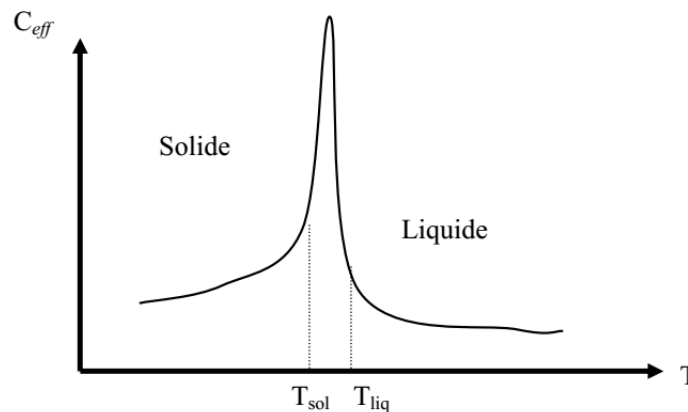
$C_{p_{liq}}$  et  $C_{p_{sol}}$  sont respectivement les capacités thermiques massiques moyennes des phases liquide et solide. [30]

La méthode du Cp effective ( $C_{eff}$ ) a été utilisée par de nombreux auteurs, car elle présente les avantages suivants :

Elle permet de réduire le système d'équations (3.4 à 3.5) décrit ci-dessus en une seule équation de la forme :

$$\rho(T) \cdot C_{eff}(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3.6)$$

Elle ne nécessite pas la connaissance explicite du déplacement du front de changement de phase.



**Fig. 29- Evolution de la capacité thermique en fonction de la Température lors d'un changement de phase.**

La fig.29 montre que la valeur de la capacité thermique présente un pic dans la zone de transition de phase. Ce pic est d'autant plus élevé que la chaleur latente  $L_f$  est importante et que

l'intervalle  $T_{liq} - T_{sol}$  est petit, ce qui est le cas de l'eau pure. Ces variations brutales créent des problèmes de convergence lors de la résolution numérique. [30]

### 3.8 Méthode Enthalpique

Dans ce travail nous avons adopté la méthode Enthalpique. Dans les problèmes à changement de phase, la présence du front de changement de phase mobile rend difficile la mise en œuvre d'une solution numérique. La formulation en variable Enthalpique vient surmonter ce problème, ainsi le système des équations de conservation est réduit à l'équation suivante : [30]

$$\rho(T) \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3.7)$$

Si on admet l'existence d'une surface de mélange (fig.32), la fonction qui permettra de passer de la variable de température  $T$  à la variable enthalpie  $h$  est donnée par :

$$\int dh(T) = \int g(T, w) \cdot CP_{sol}(T) \cdot dT + \int [1 - g(T, w)] \cdot CP_{liq}(T) \cdot dT + [1 - g(T, w)] \cdot L$$

où  $g(T, w)$  est la fraction solide [31] [32] dépendant de la température  $T$  et de la composition du produit  $w$ , donnée par la relation suivante

$$g(T, w) = 1 - \left( \frac{T - T_{sol}}{T_{liq} - T_{sol}} \right)^{\frac{1}{v-1}} \quad (3.8)$$

La fraction solide  $g(T, w)$  varie entre 0 et 1

$$\begin{cases} g(T(\omega)) = 0 & \text{pour la phase liquide} \\ g(T(\omega)) = 1 & \text{pour la phase solide} \\ 0 < g(T(\omega)) < 1 & \text{pour la zon de mélange} \end{cases}$$

### 3.9 Position du problème et modélisation

Le modèle étudié est un système constitué de deux tubes concentriques horizontal. Le stockage d'énergie thermique implique un arrangement tube-calandre où la cire de paraffine en tant que matériau à changement de phase (MCP+nanoparticules) est remplie dans la calandre.

L'eau distillée s'écoule à travers le tube de cuivre comme fluide caloporteur le long d'axe de la coque.

Les dimensions de la géométrie étudiée sont présentées dans le tableau 4 ci-dessous. L'eau utilisée comme fluide caloporteur s'écoule par convection forcée à l'intérieur du tube central. Afin de parvenir à une simultanité état d'écoulement développé.

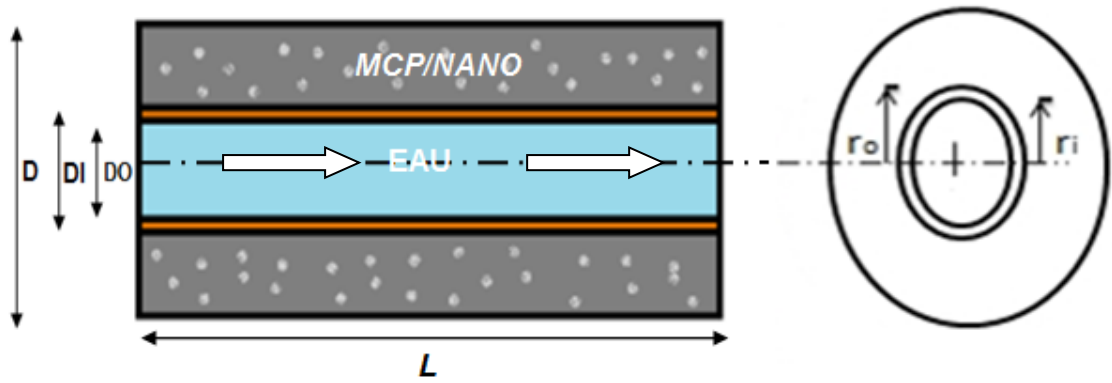


fig. 30-Modèle physique pour le calcul numérique.

Tableau 4- la dimension de la géométrie

La mesure	Values [m]
la langur (L)	0.4
Diamètre (Di)	0.012
Diamètre (Do)	0.0108
Diamètre (D)	0.036

### 3.9.1 Propriétés thermo physiques

Tableau 5- Les propriétés du matériau à changement de phase de la cire de paraffine.

Propriétés	Values
Température de fusion	45-51°C
Densité à l'état liquide	880 kg/m <sup>3</sup>
Chaleur spécifique	2000J/kg K
Chaleur latente	168000 J/kg
Conductivité thermique	0.2 W/m·K
Liquide de viscosité dynamique	0.004 N s/m

### 3.10 Hypothèses simplificatrices

En développant le modèle mathématique pour le transfert de chaleur, les hypothèses ont été faites :

- 1) Les propriétés thermo physiques pour le fluide caloporteur et MCP étaient constantes.
- 2) La conduction thermique dans la direction axiale est négligée pour les deux MCP et fluide caloporteur.
- 3) La convection naturelle à l'intérieur du MCP n'a pas été considérée comme la flottabilité, la force pour le changement de volume dû au changement de phase a été ignorée.
- 4) La température initiale du stockage était uniforme et il était celle de fusion.

5) Le mur adiabatique a été supposé.

6) Le fluide caloporteur entrant à l'intérieur était laminaire et développait simultanément

### 3.11 Formulation mathématique

#### 3.11.1 Équation de continuité

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

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (3.9)$$

Où  $\rho$  est la masse volumique et  $\mathbf{v}$  est le vecteur vitesse.

Pour le cas des écoulements incompressibles et bidimensionnels, la masse volumique  $\rho$  est constante, qui après simplification devient :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.10)$$

#### 3.11.2 Les équations de quantités de mouvements

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

Équation de quantité de mouvement suivant l'axe x :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \rho g \sin(\alpha) + S_x \quad (3.11)$$

Équation de quantité de mouvement suivant l'axe y :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v^2) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \rho g \cos(\alpha) + S_y \quad (3.12)$$

Avec :

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \quad (3.13)$$

#### 3.11.3 Équation de la conservation d'énergie

L'équation de la conservation d'énergie est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique. Ce principe met en relation les différents termes, soit :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u h) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v h) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S_h \quad (3.14)$$

Où :

$x, y$  Les coordonnées cartésiennes.

$u_i$	Composante de vitesse dans la direction xi
$T$	Le temps.
$\lambda$	La conductivité thermique.
$T$	La température de fluide.
$T_{ref}$	La température de référence.
$C_p$	La chaleur spécifique du fluide à pression constante.
$\rho$	Masse volumique.
$\mu$	La viscosité dynamique.
$\beta$	Coefficient de dilatation.
$S_h$	Terme de source
$h$	L'enthalpie spécifique
$h_s$	L'enthalpie sensible

$$h_s = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (3.15)$$

L'enthalpie totale, H est défini comme suivant :

$$H = h_s + \Delta H \quad (3.16)$$

Où  $\Delta H = \gamma L$  est le changement d'enthalpie en raison du changement de phase,  $h_{ref}$  est l'enthalpie de référence à la température de référence  $T_{ref}$ ,  $C_p$  est la chaleur spécifique,  $L$  est l'enthalpie spécifique de fusion (état liquide) et  $\gamma$  est la fraction liquide au cours du changement de phase qui se produisent sur une plage de températures  $T_{solidis} < T < T_{liquidus}$  définies par les relations suivantes :

Si  $T < T_{solidis}$  (état solide)

$$\gamma = \frac{\Delta H}{L} = 0 \quad (3.17)$$

Si  $T_{solidis} < T < T_{liquidus}$  (état ...)

$$\gamma = \frac{\Delta H}{L} = \frac{T - T_s}{T_l - T_s} \quad (3.18)$$

Si  $T > T_{liquidus}$  (état liquide)

$$\gamma = \frac{\Delta H}{L} = 1 \quad (3.19)$$

Le terme source  $S_i$  dans l'équation de mouvement est donnée par :

$$S_i = -A(\gamma) u_i \frac{C(1-\gamma)^2}{\gamma^3 + \varepsilon} u_i \quad (3.20)$$

$$S_h = \rho L \frac{\partial \gamma}{\partial t} \quad (3.21)$$

- Les conditions aux limité

$$\text{Pour : } 0 < x < L_x \quad \text{et} \quad y=0 \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

$$\text{Pour : } 0 < x < L_y \quad \text{et} \quad y=r \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0$$

$$\text{Pour : } x = 0 \text{ et } 0 < y < r_i \quad T=88 \text{ } ^\circ\text{C}$$

### 3.12 Relations des propriétés thermo-physiques du Nano-MCP

- La chaleur latente du NMCP

$$\rho L_{f_{bPCM}} = \rho L_{f_{PCM}} (1 - \phi) \quad (3.22)$$

- La conductivité thermique

$$\frac{k_{nPCM}}{k_{PCM}} = \frac{k_s + (S-1)k_{PCM} - (S-1)\phi(k_{PCM} - k_s)}{k_s + (S-1)k_{PCM} + \phi(k_{PCM} - k_s)} \quad (3.23)$$

- La densité

$$\rho_{nPCM} = \rho_{PCM} \left[ (1 - \phi) + \phi \left( \frac{\rho_s}{\rho_{PCM}} \right) \right] \quad (3.24)$$

- La viscosité dynamique

$$\mu_{nPCM} = \frac{\mu_{PCM}}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (3.25)$$

- La chaleur spécifique

$$\rho C p_{nPCM} = \rho C p_{PCM} \left[ (1 - \phi) + \phi \left( \frac{\rho C p_s}{\rho C p_{PCM}} \right) \right] \quad (3.25)$$

### 3.13 Schéma du maillage du modèle physique adopté

Les maillages utilisés dans la présente simulation sont générés pour le code Gambit, ils consistent en maillages in-structurés composés de mailles quadrilatérales pour les domaines fluide (eau et MCP). Le maillage dans les zones proches de la paroi est raffiné pour capter les forts gradients de température. Afin de faciliter la simulation (réduction du temps et de l'espace mémoire).



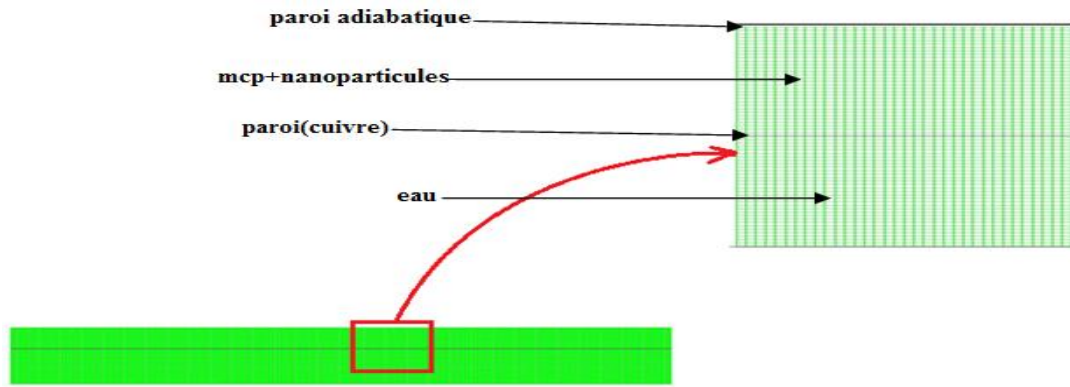


Fig. 31-maillage du domaine de calcul.

### 3.14 Méthodologie computationnelle

La géométrie a été créée par le générateur de maillage GAMBIT ainsi que le maillage de la géométrie. Le maillage a été importé dans ANSYS FLUENT 15, la simulation a été exécutée avec le solveur bidimensionnel double précision (2 ddp).

Pour effectuer la simulation par ce logiciel, il faut décrire les paramètres de solution comme suit :

Tableau 6- Configuration pour la simulation FLUENT

La description	Type
Espace	2D
Solveur	Basé sur la pression
Rapidité	Formulation absolue
Temps	(Unsteady, 1st-Order Implicit)
Gravité	non
Énergie	oui
Modèle	Laminer
Solidification et fusion	oui

#### 3.14.1 Paramètres pour la solution convergée

- **Choix de matériau :** Le choix des matériaux utilisés dans notre modèle à partir des listes existantes, sinon Il faut les introduire selon nos besoins.
- **Schéma de discrétisation :** Le schéma PRESTO est utilisé pour l'équation de correction de pression et un algorithme SIMPLE (Semi-Implicite Pressure-Equation) bien connu est utilisé pour le couplage pression-vitesse. Mouvement et les équations d'énergie ont été calculés en utilisant le schéma du Second Order Upwind.

**Tableau 7- Le pas de temps et facteurs de sous-relaxation**

Paramètres de calcul instationnaire	convergence	$10^{-6}$
	pas de temps	0.5 s
	nombre d'itérations	100
Equations	Mouvement	Oui
	Energie	Oui
Facteurs de sous- relaxation	Pression	0.3
	Densité	1
	Forces	1
	Update de Fraction Liquide	0.9
	Energie	1

### 3.14.2 Étapes de résolution du problème

Les principales étapes utilisées dans notre simulation sont les suivantes :

1. Détermination du domaine de calcul (construction de la géométrie).
2. Discrétisation du domaine de calcul (maillage).
3. Identification des conditions aux limites.
4. Choix du modèle mathématique.
5. Choix de l'algorithme de solution.
6. Solution du modèle mathématique.
7. Visualisation et interprétation des résultats.

## **Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons rappelé quelques notions théoriques ainsi que les méthodes numériques associées qui permettent de résoudre un problème de transfert de chaleur avec changement de phase.

On a présenté ensuite les méthodes des volumes sont utilisées pour résoudre les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie, et nous avons présente une simulation numérique pour étudier le stockage d'énergie thermique par chaleur latente dans un matériau à changement de phase, deux tubes concentriques horizontal, cette simulation importé sur le logiciel FLUENT 15.

# **Chpitre4**

## **Résultats et discussions**

## Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter et discuter les résultats de l'ensemble des essais de simulation conduits dans notre étude.

### 4.1 Présentation de l'unité de stockage utilisée

Pendant la phase de charge du système de stockage, L'eau chaude entre à une température de  $85^{\circ}\text{C}$  et un débit massique de  $0.02 \text{ L/min}$  jusqu'à ce que ce processus est terminé. Par la suite le fluide caloporteur entre à une température de  $25^{\circ}\text{C}$  afin de récupérer l'énergie thermique emmagasinée dans le MCP.

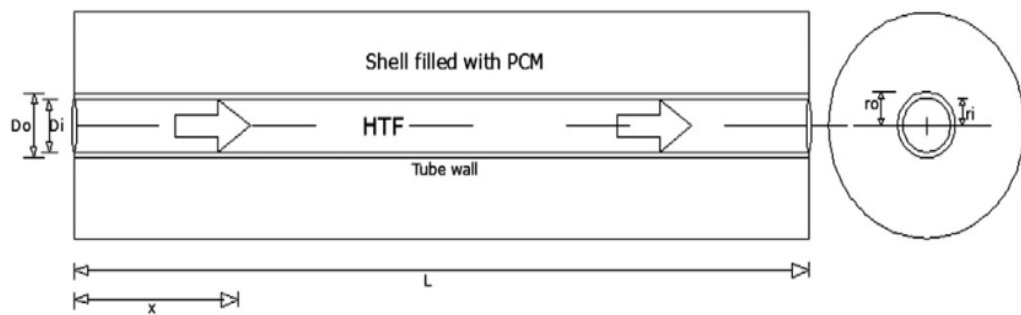
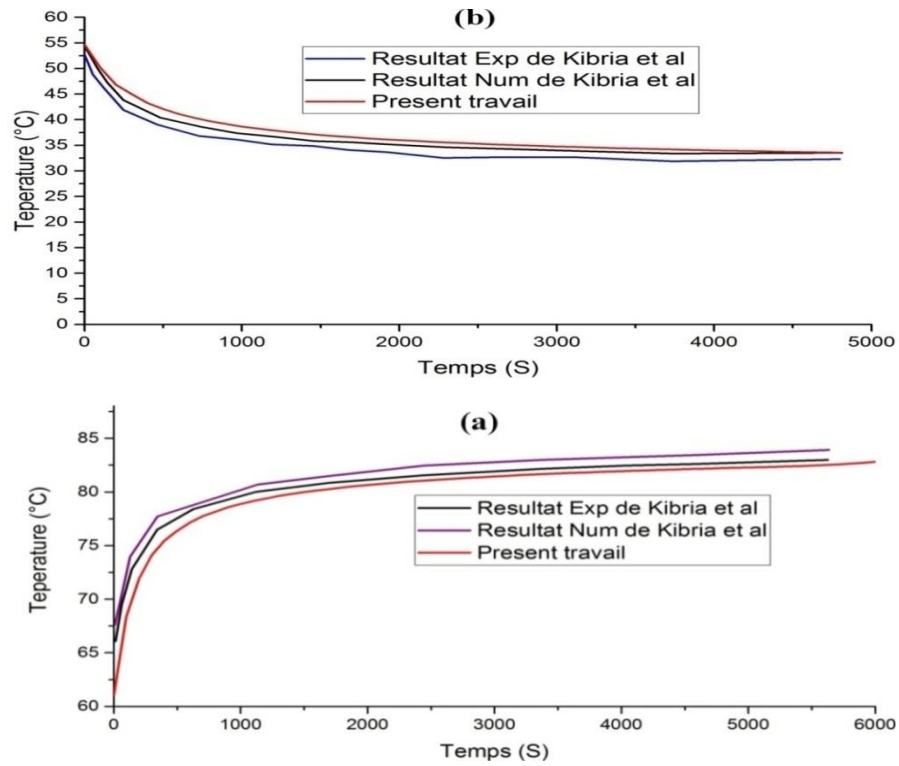


fig. 32-Modèle physique pour le calcul numérique.

## 4.2 Validation

Le modèle numérique utilisé dans le présent travail a été validé avec des résultats expérimentaux et numériques de KIBRIA et al [32] comme montrée les Fig 33a et 33b. Une bonne concordance a été obtenue pour les deux phases de charge et de décharge.



**Fig. 33– La validation des températures de sortie du fluide caloporteur dans le cycle de charge et de décharge.**

### 4.3 Etude paramétriques

#### 4.3.1 La charge

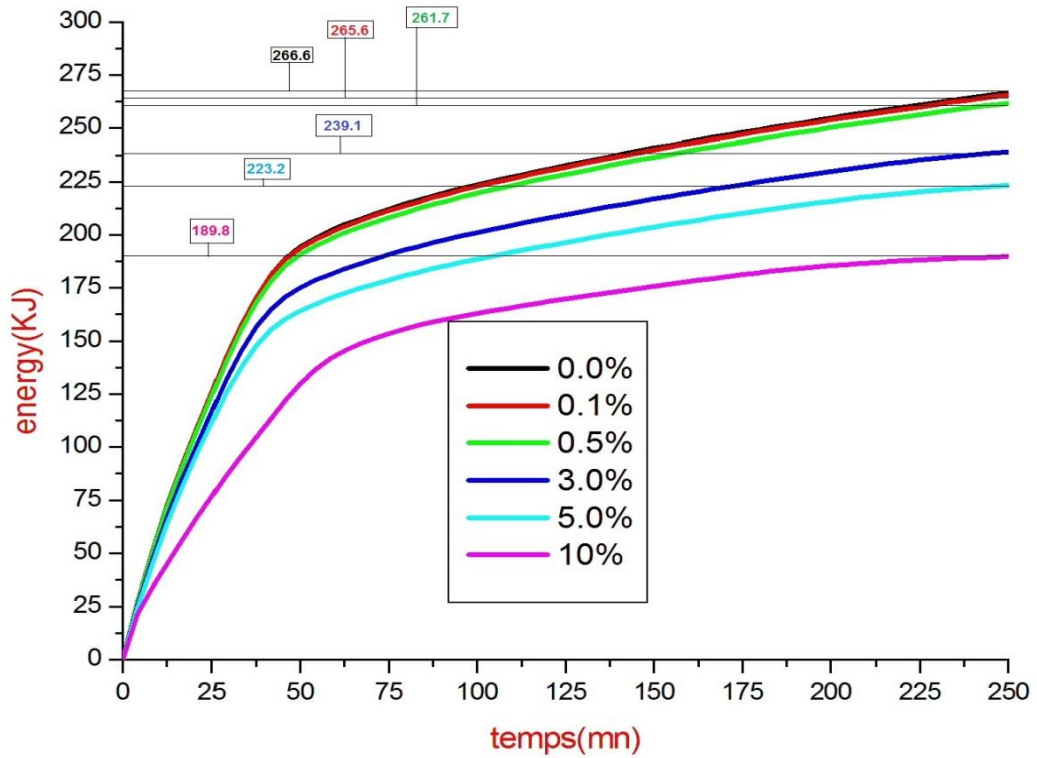


Fig. 34- La variation temporelle de l'énergie stockée des échantillons NPCM Pendant le processus de charge.

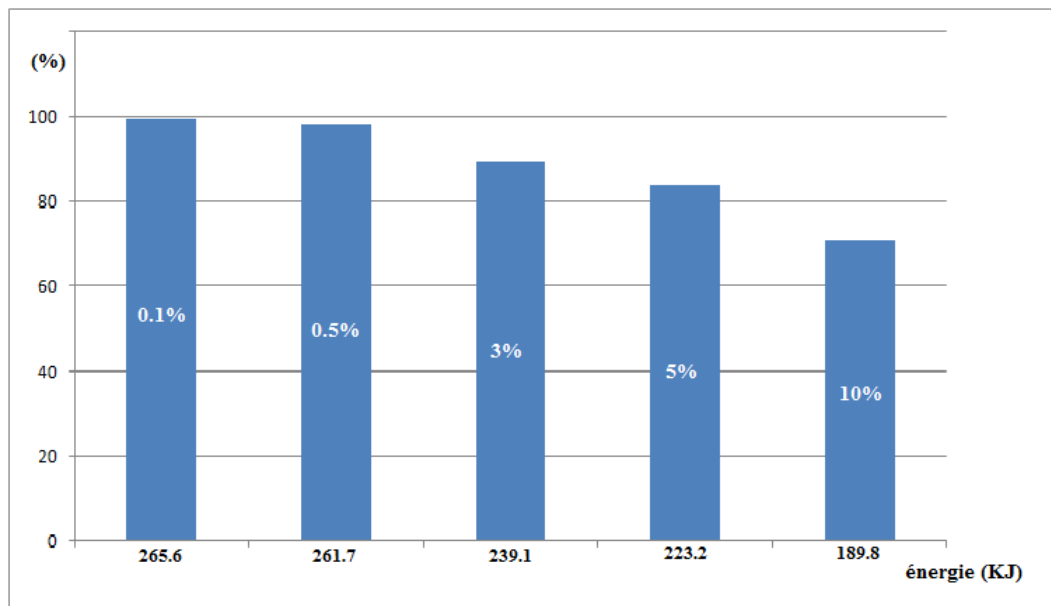
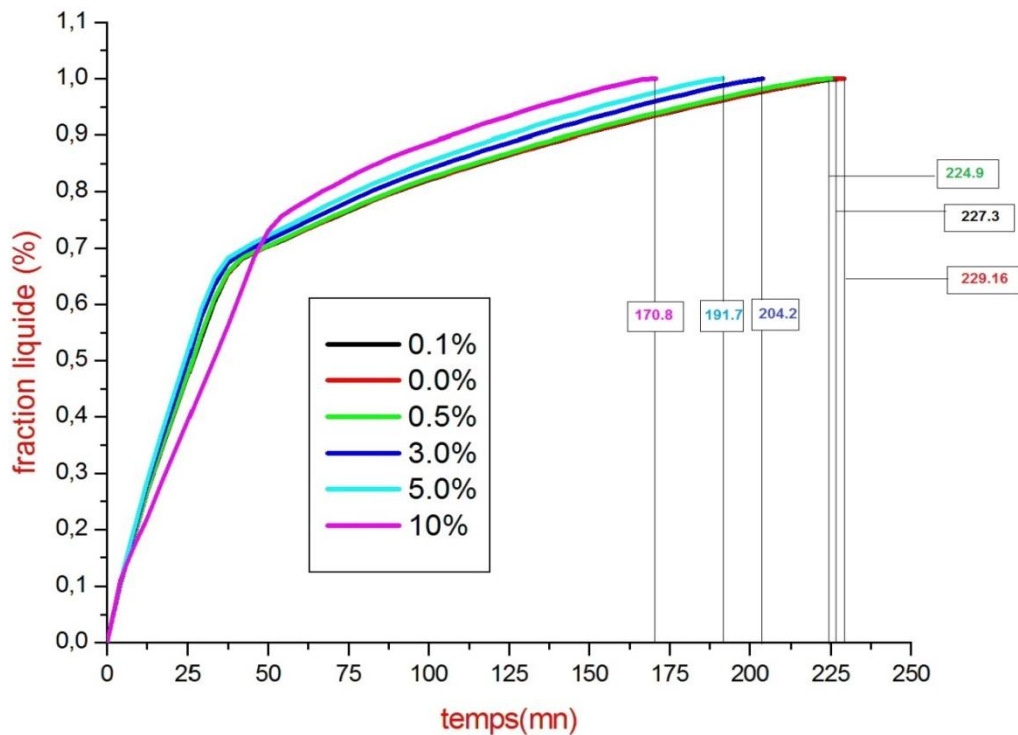


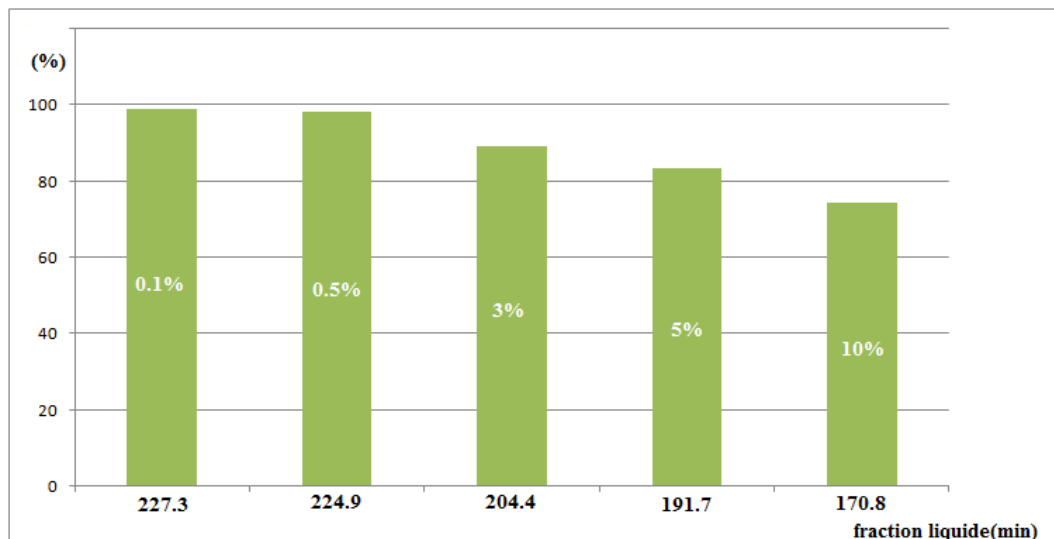
Fig. 35-L'amélioration en pourcentage pour les échantillons NMCP Pendant le processus de charge.

La Fig. 34 montre la variation de l'énergie stockée avec le temps pour les échantillons NMCP pendant le processus de charge. Il est clair que d'après la figure que la quantité d'énergie stockée à l'aide du NMCP diminue en fonction de l'augmentation des nanoparticules ; pour 0% le cas du MCP pure qui emmagasine 38.7KJ ; puis cette quantité diminue jusqu'à 12.9KJ pour 10%. Avec une diminution estimée à 28.8%.

En fait, la diminution de l'énergie stockée est due à la diminution du volume totale de stockage) MCP) qui est remplacé par d'addition des nanoparticules.

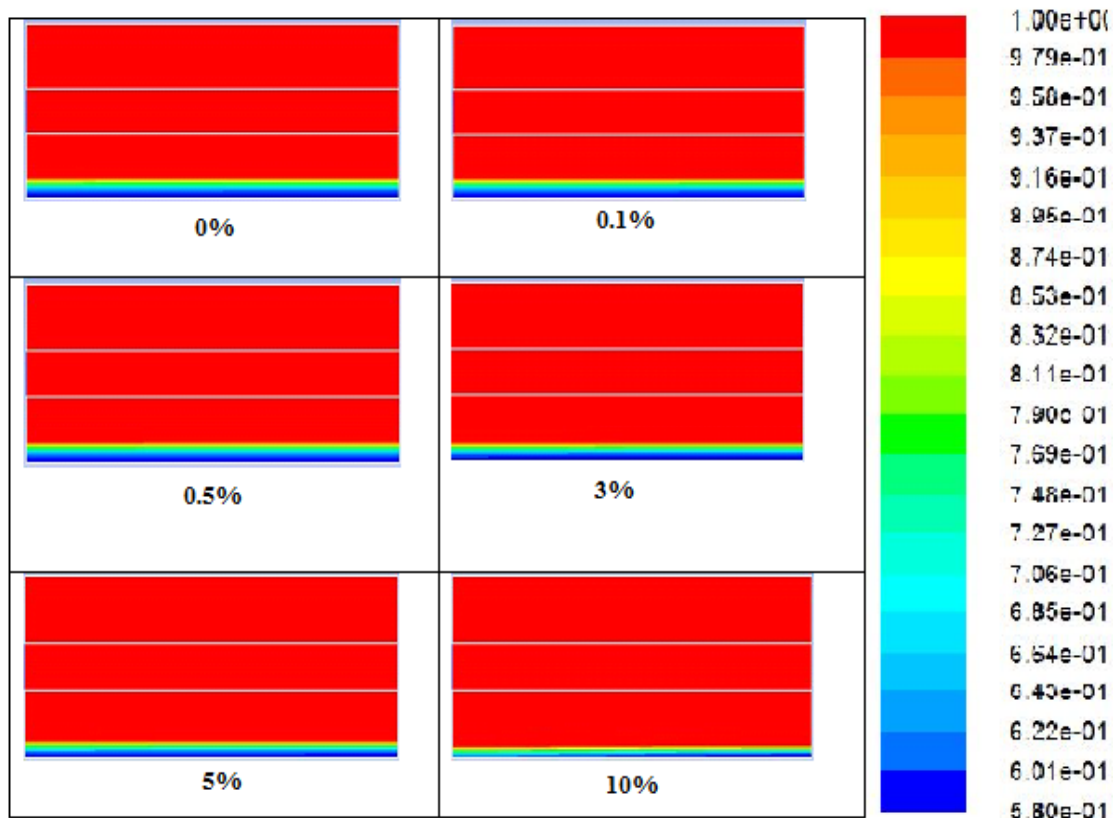


**Fig. 36- La variation temporelle de fraction liquide du NMCP Pendant le processus de charge.**



**Fig. 37 L'amélioration en pourcentage du temps de la fusion complète du NMCP**

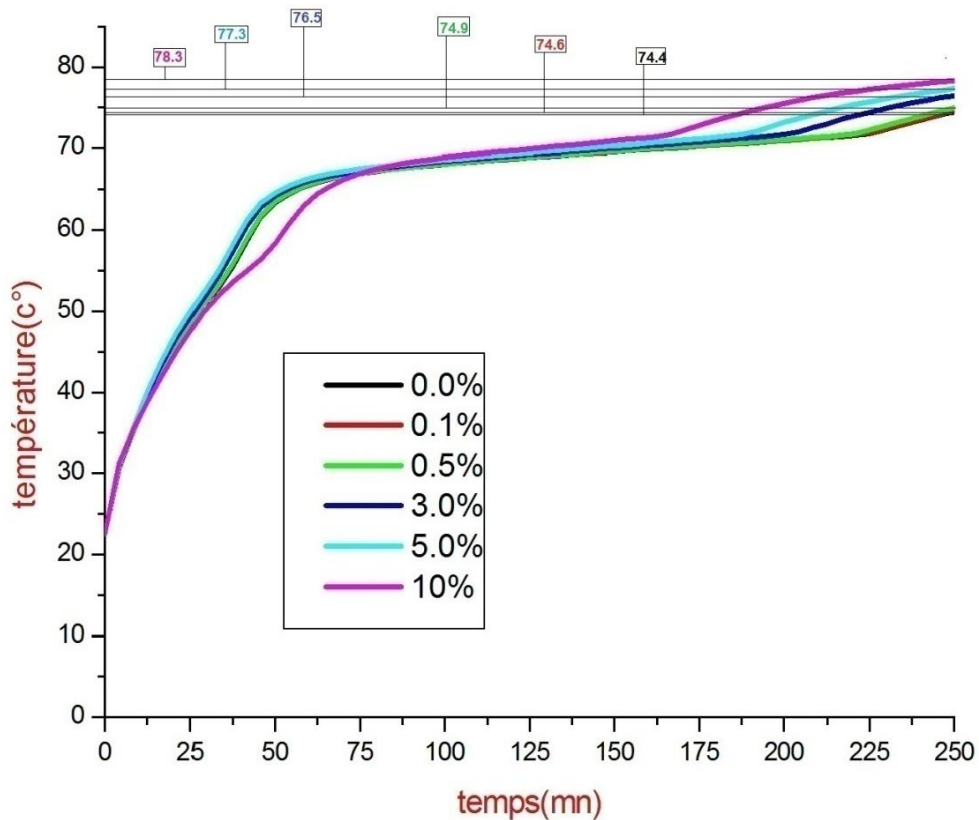




**Fig. 34- Le contour de la fraction liquide pendant la charge à 150 min**

L'amélioration en pourcentage du temps de la fusion complète et les contours de la fraction liquide sont présentés dans les figures 37 et 38.

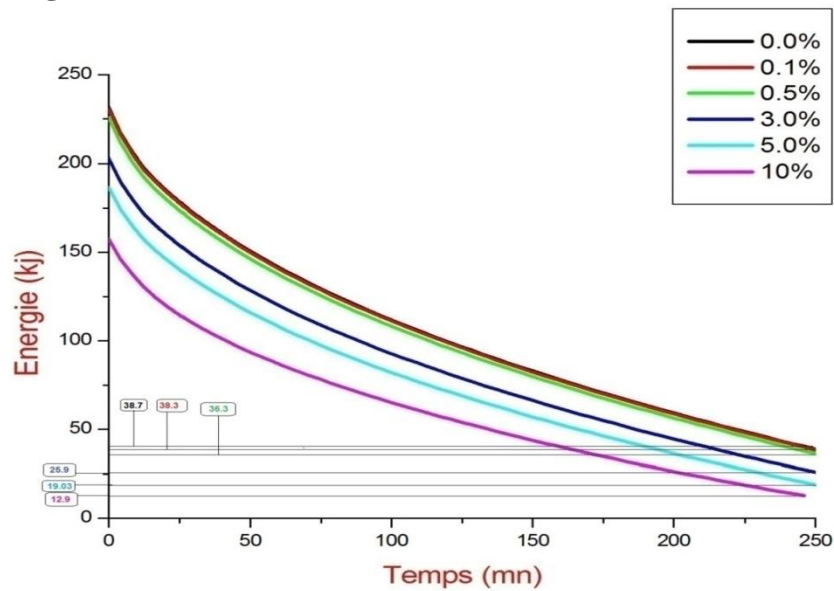
On observe que le temps nécessaire pour la fusion complète du NMCP est inversement proportionnel aux fractions des nanoparticules. D'où le temps diminue avec l'augmentation de la fraction des nanoparticules dans le MCP. Le temps correspondant pour le processus de charge diminue de 229,16 min pour le MCP pure à 170.8 min pour 10% de nano additif. Cela est dû à l'amélioration de la conductivité thermique du NMCP par les Nanos additifs et par la suite accélère le transfert thermique par conduction avec un gain de temps de 25.47%.



**Fig. 39- La variation temporelle de la température totale des NMCP pendant le processus de charge.**

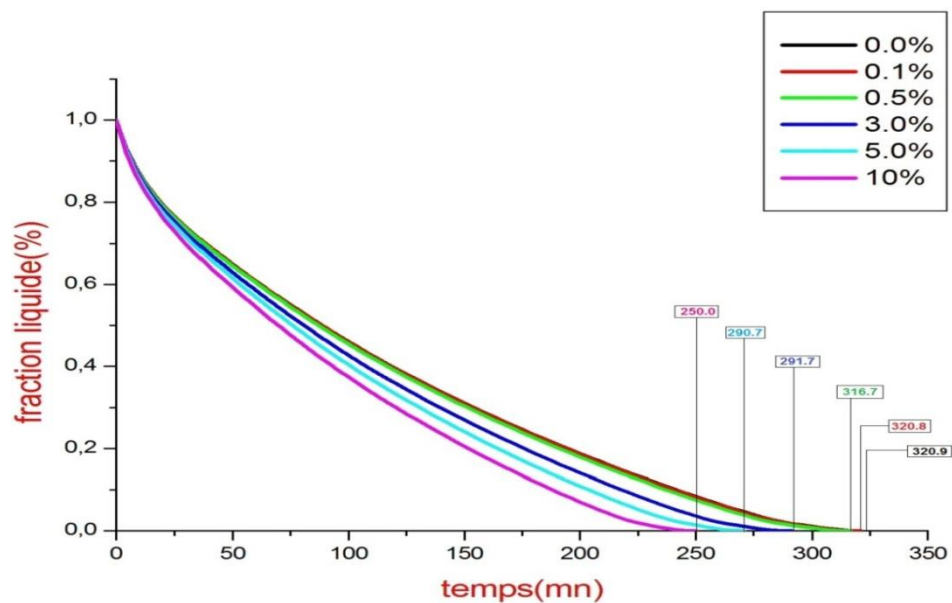
La figure 39 montre les profils de la température totale dans le NPCM à l'intérieure de l'unité de stockage pendant le processus de charge. Comme on peut le voir, nous pouvons diviser le profil à trois parties. La première phase commence de (0 min - 50 min), Là ; on peut voir que la température augmente identiquement et rapidement dans toutes unités sous investigation dû au chauffage sensible dans le NMCP solide. Puis la phase de changement de phase : la température augmente légèrement ou le NMCP commence à stockée la chaleur dans sa phase liquide. A la fin du changement de phase du NMCP sa température augmente jusqu'à atteindre une température d'entrée du fluide caloporteur ( $T = 85^{\circ}\text{C}$ ).

### 4.3.2 La décharge

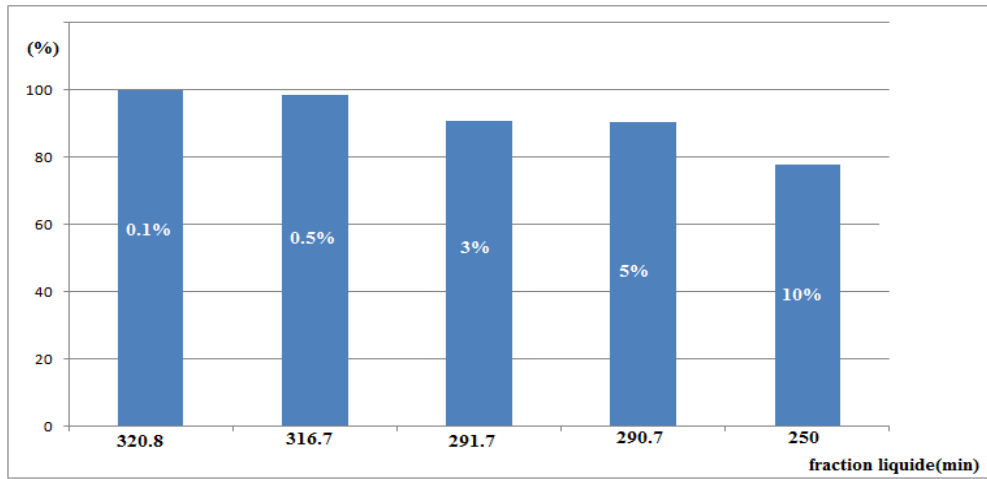


**Fig. 350- Variation de l'énergie stockée avec le temps des échantillons NPCM Pendant le processus de décharge.**

La Fig. 40 présente l'évolution temporelle de l'énergie thermique déchargée des six échantillons de NMCP étudiés. La même chose comme le processus de charge, on remarque que le temps de la décharge des unités de stockage est inversement proportionnel à la fraction des nano additifs ; le temps de décharge diminue de 320 min pour la MCP pure jusqu'à 250 min pour une fraction de 10% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Cela est dû au transfert de chaleur amélioré par l'augmentation de la conductivité thermique du NMCP.

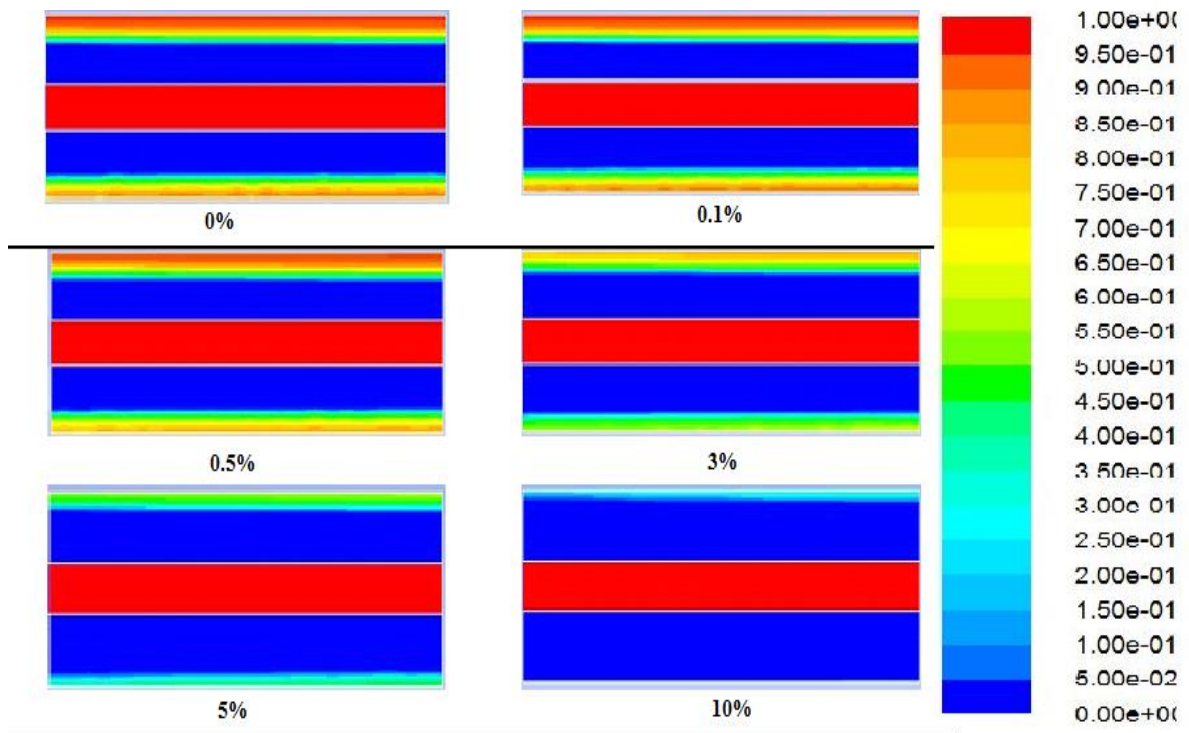


**Fig. 36- Variation de fraction liquide des NPCM avec le temps Pendant le processus de dis charge.**

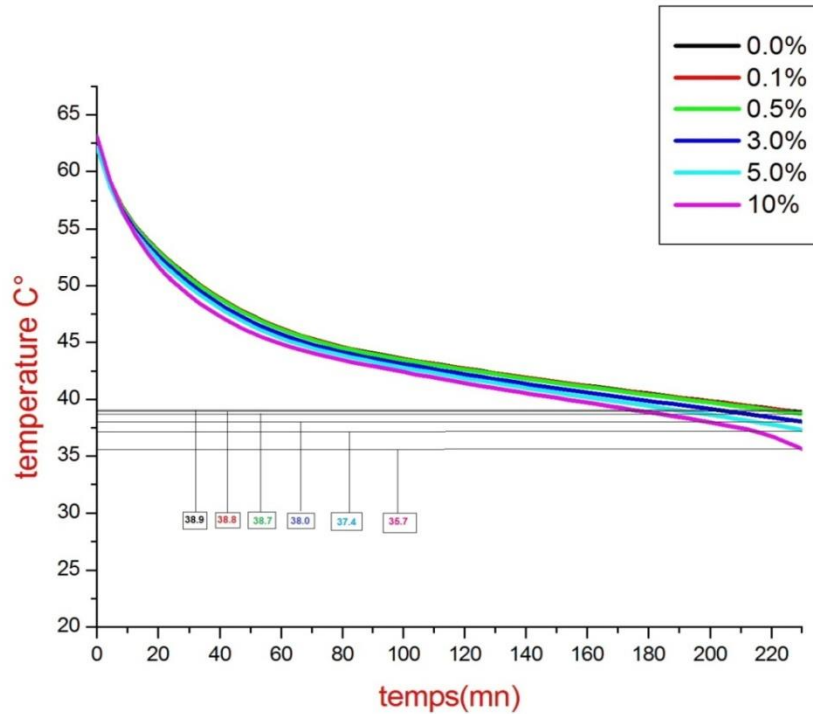


**fig. 37- L'amélioration en pourcentage du temps de la solidification complète du NMCP**

La Fig.41 et 42 montrent l'évolution de la fraction liquide des NMCP au cours du temps et l'amélioration du temps de solidification des NMCP respectivement. On peut voir que le temps de décharge est inversement proportionnel avec la fraction des nanoparticules ajoutées ; car leur addition permet d'améliorer la conductivité du MCP et par la suite accélère le processus de décharge. en conséquent, le temps de décharge est diminué de 320.8 min du MCP pure à 250 min avec un taux de 21% pour une fraction de 10%; cela est confirmé par la figure 43 qui représente le contour de fraction liquide correspondre à 100 min.



**Fig. 38- Le contour de la fraction liquide pendant la décharge à 150 min**



**Fig. 39- La variation temporelle de la température totale des NMCP pendant le processus de décharge.**

La figure 44 montre les profils de la température totale du NPCM à l'intérieur de l'unité de stockage pendant le la décharge. Selon l'état physique du NMCP ; la courbe peut se diviser en trois parties.

- Un refroidissement sensible dans le NMCP solide ou la température diminue rapidement à partir de sa valeur maximale jusqu'à celle de la solidification.
- Quand le NMCP atteint la température de solidification il commence à se transformer progressivement en état solide en libérant l'énergie thermique vers le milieu extérieur dans notre cas le fluide caloporteur.
- A la fin de la solidification la température du NMCP diminue jusqu'à atteindre la température d'entrée de fluide caloporteur

## **Conclusion générale :**

Dans ce projet nous avons traité le problème de stockage d'énergie par chaleur latente à l'aide d'un matériau à changement de phase. Le travail effectué est composé de trois chapitres, le premier est consacré à l'étude bibliographique des principaux travaux effectués sur le sujet. En effet, nous montrons au cours de cette synthèse l'intérêt du sujet à travers les nombreuses applications liées au stockage de la chaleur latente.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté des généralités sur le stockage d'énergie thermique et son principe, ainsi une étude théorique sur les matériaux à changement de phase et leurs applications, enfin, l'impact des nano additifs sur l'amélioration des propriétés thermo-physiques des MCP.

En suite dans le troisième chapitre, nous avons présente la procédure suivie pour la simulation numérique (maillage, condition aux limites, les méthodes de discrétisations des équations gouvernantes et la validation numérique) afin d'étudier numériquement un système de stockage de l'énergie thermique par chaleur latente dans un MCP. En outre, nous avons présenté les équations qui gouvernent les phénomènes des écoulements couplés avec un changement de phase solide-liquide.

Finalement, le dernier chapitre comporte les résultats et les discussions de la présente étude.

Les points essentiels de ce travail peuvent être résumés comme suit :

1. L'addition des nanoparticules améliore considérablement la conductivité thermique du matériau à changement de phase. En outre, elle minimise la capacité du stockage du MCP.
2. Les nano-additifs accélèrent le temps du processus de charge/fusion par environ de 28.8% en comparant par le temps nécessaire pour la fusion complète du MCP pure (Une fraction de 0%).
3. La viscosité dynamique NPCM diminue lorsque la fraction massique des nanoparticules augmente. Ce qui permet de diminuer le taux de changement de phase en raison du mouvement plus lent du NPCM liquide.
4. L'augmentation de la concentration volumique de nanoparticules augmente le transfert de chaleur par conduction et réduit la convection naturelle entraînée par les flux de NMCP liquide.
5. Dans les cycles de charge, le transfert de chaleur est principalement divisé en trois étapes : une période dominée par la conduction dans le NMCP solide, suivie d'une domination de la convection naturelle du NMCP liquide plus chaud ; ensuite, la convection naturelle devienne faible progressivement quand la quantité du NMCP solide diminue.

## Référence bibliographique

- [1] xiaojie ma solidification Inside a clean energy Storage unit utilizing phase change material with copper oxide nanoparticles.
- [2] Sharma, p. Ganesan, v.v. Tyagi, t.m.i. mahlia, accelerated thermal cycle and chemical stability testing of polyethylene glycol (peg) 6000 for solar thermal energy storage. *Solar energy materials and solar cells*. 2016; 147:235-9.
- [3] seeniraj r.v., velraj r., narasimhan n.l. heat transfer enhancement study of a lhts unit .
- [4] mettawee e.s., assassa g. m.r.. thermal conductivity enhancement in a latent heat storage . system. *solar energy* 2007; 81:839-845.
- [5] zafar said nano-enhanced pcm for energy storage .
- [6]adriano sciacovelli melting of pcm in a thermal energy storage unit: numerical investigation and effect of nano-particles enhancement .
- [7] m. alizadeh investigation of lhtess filled by hybrid nano-enhanced pcm with koch snowflake fractal cross section in the presence of thermal radiation .
- [8] zhang h, gao x, xu t, fang y, zhang z (2016). numerical and experimental investigation on latent thermal energy storage system with spiral coil tube and paraffin/expanded graphite composite pcm. *energy conversion and management*, 126: 889–897.
- [9] manar al-jethelah nano-pcm filled energy storagefor solar-termal applications .
- [10] benmansour. simulation du stockage de l'énergie thermique dans un lit fixe de sphères contenant un matériau à changement de phase. *revue d'énergie renouvelable*, 2001. 4: p. 125-134.
- [11] ruiqing du numerical investigation on the melting of nanoparticle-enhanced pcm in latent heat energy storage unit with spiral coil heat exchanger .
- [12]nitesh das effect of carbon nano inclusion dimensionality on the melting of phase change nanocomposites in vertical shell-tube termal energy storage .
- [13] majid gorzina nano-enhancement of phase change material in a shell and multi-pcm-tube heat exchanger .
- [14] r. elbahjaoui, h. e. qarnia, transient behavior analysis of the melting of nanoparticle-enhanced phase change material inside a rectangular latent heat storage unit, *applied thermal engineering* 112 (2017) 720-738.
- [16] dhidanexperemental and numerical investigation of melting of phase change material-nanoparticle suspencions in a square container subjected to a constant heat flux .2013 .
- [17] ho etgao an experemental study on melting heat transfer of paraffin dispersed with al 203 nanoparticles in a vertical enclosure .
- [18] c. arkar, « influence of accuracy of thermal property data of a phase change material on the result of a numerical model of a packed bed latent heat storage with spheres », university of ljubljana, faculty of mechanical engineering, 2005.
- [19] dhidan experemental and numerical investigation of melting of phase change material-nanoparticle suspencions in a square container subjected to a constant heat flux .
- [20] t. kouskso, f. strub, j. castainglasvignottes, a. jamil, j.p. bédécarrats , second law « analysis of latent thermal storage for solar system » avenue de l'universite', 2007 .
- [21] alomair m, alomair y, tasnim s, mahmud s, abdullah h (2018). analyses of bio-based nano-pcm filled concentric cylindrical energy storage system in vertical orientation. *journal of energy storage*, 20: 380–394.
- [22] m.m. farid, a.m. khudhair, s.a.k. razack and s. al-hallaj, 'a review on phase change energy storage: materials and applications', *energy conversion and management*, vol. 45, n°9-10, pp. 1597–1615, 2004.
- [24] moule, y. modélisation et simulation de la combustion dans les écoulements rapides. applications aux superstatoréacteurs. 2013, ecole nationale supérieure de mécanique et d'aérotechnique-poitiers.
- [25] souiadi, l. la convection mixte dans un canal horizontal muni de blocs chauffés.
- [27] gual, m., modélisation de la convection naturelle laminaire dans une enceinte avec une paroi chauffée partiellement. 2009.

- [28] bourgueba, d., and i. bekkouche. simulation numérique du stockage de l'énergie solaire par chaleur latente. 2014.
- [29] ghouti, s. etude du comportement dynamique et energetique des materiaux a changement de phase application aux parois de batiment, in mécanique – énergétique. 2015, aboubakr belkaid tlemcen. p. 144.
- [30] banaszek, j., domanski ,r., rebow ,m. et el-sagir ,f. experimental study of solidsolid change in a spiral thermal energy storage unit, applied thermal engineering, vol.19, pp.1253-1277, 1999
- [31] rappaz m. modelling of microstructure formation in solidification processes,international materials reviews; v: 34, issue 1 (01 january 1989), pp. 93-124.



## Résumé

Dans le cadre de notre projet, nous avons étudié le stockage d'énergie solaire par chaleur latente avec une simulation numérique effectuée par le code de calcul Fluent. Nous avons effectué plusieurs simulations avec des différents pourcentages des nanoparticules AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> remplis par un Matériaux à Changement de Phase (MCP), à l'intérieur une canalisation d'eau passe à travers pour stocker la chaleur durant les périodes ensoleillées et la récupérer durant les périodes déficitaires. Nous avons fait Une comparaison de l'effet entre différent pourcentage des nanoparticules.

Les résultats obtenus montrent que la variation des pourcentages des nanoparticules AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> beaucoup d'influence sur les performances thermique de l'unité de stockage.

## Abstract

As part of our project, we studied solar energy storage by latent heat with a numerical simulation performed by the calculation code Fluent. We performed several simulations with different percentages of the AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles filled by a Phase Change Materials (MCP), inside a water pipe passes through to store heat during sunny periods and recover it during periods of deficit. We've done A comparison of the effect between different percentages of nanoparticles.

The results obtained show that the variation in percentages of AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles greatly influences the thermal performance of the storage unit.

## ملخص

كجزء من مشروعنا، درسنا تخزين الطاقة الشمسية بواسطة الحرارة الكامنة مع محاكاة عددية التي يقوم بها رمز الحساب Fluent. قمنا بالعديد من عمليات المحاكاة بنسب مختلفة من الجسيمات النانوية AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> التي تم ملؤها في مواد تغيير الحالة (MCP)، داخل أنبوب مياه يمر من خلال تخزين الحرارة خلال الفترات المشمسة واستعادتها خلال فترات العجز. قمنا بمقارنة بين التأثير بين نسبة مئوية مختلفة من الجسيمات النانوية.

تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن التباين في النسب المئوية للجسيمات النانوية AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> يؤثر بشكل كبير على الأداء الحراري لوحددة التخزين

