

Visa du chef de département des  
Sciences et de la Technologie  
Signature:.....  
Date :.....

## **Investigation numérique d'une unité de stockage thermique par un matériau à changement de phase**

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme  
de master académique en «*Installations énergétiques et turbomachines*»

Encadreur: BENLEKKAM  
Mohamed lamine  
Signature: .....  
Date: .....

Réalisé par : CHERIET Nassira  
Signature: .....  
Date: .....

Membres du jury

|             |     |             |
|-------------|-----|-------------|
| Trari T.    | MAA | (Président) |
| Oudrane A.  | MCB | (Examineur) |
| Benlekkam M | MAA | (Encadreur) |

# Remerciement

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

Nous remercions Mon encadreur *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.

Nous remercions tous nos enseignants qui nous ont orientés dans notre parcours d'étude de licence et de master.

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 nos enseignants du département de  
génie mécanique.

A tous mes amies: Halima, Amina, Hakima

Ainsi que tous mes amis

*Nassira*



# SOMMAIRE

## Sommaire

|                            |      |
|----------------------------|------|
| Remerciements              |      |
| Dédicaces                  |      |
| Sommaire.....              | I    |
| Liste des figures.....     | IV   |
| Liste des tableaux.....    | VII  |
| Nomenclature.....          | VIII |
| Introduction général ..... | 1    |

## CHAPITRE 1: Recherche bibliographique

|   |    |
|---|----|
| Introduction .....  | 3  |
| 1.1 le stockage d'énergie par chaleur latente dans plusieurs configurations géométriques..... | 3  |
| Conclusion.....   | 15 |

## CHAPITRE 2: Théorie Générale sur le stockage thermique et les Matériaux à changement de phase

|  |    |
|--|----|
| Introduction.....  | 16 |
| 2.1 Le stockage d'énergie thermique .....  | 16 |
| 2.1.1 Le stockage par chaleur sensible .....                                     | 17 |
| 2.1.2 Principe de stockage par chaleur latent.....                               | 18 |
| 2.1.3. Stockage Thermochimique.....  | 20 |
| 2.2 Comparaison des différents types de stockage d'énergie thermique.....        | 20 |
| 2.3 Les matériaux à changements de phase (MCP).....                              | 21 |
| 2.4 Classification des grandes familles de Matériaux à changement de phase ..... | 22 |
| 2.5 Critères de choix d'un matériau à changement de phase .....                  | 22 |
| 2.5.1 Propriétés thermiques.....   | 22 |
| 2.5.2 Propriétés physiques.....  | 23 |
| 2.5.3 Propriétés cinétiques.....   | 23 |
| 2.5.4 Propriétés chimiques .....   | 23 |
| 2.5.5 Aspects économiques .....  | 23 |
| 2.5.6 Critères technologiques.....   | 23 |
| 2.6 Classification des MCP .....   | 24 |
| 2.6.1 Les matériaux organiques.....  | 24 |
| 2.6.1.1 Les paraffine.....   | 24 |
| 2.6.1.2 Les non-paraffines.....  | 25 |
| 2.6.2 Les matériaux inorganiques.....  | 26 |
| 2.6.2.1 Les sels hydratés .....  | 26 |
| 2.6.2.2 Les métaux .....   | 26 |
| 2.6.3 Les eutectiques .....  | 27 |

|   |    |
|---|----|
| 2.6.4 les MCP « commerciaux ».....                                  | 27 |
| 2.7 Etude comparative des composés organiques et inorganiques.....  | 28 |
| 2.8 Les Applications.....   | 29 |
| 2.8.1 L'isolation des bâtiments.....                                | 29 |
| 2.8.2 La climatisation passive et le chauffage.....                 | 30 |
| 2.8.3 Le stockage de l'énergie thermique.....                       | 30 |
| 2.8.4 Le Textile.....   | 31 |
| 2.8.5 Transport de produits alimentaires.....                       | 31 |
| 2.9 Classe de MCP.....  | 32 |
| 2.9.1 Matériaux changement de phase SP.....                         | 32 |
| 2.9.2 Matériaux changement de phase RT.....                         | 32 |
| 2.10 Les problèmes liés au changement de phase.....                 | 32 |
| 2.10.1 La corrosion.....  | 32 |
| 2.10.2 La ségrégation.....  | 32 |
| 2.10.3 La surfusion.....  | 33 |
| 2.11 Théorie de la solidification – fusion.....                     | 34 |
| 2.11.1 la solidification-fusion d'un produit pur.....               | 34 |
| 2.11.2 La solidification-fusion d'un mélange homogène.....          | 35 |
| 2.12 Différents moyens d'intégration de MCP dans les bâtiments..... | 36 |
| 2.12.1 intégration directe.....                                     | 36 |
| 2.12.2 encapsulation avant intégration.....                         | 36 |
| 2.12.2.1 Capsules de diverses géométries (micro-encapsulation)..... | 36 |
| 2.12.2.2 Capsules de diverses géométries (macro-encapsulation)..... | 37 |
| 2.13 Systèmes de stockage latent.....                               | 38 |
| 2.13.1 Système de stockage Passif.....                              | 38 |
| 2.13.2 Système de stockage Actif.....                               | 39 |
| Conclusion.....   | 39 |
| <b>CHAPITRE 3: Méthode numérique et position du problème</b>        |    |
| INTRODUCTION.....   | 41 |
| 3.1 Résolution numérique à l'aide de codes CFD.....                 | 41 |
| 3.1.1 Méthodes numériques.....                                      | 41 |
| 3.2 Types de simulation (DNS, RANS, LES).....                       | 42 |
| 3.2.1 DNS.....  | 42 |
| 3.2.2 RANS.....   | 42 |
| 3.2.3 LES.....  | 43 |
| 3.3 Méthode des volumes finis.....                                  | 44 |

|  |    |
|--|----|
| 3.3.1 Maillage .....   | 45 |
| 3.4 Critère de convergence .....   | 46 |
| 3.5 la modélisations des écoulements avec changement de phase .....        | 46 |
| 3.5.1 les schémas numériques avec maillage fixe .....                      | 46 |
| 3.5.2 les schémas avec maillage mobile .....                               | 47 |
| 3.6 Méthode du Cp effective (ou apparent).....                             | 47 |
| 3.7 Méthode Enthalpique .....  | 48 |
| 3.8 Position du problème et modélisation .....                             | 49 |
| 3.9 Formulation mathématique.....  | 51 |
| 3.9.1 Équation de continuité.....  | 51 |
| 3.9.2 Les équations de quantités de mouvements .....                       | 51 |
| 3.9.3 Équation de la conservation d'énergie .....                          | 52 |
| 3.10 Schéma du maillage du modèle physique adopté .....                    | 53 |
| 3.11 Méthodologie computationnelle.....                                    | 54 |
| 3.11.1 Paramètres pour la solution convergée .....                         | 54 |
| 3.11.3 Étapes de résolution du problème .....                              | 55 |
| Conclusion.....  | 55 |
| <b>CHAPITRE 4: Résultats et discussions</b>                                |    |
| Introduction .....   | 56 |
| 4.1 Présentation de l'unité de stockage utilisée .....                     | 56 |
| 4.2 Etude paramétriques .....  | 57 |
| 4.2.1 L'impact de la variation de la température d'entrée de l'eau.....    | 57 |
| 4.2.2 L'impact de la variation du débit massique de l'eau.....             | 57 |
| 4.2.3 L'impact de la variation de la longueur de l'unité de stockage. .... | 58 |
| Conclusion.....  | 59 |
| Conclusion générale .....  | 60 |
| Bibliographie.....   | 60 |
| Annexes  |    |
| Résumé   |    |

# Liste des figures

## Liste des figures

|   |    |
|---|----|
| Fig. 1-Schémas du système de stockage et du modèle physique étudié.....   | 3  |
| Fig. 2- Effet de température d'entrée du caloporteur sur le temps de fusion du MCP .....  | 4  |
| Fig. 3-Effet de température d'entrée du caloporteur sur la fraction de fusion du MCP .....  | 4  |
| Fig. 4- Modèle physique de l'unité de stockage étudiée.....   | 5  |
| Fig.5- Représentation schématique du réfrigérateur avec MCP.....  | 6  |
| Fig.6 -Évolution de la température de l'air avec et sans MCP.....   | 6  |
| Fig.7-Évolution de la température de l'air dans l'enceinte réfrigérée.....  | 6  |
| Fig.8- canal poreux vertical.....   | 7  |
| Fig.9- Comparaison du stockage thermique par Chaleur sensible et par chaleur latente.....   | 7  |
| Fig.10- Représentation schématique du processus de transfert de chaleur entre le MCP et le caloporteur à l'intérieur du réservoir de stockage.....  | 8  |
| Fig.11- Schéma d'un système de stockage de la chaleur et de la chaleur pour Eau chaude domestique solaire.....  | 9  |
| Fig.12- Trois configurations expérimentales, un système de contrôle sans amélioration du transfert de chaleur et des systèmes augmentés d'ailettes circulaires et longitudinales.....                           | 10 |
| Fig.13 - Comparaison de profil de température moyen dans le MCP des systèmes mis à l'amende circulaires et longitudinaux avec le système de contrôle pour le fait de charger et déchargement des processus..... | 10 |
| Fig.14- Vue schématique de la section d'essai de l'échangeur de chaleur à tubes à ailettes. ....  | 10 |
| Fig.15-Structures avec fibres de carbone dispersées entre des tubes verticaux (a) ou organisées (b) .....   | 11 |
| Fig.16- Schéma du lit de stockage.....  | 12 |
| Fig.17- Evolution de la température moyenne du lit en fonction du temps au cours d'un cycle (stockage et déstockage).....   | 12 |
| Fig.18-Distribution de la température dans le température de l'air à l'entrée lit pour un constante, durant le stockage.....  | 12 |
| Fig.19- Géométrie du problème .....   | 13 |
| Fig.20- variation de la température [Paraffine] .....   | 13 |
| Fig.21- Variation de la température Erythrol .....  | 13 |
| Fig.22- schéma du problème .....  | 14 |
| Fig.23- Positions numérique et analytique de L'interface .....  | 14 |
| Fig.24- Vue du prototype expérimental et schéma du réservoir de stockage .....  | 14 |
| Fig. 25– Les différents systèmes de stockage de l'énergie .....   | 16 |
| Fig. 26– Les différentes techniques de stockage de l'énergie thermique.....   | 17 |

|  |    |
|--|----|
| Fig.27– Equivalence entre la chaleur latente nécessaire pour fondre 1 kg de glace et la chaleur sensible nécessaire pour chauffer l'eau liquide..... | 18 |
| Fig.28– évolution de température d'un corps pur homogène avec changement d'état.....   | 19 |
| Fig.29-Variation de l'enthalpie spécifique en fonction de la température : (a) pour un corps pur ; (b) pour un mélange. ....                         | 20 |
| Fig.30–Principe de fonctionnement des matériaux à changements de phase. ....   | 21 |
| Fig.31–Classification des grandes familles de MCP suivant leur chaleur latente et leur température de fusion. ....                                   | 22 |
| Fig.32– organigramme de classification des MCP solide/liquide.....   | 24 |
| Fig.33– MCP organique (cire de paraffine) .....  | 25 |
| Fig.34–Intégration d'un MCP dans un mur de plâtre.....   | 30 |
| Fig.35– Nouvel accumulateur de chaleur solaire développé par le DLR (© DLR - German Aerospace Center) .....  | 31 |
| Fig.36– Les applications Transport de produits alimentaires. ....  | 31 |
| Fig.37–Evolution théorique de T en fonction du temps.....  | 33 |
| Fig.38– Evolution de T en fonction du temps.....   | 34 |
| Fig.39–solidification d'une substance pure.....  | 35 |
| Fig.40– la solidification d'un produit homogène .....  | 36 |
| Fig.41– Exemple des MCP micro-encapsulés : à l'état poudre et à l'état liquide .....   | 36 |
| Fig.42–Photographies de macro encapsulation de diverses géométries .....   | 37 |
| Fig.43– Différentes modes d'utilisation des MCP dans le bâtiment.....  | 38 |
| Fig.44–Module pour stockage passif (gauche), coupe transversale des tubes ailettes (droite)....  | 39 |
| Fig.45– Modélisation du spectre d'énergie cinétique turbulente en fonction de l'approche .....   | 44 |
| Fig.46- Volume de contrôle bidimensionnel.....   | 45 |
| Fig.47- Schéma du volume de contrôle (a), maillage décalé pour $u_e$ (b), maillage décalé pour $v_n$ (c).....  | 46 |
| Fig.48- Evolution de la capacité thermique en fonction de la Température lors d'un changement de phase. ....   | 48 |
| Fig.49-Modèle physique pour le calcul numérique.....   | 49 |
| Fig.50-maillage du domaine de calcul.....  | 53 |
| Fig.51-Modèle physique pour le calcul numérique.....   | 56 |
| Fig.52– La validation des températures de sortie du fluide caloporteur dans le cycle de charge et de décharge.....                                   | 56 |
| Fig.53– Effet de la température d'entrée de l'eau. ....  | 57 |
| Fig.54– Effet du débit massique.....   | 58 |

|  |    |
|--|----|
| Fig.55– Effet de la variation de la longueur de l'unité de stockage..... | 58 |
| Fig.56-Vue globale de Gambit. ....                                       | 64 |
| Fig.57- Vue globale de Fluent. ....                                      | 66 |

# Liste des tableaux

**Liste des tableaux**

|  |    |
|--|----|
| Tableau 1- Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur .         | 21 |
| Tableau 2- Caractéristiques de quelques MCP organiques                               | 25 |
| Tableau 3- Caractéristiques de quelques MCP inorganiques                             | 27 |
| Tableau 5-Avantages et inconvénients des différentes catégories de MCP               | 28 |
| Tableau 4- Caractéristiques de quelques MCP commerciaux                              | 28 |
| Tableau 6 les dimension de la géométrie  | 49 |
| Tableau 7- Les propriétés du matériau à changement de phase de la cire de paraffine. | 50 |
| Tableau 8- Propriétés thermophysiques de l'eau.                                      | 50 |
| Tableau 9- Configuration pour la simulation FLUENT                                   | 54 |
| Tableau 10- Le pas de temps et facteurs de sous-relaxation                           | 55 |



# Nomenclature

# Nomenclature

## Symboles

|          |   |
|----------|---|
| $A$      | surface avant du système [ $m^2$ ]                                  |
| $Sh$     | Terme de source [-]   |
| $C_p$    | capacité calorifique spécifique [ $J/kg.K$ ]                        |
| $g$      | accélération gravitationnelle [ $m/s^2$ ]                           |
| $T$      | Température [ $K, ^\circ C$ ]                                       |
| $\beta$  | 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 [ $J.kg^{-1}$ ]                                     |
| $Q$      | Quantité de chaleur [ $J$ ]   |
| $m$      | Masse [ $kg$ ]  |

## Symboles grecs

|           |   |
|-----------|---|
| $\lambda$ | Conductivité thermique [ $W/m \cdot K$ ]  |
| $\rho$    | Masse volumique [ $kg/m^3$ ]              |
| $\rho_0$  | Masse volumique de référence [ $kg/m^3$ ] |
| $\mu$     | Viscosité dynamique [ $Pa \cdot s$ ]      |
| $\nu$     | Viscosité cinématique [ $m^2/s$ ]         |
| $h$       | 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                     |

# Introduction générale

## Introduction général

Les gaz à effet de serre (GES) sont naturellement présents dans l'atmosphère. Ces derniers sont indispensables pour maintenir une température moyenne de la planète aux alentours de 15 °C.

Les GES doivent être limités mais les activités humaines entraînent une augmentation de leurs concentrations atmosphériques par le rejet excessif de gaz polluants (CO<sub>2</sub>, SO<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>, etc.) suite à l'exploitation massive des combustibles fossiles.

Cette hausse considérable est liée à la croissance industrielle et économique et dépend essentiellement des attitudes et des activités humaines et de la dégradation de la couverture végétale.

Pour pallier ces problèmes auxquels est confronté le monde actuel, en ce début de *XXI* e siècle, des mesures ont été prises par les pays industrialisés. Ainsi la commission européenne s'est fixée pour objectif de réduire d'au moins 20% les émissions de gaz à effet de serre d'ici 2020 par rapport à 1990 [2]. La réalisation d'un tel objectif passe par une diminution de la consommation d'énergie et l'augmentation de la production des énergies dites « renouvelables » (solaires, géothermie, éolien etc...). Le pari est d'autant plus difficile que le niveau de vie et l'industrialisation des sociétés actuelles exigent une forte dépense d'énergie.

L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, elle est à l'origine de la quasi-totalité des sources d'énergies utilisées par l'homme.

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. C'est une forme d'énergie disponible, économique, non polluante et nécessite peu d'entretien. [3]

Lorsque le soleil est alternativement voilé par des passages nuageux, le récepteur solaire subit d'intenses chocs thermiques. La nature intermittente de l'énergie solaire pose des problèmes de stockage. Il est nécessaire de développer des dispositifs de stockage permettant le transfert d'énergie des périodes excédentaires aux périodes déficitaires et adapter ainsi sa production à sa consommation. Ce stockage peut être sous forme de chaleur sensible ou de chaleur latente. Différents types d'unités de stockage ont été conçus et étudiés. Le stockage thermique par chaleur latente dans les liquides ou les solides peut être un moyen très intéressant en utilisant des matériaux à changement de phase. Ces matériaux présentent l'avantage de stocker une grande quantité d'énergie avec un bon rapport masse/volume. Dans le cadre de ce

travail, on s'intéresse à l'étude numérique de stockage de l'énergie solaire par chaleur latente à l'aide d'un échangeur de chaleur.

Dans le cadre de ce travail, on s'intéresse à l'étude numérique du phénomène de transfert thermique avec un changement de phase solide-liquide, cela pendant le processus de charge et de décharge d'un système de stockage thermique par chaleur latente. Ce système est constitué de deux tubes concentriques. Dans le tube central s'écoule un fluide caloporteur. Tandis que, l'espace annulaire rempli par un matériau à changement de phase MCP (paraffine).

le présent mémoire comporte quatre chapitres :

Le premier s'articule sur une synthèse bibliographique des différentes expérimentations qui ont été faites sur le plan national qu'international et à tirer les conclusions sur les difficultés rencontrées et les solutions associées. Cet axe va être notre fil conducteur et permettre de mettre en évidence d'une part les retours d'expérience et d'autre part, les méthodes numériques qui ont été utilisées.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les matériaux à changement de phase et leurs applications et les différents types de stockage de l'énergie solaire.

Dans le troisième chapitre, nous présentons le problème étudié, les équations qui gouvernent le phénomène étudié ainsi que la méthode de résolution numérique utilisée.

Nous présentons dans le chapitre 4 la simulation numérique du transfert de chaleur conjugué avec un changement de phase solide-liquide par le code calcul Fluent. Ensuite, les résultats ont été comparés aux résultats expérimentaux décrits dans la littérature et discutés. Les résultats des applications numériques sont exposés et interprétés dans ce chapitre.

En fin est comme tout travail scientifique cette étude est clôturée par une conclusion générale.

# Recherche Bibliographique

## Introduction

Le contexte énergétique a poussé les scientifiques à réfléchir à l'utilisation de l'énergie solaire qui possède le double avantage d'être gratuite et propre. Toutefois, l'inconvénient de cette source d'énergie est son intermittence. En effet, souvent le besoin de l'apport d'énergie est décalé par rapport aux besoins. L'une des solutions envisagées pour faire face à ces problèmes est le stockage de l'énergie.

Le stockage est un moyen très important pour la gestion optimale de l'énergie thermique. Il permet d'assurer une balance entre l'énergie demandée et celle fournie. Le stockage d'énergie thermique est généralement fait sous deux formes:

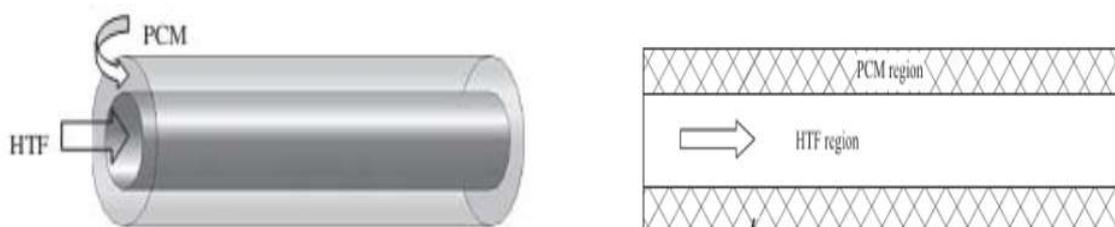
Le stockage par chaleur sensible consiste à apporter de la chaleur à un matériau sans changement de phase et exploiter la capacité calorifique d'un matériau. Le stockage par chaleur latente consiste à exploiter la quantité d'énergie engagée lors du changement de phase. Où ce dernier se produit à température constante pour un corps pur.

Les matériaux à changement de phase (MCP) présentent un inconvénient majeur, à savoir leur faible conductivité thermique. Cependant, l'addition des nanoparticules de haute conductivité thermique améliore leurs performances de stockage.

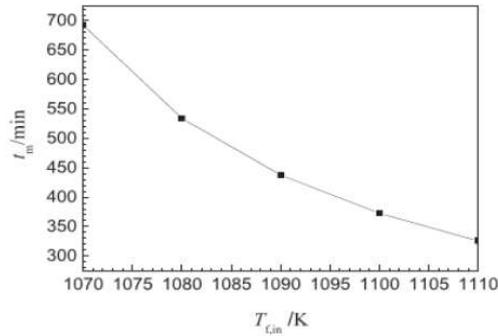
Dans notre travail on s'intéresse au stockage d'énergie par chaleur latente à l'aide des matériaux à changement de phase. Afin de réaliser ce travail, on a abordé une recherche bibliographique sur les différentes techniques de stockage latente à l'aide des matériaux à changement de phase.

### 1.1 le stockage d'énergie par chaleur latente dans plusieurs configurations géométriques

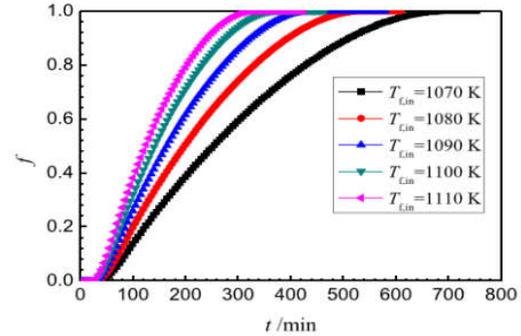
**Fouzi.B et al** [4] ont présenté une étude numérique des performances d'une unité de stockage thermique par chaleur latent d'un système constitué de deux tubes concentriques. Leur contribution est basé sur une étude paramétrique à savoir l'effets de la température d'entré du fluide caloporteur, sa vitesse, et des paramètres géométriques sur le temps du processus de charge et de décharge et le taux de stockage thermique. Les résultats obtenues montrent que l'augmentation de la vitesse d'entrer du fluide caloporteur ainsi que sa température améliore le taux de fusion du MCP.



**Fig. 1-Schémas du système de stockage et du modèle physique étudié.**



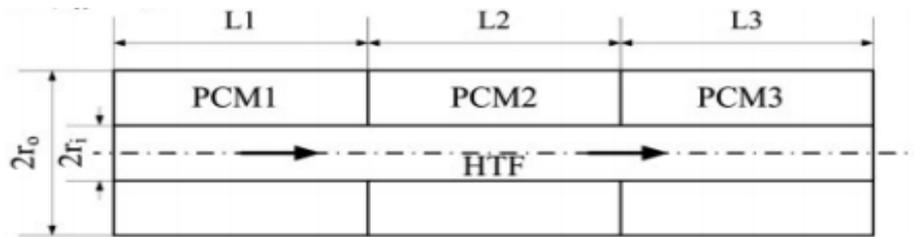
**Fig. 2- Effet de température d'entrée du caloporteur sur le temps de fusion du MCP**



**Fig. 3- Effet de température d'entrée du caloporteur sur la fraction de fusion du MCP.**

**F. Benmoussa** [5] Ont étudié numériquement le stockage de l'énergie thermique par chaleur latente dans deux tubes coaxiaux. L'espace entre les tubes est rempli de deux matériaux à changement de phase (MCP) différents nommés MCP<sub>1</sub> et MCP<sub>2</sub>, avec différentes températures de fusion. Une série d'investigation numérique ont été menées dans le but d'analyser l'influence de la température d'entrée du fluide caloporteur sur l'évolution instationnaire de la température et la fraction de fusion des deux MCP, ainsi que l'évolution de l'énergie thermique stockée dans différentes zones de MCP. Le processus de stockage thermique est étudié sous l'effet de trois différentes valeurs de la température d'entrée du fluide caloporteur au-dessus de la température de fusion des MCP. Les résultats montrent que le taux de fusion du MCP<sub>2</sub> est plus rapide que MCP<sub>1</sub>, la température et la fraction de fusion du MCP<sub>2</sub> varie rapidement pendant le processus de stockage passant par le changement de phase jusqu'à atteindre la température d'entrée du fluide caloporteur. La quantité d'énergie stockée augmente pendant le processus de stockage jusqu'à une valeur maximale à la fin du processus. Le maximum d'énergie thermique stockée est observé dans le MCP<sub>1</sub> avec haute chaleur latente et température de fusion. L'effet de la température d'entrée du fluide caloporteur sur la quantité d'énergie stockée montre que la capacité de stockage thermique est importante, quand la différence entre la température d'entrée du fluide caloporteur et le point de fusion des MCP est grande.

**Y.Q.Li et al** [6] Ont étudié numériquement le stockage de l'énergie thermique par chaleur latente dans une unité Tube-Calandre en cascade (U<sub>1</sub>), remplie avec trois types de MCP, C<sub>24</sub>H<sub>50</sub>, C<sub>21</sub>H<sub>44</sub> et C<sub>18</sub>H<sub>38</sub>, avec différentes températures de fusion. Ils ont utilisé un modèle mathématique basé sur la méthode d'enthalpie pour simuler le changement de phase, en considérant l'effet de la convection naturelle dans le MCP liquide.



**Fig. 4- Modèle physique de l'unité de stockage étudiée**

Les résultats montrent que l'unité  $U_1$  peut améliorer considérablement le taux de transfert de chaleur et réduire le temps de stockage de la chaleur par rapport à une unité avec un seul MCP ( $U_2$ ). Outre, elle peut stocker plus de 58% d'énergie pour la même période de charge. En plus l'augmentation de la température d'entrée et du débit du fluide caloporteur conduisent à un temps de charge plus court. Alors l'utilisation d'une unité à plusieurs MCP peut améliorer leurs performances de stockage thermique.

**Zhang et al [7]** 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.

**Medrano et al [8]** Ils étudié expérimentalement les caractéristiques du transfert de chaleur de cinq système de stockage par chaleur latente pour les deux phase de charge et de décharge. Les résultats indiquent que les configuration avec double tubes rempli de MCP incorporé par le Graphite a le meilleur rendement.

**Seeniraj et al [9]** ont étudié le comportement d'un MCP utilisé pour le stockage à haute température dans un système tube-calandre. Il ont trouvé qu'une petite quantités du MCP à la sortie du tube reste à l'état solide. Cela est dû à la déférence entre la température du fluide caloporteur et le point de fusion du MCP. Il est également rapporté que la présence d'un petit nombre d'ailettes annulaires maintient une différence de température relativement élevée entre le fluide caloporteur et le point de fusion et que l'on peut ainsi trouver une fusion partout dans la direction axiale.

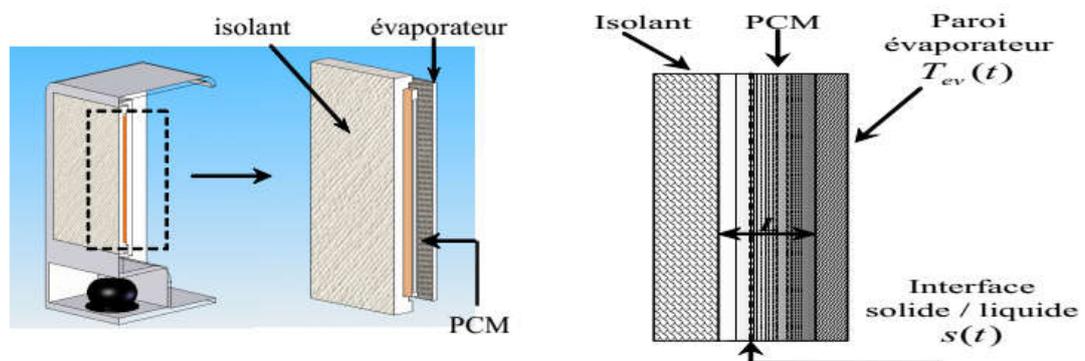
**Agyenim et al. [10]** ont étudié expérimentalement l'amélioration du transfert de chaleur dans un système de transfert de chaleur multi tubes ( avec quatre tubes) rempli de MCP dont son point de fusion est  $117,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . les résultats ont montré que l'apparition de la convection naturelle à travers la formation de plusieurs cellules convectives dans le système multi tube significativement modifié la forme de l'écoulement du fluide de l'interface liquide-solide. Afin d'inclure à la fois les avantages de l'emploi des ailettes.

**Fortunato et al [11]** Aussi présenté les performance d'un réservoir cylindrique de stockage d'énergie dans un réseau de transfert de chaleur multitubes. les simulations sont conduites pour piloter les profils de température à l'intérieur du MCP et estimer le temps

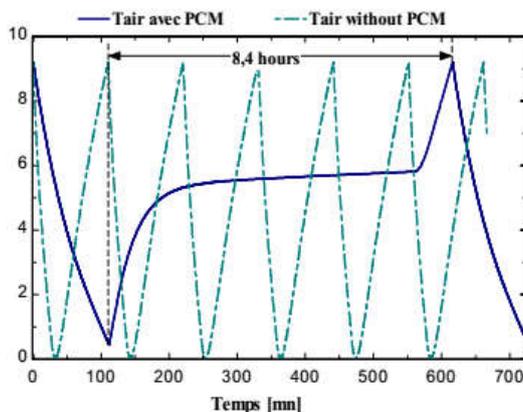
nécessaire pour compléter sa fusion. Différentes campagnes de simulation sont effectuées en faisant varier la température d'entrée du fluide caloporteur. les résultats obtenus peuvent être utilisés comme lignes directrices pour des études plus approfondies du système de stockage thermique et des processus ultérieurs d'analyse et d'optimisation.

**Kamel Azzouz [12]** a étudié l'impact de MCP sur les gains énergétiques dans un système réfrigération domestique fonctionnant en tout ou rien. Le changement de phase dans le matériau est décrit par un modèle de conduction pure avec une technique d'immobilisation de l'interface. Dans la modélisation dynamique du système frigorifique, il a admis une évolution linéaire du titre de vapeur tout le long des échangeurs en utilisant des propriétés thermophysiques moyennées calculées à partir d'un titre de vapeur moyen.

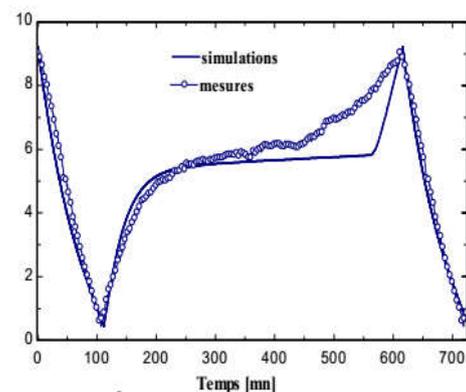
Les résultats du couplage des deux modèles dynamiques montrent clairement l'intérêt de l'intégration d'un élément à chaleur latente dans un réfrigérateur domestique.



**Fig. 5- Représentation schématique du réfrigérateur avec MCP**



**Fig. 6 -Évolution de la température de l'air avec et sans MCP**



**Fig. 7-Évolution de la température de l'air dans l'enceinte réfrigérée**

La Fig 25, montre que l'ajout d'une plaque de MCP de 5 mm dans la face arrière de l'évaporateur permet de réduire significativement les fluctuations de température dans l'enceinte du réfrigérateur tout en diminuant le temps de fonctionnement du compresseur (17,5 % avec MCP contre 25 % sans MCP). Ainsi, il est possible d'avoir une autonomie (maintien du groupe froid à l'arrêt) de 8 heures et demie.

**Walid FOU DHIL et al [13]** 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

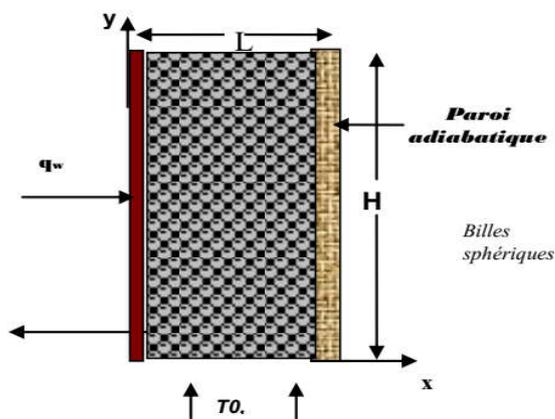


Fig. 8- canal poreux vertical

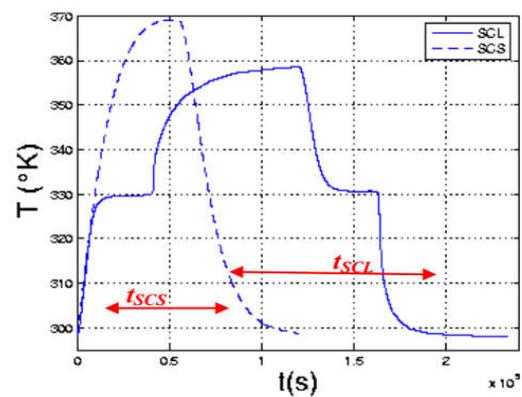


Fig. 9- Comparaison du stockage thermique par Chaleur sensible et par chaleur latente

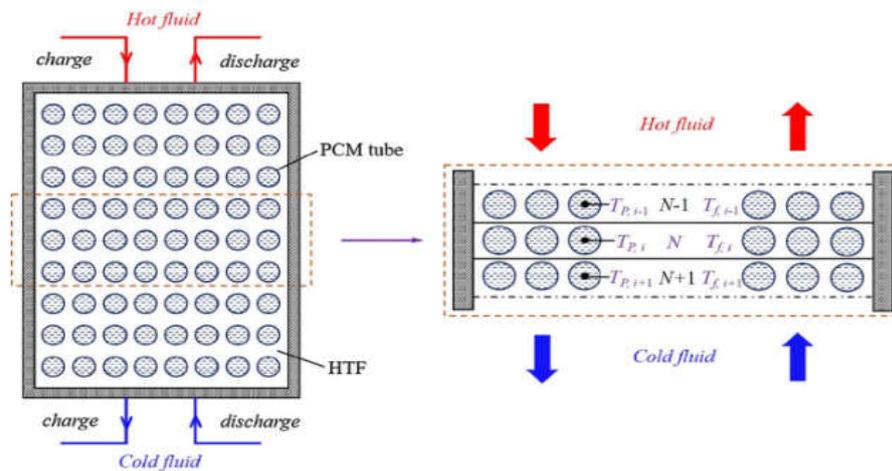
**Kurklu et al [14]**, ont réalisé un nouveau type de capteur solaire qui présent deux sections : la première est rempli avec de l'eau et l'autre avec un matériau à changement de phase dont la température de fusion est située entre 45–50°C. Les résultats expérimentaux ont montré que, pour une journée avec un ensoleillement élevé, la température du réservoir est maintenue à 30°C pendant toute la nuit. De plus les valeurs de l'efficacité thermique instantanée étaient entre environ 22% et 80%.

**Mettaweea et Assassab[15]** ont présenté une conception, réalisation et une étude expérimentale d'un système compact de capteur solaire-MCP. L'énergie solaire a été stockée dans la paraffine solide, et elle a été déchargée dans l'eau froide entrant dans des tubes à l'intérieur de la cire. Les résultats expérimentaux ont montré que le coefficient moyen de transfert thermique augmente avec l'épaisseur de la couche de paraffine fondue, qui est dû à la convection naturelle.

**Yantong Li et al [16]** ont présenté une procédure générale pour optimiser la conception d'un réservoir de stockage à MCP, y compris la spécification des objectifs de conception, l'identification des variables de désirées (pour l'optimisation), la construction de la plate-forme

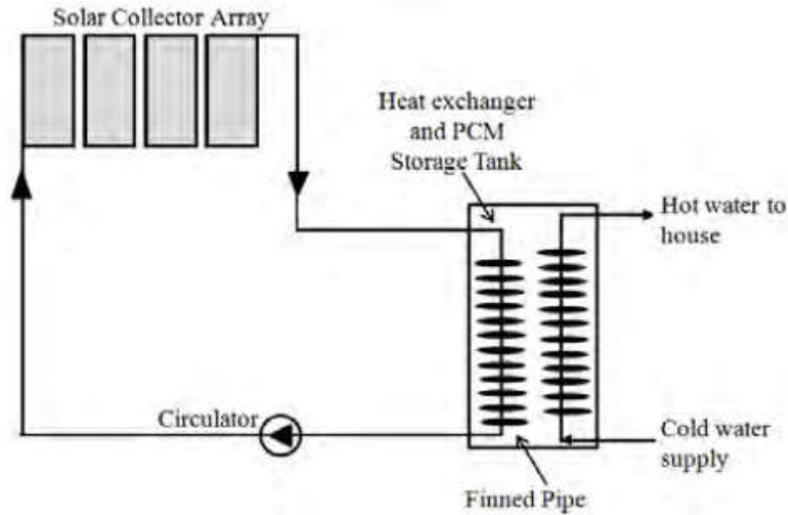
de simulation et la prise de décision finale. La procédure générale a été démontrée en l'appliquant à une piscine en plein air, où l'objectif de conception était de minimiser le volume du réservoir de stockage lorsqu'il était nécessaire de permettre le stockage de la chaleur pour maintenir la température de l'eau d'une piscine en plein air à l'intérieur de la gamme thermique confortable pendant sa période d'ouverture en saison hivernale. Après avoir identifié les variables de désirées, une plate-forme de simulation informatique a été développée en utilisant TRNSYS et MATLAB pour étudier les effets des variables désirées, sur le volume du réservoir de stockage à MCP. Des études de cas montrent que l'optimisation proposée est capable de réduire le volume du réservoir de stockage à MCP sans sacrifier la capacité de stockage thermique.

Par conséquent, cette étude fournit des directives utiles pour optimiser la conception d'un réservoir de stockage MCP.



**Fig. 10- Représentation schématique du processus de transfert de chaleur entre le MCP et le caloporteur à l'intérieur du réservoir de stockage.**

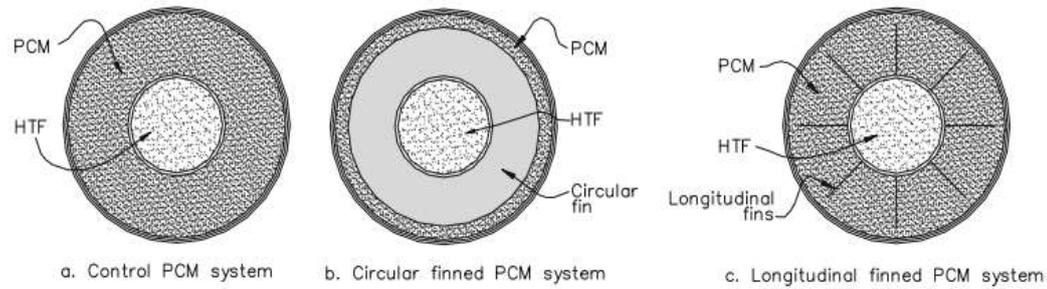
**Robynne Murray et al** [17] a présenté que L'eau chaude sanitaire solaire peut être utilisée pour réduire les factures d'énergie et les émissions du gaz à effet de serre associées au chauffage de l'eau domestique. Cependant, l'un des obstacles les plus importants à la poursuite du déploiement des applications thermiques solaires est l'espace et le poids requis pour le stockage de l'énergie rassemblé. Les matériaux à changement de phase (MCP) sont avantageux pour de l'énergie journalière avec leur haute densité du stockage et opération isotherme pendant transitions de la phase, et contournerait ces problèmes.



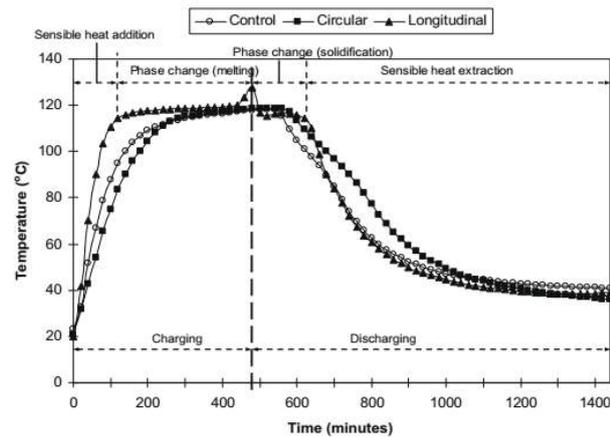
**Fig. 11- Schéma d'un système de stockage de la chaleur et de la chaleur pour Eau chaude domestique solaire**

Le modèle a montré que la présence de la convection naturelle dans le liquide fondue a joué un rôle considérable accélérer le transfert de la chaleur et le processus fondant. Pendant décharger, les résultats numériques ont assez bien prédit le refroidissement et solidifier comportement observé dans les dimensions expérimentales, démontrer que l'effet de convection naturelle pendant la solidification est négligeable pour la plupart.

**Agyenim et al. [18]** ont étudié expérimentalement une système de stockage de l'énergie a été conçu en utilisant un échangeur de chaleur à tube concentrique horizontal contenant de l'érythritol comme MCP (Fig.12). avec un point de fusion de  $117,7^{\circ}\text{C}$ . Trois configurations expérimentales, un système de contrôle sans amélioration du transfert de chaleur et des systèmes augmentés d'ailettes circulaires et longitudinales ont été étudiés. Les résultats présentés comparent les caractéristiques de transfert de chaleur du système à l'aide de courbes isothermes et de courbes température-temps. Le système à ailettes longitudinales a donné les meilleures performances avec une réponse thermique accrue pendant la charge et un sous-refroidissement réduit dans la masse fondue. Les données mesurées expérimentalement pour les systèmes de contrôle, à ailettes circulaires et longitudinales ont confirmé l'hypothèse d'axis symétrie à l'écoulement du fluide caloporteur en utilisant des gradients de température dans les directions axiale, radiale et angulaire dans le système MCP à double tuyau.

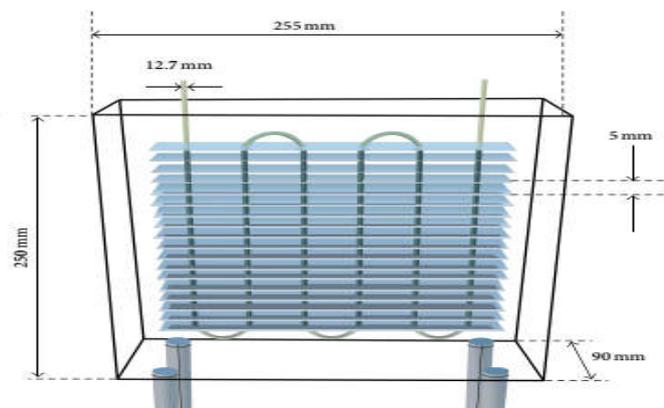


**Fig. 12- Trois configurations expérimentales, un système de contrôle sans amélioration du transfert de chaleur et des systèmes augmentés d'ailettes circulaires et longitudinales.**



**Fig. 13 - Comparaison de profil de température moyen dans le MCP des systèmes mis à l'amende circulaires et longitudinaux avec le système de contrôle pour le fait de charger et déchargement des processus.**

**Rahimi et al.** [19] ont étudié expérimentalement les processus de fusion et de solidification du paraffine RT35 en tant que MCP dans un échangeur de chaleur tubes-ailettes et ont comparé les résultats avec ceux de l'échangeur sans fil. Par conséquent, l'effet de l'utilisation d'ailettes dans cette étude ainsi que certains paramètres opérationnels sont pris en compte.



**Fig. 14- Vue schématique de la section d'essai de l'échangeur de chaleur à tubes à ailettes.**

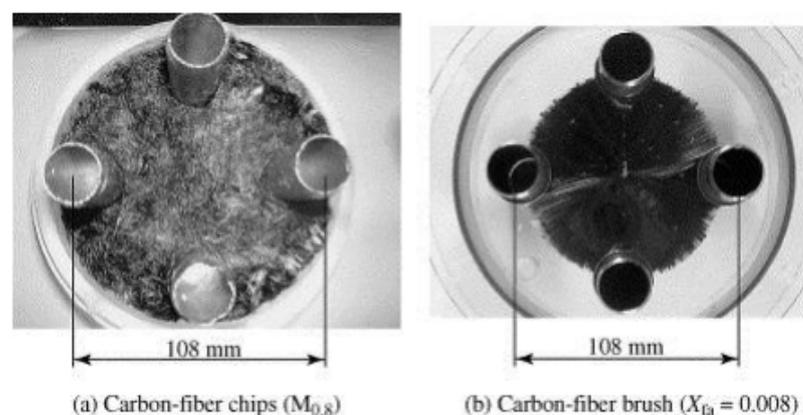
Ce modèle a montré que pour l'échangeur de chaleur à tube sans ailettes, l'augmentation de la température d'entrée du caloporteur entraîne une réduction plus rapide du temps de fusion par

rapport à un échangeur de chaleur à tubes-ailettes similaires. De même, pour l'échangeur de chaleur tubulaire sans fin, le temps de solidification est plus influencé par le débit que celui à ailettes.

**Ezan et al [20]** ont étudié expérimentalement les périodes de charge et de décharge d'eau dans un système tubulaire. Ils ont étudié l'effet du débit, de la température d'entrée, de la conductivité thermique du tube et du diamètre de la coque sur la capacité de stockage du système. Les résultats indiquent que, pour les processus de fusion et de solidification, la convection naturelle devient le mécanisme dominant de transfert de chaleur après une courte période de conduction thermique et que la température d'entrée du caloporteur est plus efficace sur l'énergie rejetée que sur le débit. pour les paramètres sélectionnés.

**Mettawee et Assassa [21]** ont étudié expérimentalement l'amélioration de la performance du collecteur solaire à base de MCP en raison de la dispersion des particules de micro-aluminium. Les résultats indiquent que le temps de chargement a été réduit de 60% par rapport au MCP pur. L'effet a été plus prononcé pendant la décharge, car la solidification dominée par la conduction présentait un processus plus homogène.

**Y. Hamada et al [22]** a comparé l'effet de l'ajout de deux structures en carbone dans du matériau à changement de phase. La Fig.15. représenté deux part de structure avec fibres de carbone la premier part, une brosse organisée autour des tubes verticaux d'un échangeur et d'autre part, des fibres disposées en vrac dans le réservoir. Dans le cas des brosses de carbone la Fig.15.b, les tubes sont insérés après la structure et entrés en force dans le carbone garantissant un bon contact thermique.

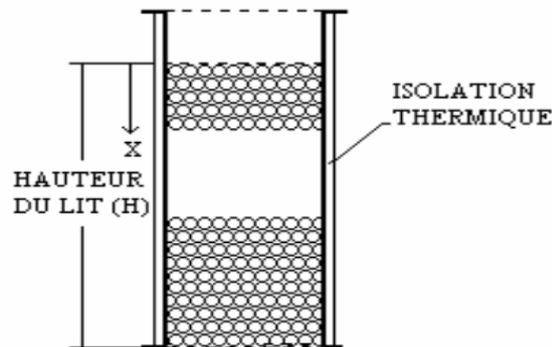


**Fig. 15-Structures avec fibres de carbone dispersées entre des tubes verticaux (a) ou organisées (b)[22]**

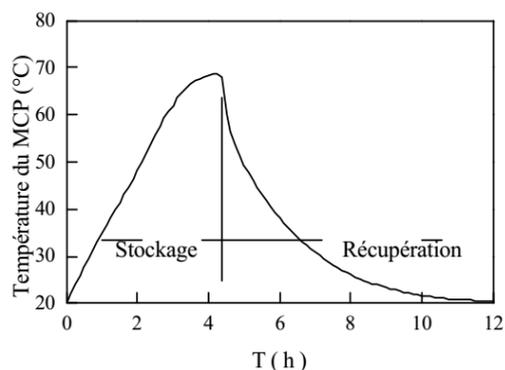
Les fibres de carbone en vrac présentent une conductivité effective plus élevée que les fibres de carbone organisées. Par exemple, pour 1% volumique de structure métallique, le rapport entre la conductivité thermique effective de la structure et la conductivité du MCP  $\lambda_{eff}/\lambda_{MCP}$  est de 3.3 pour les brosses de carbones contre 3.7 pour les fibres de carbone. Cependant, en utilisant les fibres de carbone en vrac, une résistance thermique est créée près de la surface

d'échange, étant donné le mauvais contact avec les tubes, ce qui diminue les performances de transfert. Le coefficient d'échange global est en effet de  $340 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$  pour les brosses de carbone contre  $150 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$  pour les fibres de carbonés. L'échange est ainsi deux fois moins bon, malgré une conductivité thermique effective plus élevée.

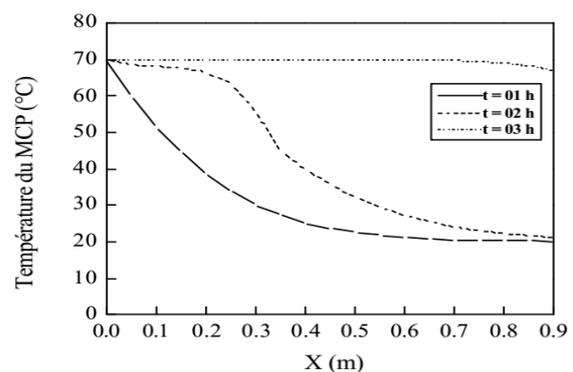
**Benmansour et Hamdan** [23] ont présenté une étude numérique du stockage de l'énergie thermique par chaleur latente à basses températures ( $0^\circ\text{C}$  à  $100^\circ\text{C}$ ) dans un lit cylindrique rempli de sphères uniformes, disposées au hasard et contenant chacune un matériau à changement de phase (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. 16-** Schéma du lit de stockage



**Fig. 17-** Evolution de la température moyenne du lit en fonction du temps au cours d'un cycle (stockage et déstockage).



**Fig. 18-** Distribution de la température dans le lit pour une température de l'air à l'entrée constante, durant le stockage.

**GUERRAICHE et BOUGRIOU** [24] ont étudié le processus de transfert de chaleur lors de la solidification d'un matériau de changement de phase (MCP) dans un cylindre vertical.

Les matériaux utilisés sont la cire de paraffine et l'erythrol qui sont commercialisés pour l'utilisation dans les systèmes de stockage d'énergie thermique.

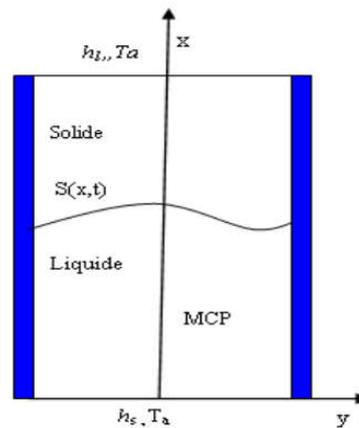


Fig. 19- Géométrie du problème

Les fig. 20 et 21 montrent l'évolution de la température en fonction du temps. On constate que le refroidissement de l'Erythrol se fait d'une façon plus rapide que dans le Paraffine. Ce qui montre l'effet de la conductivité thermique et la chaleur latente, qui sont des valeurs significatives dans le cas l'Erythrol.

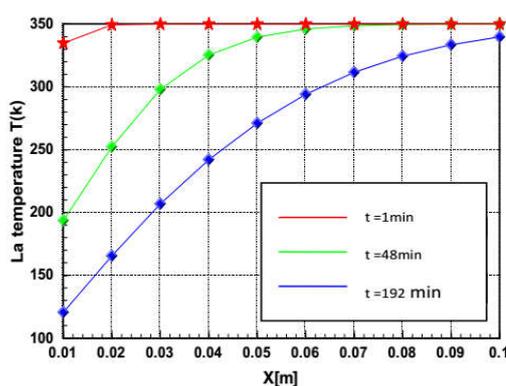


Fig. 20- variation de la température [Paraffine]

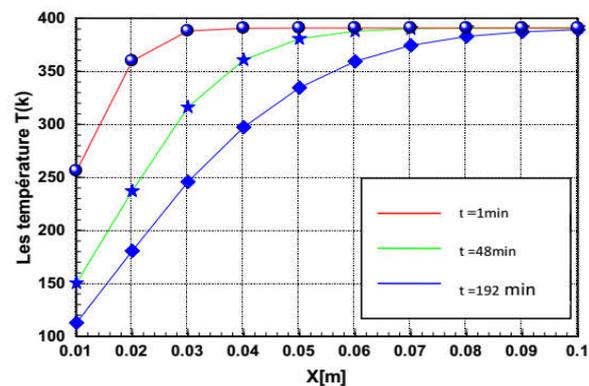


Fig. 21- Variation de la température Erythrol

Younsi [25] a étudié l'intégration des éléments de MCP dans des parois de murs solaires passifs. L'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) en vue du stockage de chaleur dans les bâtiments a été l'une des premières applications pour ces matériaux. En vue de la réalisation de cet objectif, une étude sur le comportement complexe du matériau doit être effectuée. La modélisation du processus de fusion d'un matériau à changement de phase MCP27 (sels hydratés). La formulation enthalpique est utilisée pour les simulations numériques effectuées en 1D et en 2D. Il s'agira à terme d'introduire ce modèle dans un outil plus global de simulation de composants solaires. On peut constater sur la Fig 23, que la solution numérique 1D obtenue avec notre code de calcul FVM sur un bloc de longueur 0,2 m, est toujours en excellent accord avec la solution analytique. De plus, on peut observer que tout au long des calculs, l'erreur sur la position de l'interface demeure très petite et qu'elle ne s'accroît pas. L'erreur relative au temps final est très petite (de l'ordre de 1,9%).

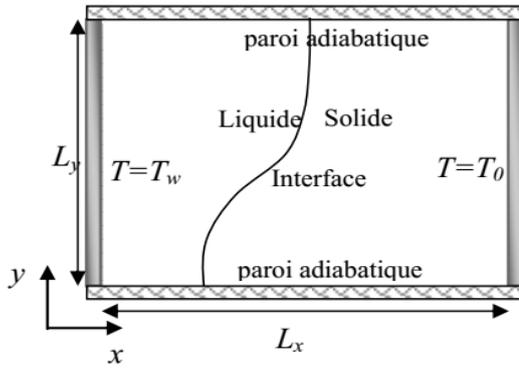


Fig. 22- schéma du problème

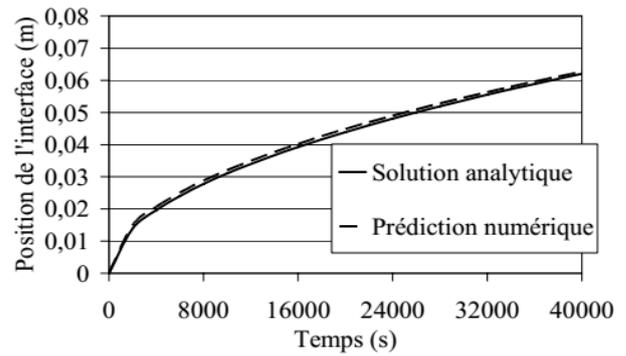


Fig. 23- Positions numérique et analytique de L'interface

**J.P. Bédécarrats et al** [26] ont présenté une étude expérimentalement du stockage de l'énergie thermique dans un réservoir rempli de capsules sphériques, contenant l'eau avec un agent de nucléation en tant que matériau à changement de phase (MCP), les performances d'un changement de phase encapsulé de stockage d'énergie pendant les processus de charge et de décharge. La chaleur le fluide de transfert qui circule à travers le réservoir et autour des capsules est une solution aqueuse de mono éthylène glycol.

Les résultats montrent une influence significative du phénomène de surfusion pendant le processus de charge.

Plus la température du liquide de refroidissement d'entrée est basse et plus le débit du liquide de refroidissement est important, plus le stockage est. Le choix des couples (débit, température d'entrée) doit permettre de stocker la totale énergie dans un temps donné.

Lorsqu'un mode de charge suit un mode de décharge incomplet, le mode de charge est le résultat de la cristallisation de certaines capsules qui présentent une surfusion et d'autres qui n'en font pas. La conséquence est que le mode de charge est effectué à une température plus élevée avec une durée relativement plus courte.

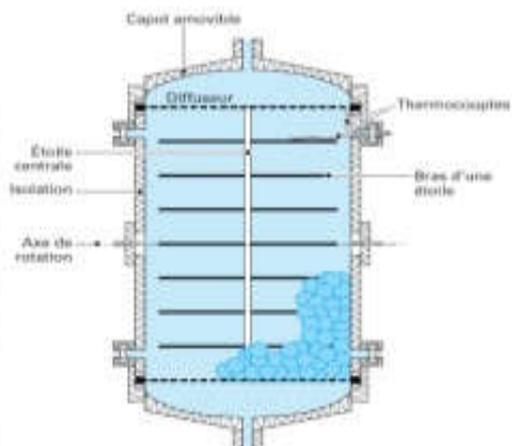


Fig. 24- Vue du prototype expérimental et schéma du réservoir de stockage [27]

## **Conclusion**

Le stockage de l'énergie thermique par chaleur latente est un sujet très important, si on observe le nombre important de publications présentées dans ce chapitre. Plusieurs configurations géométriques dans lesquelles les MCP sont contenus dans des plaques (enceinte rectangulaire, mur...etc.), dans des tubes annulaires ou dans des capsules sphériques.

La plupart de ces travaux montre une comparaison entre les prédictions numériques et les données expérimentales.

Dans le stockage par chaleur latente, l'énergie est stockée/déstockée en fonction du changement d'état du matériau de stockage (fusion ou solidification). L'énergie stockée dépend alors de la chaleur latente et de la masse du matériau à changement de phase. La performance des systèmes de stockage par chaleur latente est limitée par la faible conductivité thermique des MCP utilisés.

Pour optimiser les performances de système de stockage d'énergie par chaleur latente l'addition on utilise souvent des microcapsules sphériques qui permettent aux MCP de changer facilement de phase sur l'ensemble de leur volume. Ou à mettre au cœur du MCP un matériau ayant une bonne conductivité (graphite, maille de fer, fil de fer, ...etc.).

# Théorie Générale sur le stockage thermique et les Matériaux à changement de phase

## Introduction

Le stockage de l'énergie consiste à préserver une quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure. Par extension, l'expression désigne également le stockage de matière contenant l'énergie. [28]

Un des principaux problèmes de l'énergie solaire est son intermittence induite par les cycles jour/nuit ou la nébulosité. De plus, l'intensité de l'énergie émise par le soleil varie temporellement à 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 dimensionnement du champ solaire est alors le résultat d'un compromis entre le coût des installations et leur capacité pour pouvoir produire de l'énergie sur la plus large gamme d'irradiation possible. Dans le cadre d'une configuration centrale électro-solaire autonome, cela entraîne une surproduction d'énergie qui est généralement sacrifiée en dé focalisant une partie des réflecteurs.

Le stockage d'énergie propose une solution aux problèmes d'intermittence et de surproduction en découplant, de manière totale ou partielle, la production de chaleur et la production d'électricité, permettant ainsi d'adapter cette dernière à la demande du réseau.

### 2.1 Le stockage d'énergie thermique

L'énergie doit être stockée pour qu'elle puisse être disponible à tout moment. Les matériaux sont capables d'accumuler de l'énergie et de la restituer plus tard [29]

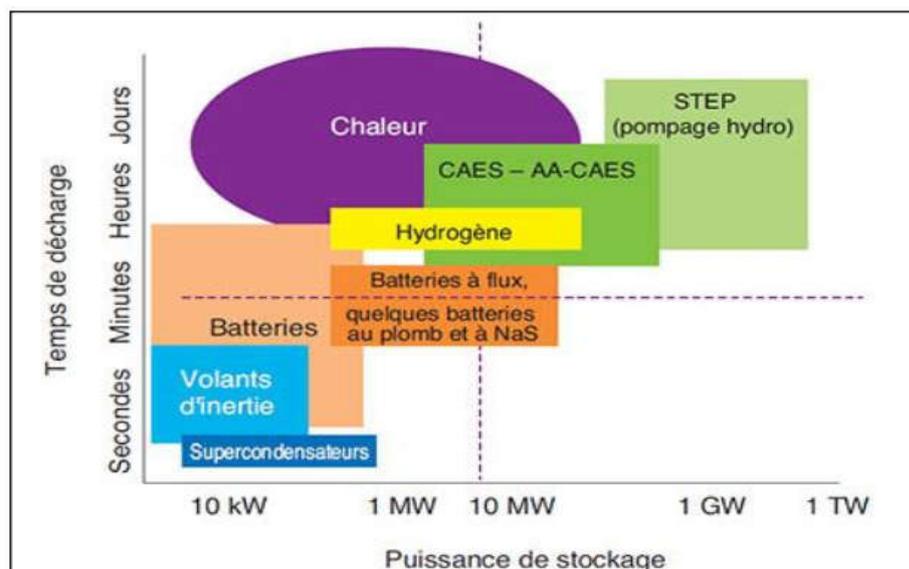


Fig. 25– Les différents systèmes de stockage de l'énergie[29]

Les différents systèmes adaptés au stockage (Fig. 25) devront stocker le sur plus d'énergie (phase de charge) et la produire au bon moment (phase de décharge). Le stockage de l'énergie peut se faire par une simple variation de température (stockage à chaleur sensible), par un

changement de phase (stockage à chaleur latente), par une transformation physique (adsorption) ou une réaction chimique (stockage thermochimique) C'est le type de transformation de matériaux qui désigne le mode de stockage de l'énergie. A noter que ces systèmes doivent aussi répondre à des problèmes de non-toxicité et d'excellente tenue dans le temps.

Le chauffage et la climatisation représentent près de 50 % de la consommation énergétique en Europe. Les sources de chaleur proviennent essentiellement du soleil et de la chaleur produite par certaines industries. L'énergie thermique peut être stockée suite à l'élévation de température qui modifie l'énergie interne du matériau. Les techniques de stockage de l'énergie thermique sont illustrées sur la Fig. 26.

Les deux voies principales de stockage thermique sont le stockage par la chaleur sensible et le stockage par chaleur latente. La sélection est fonction de la durée de stockage et de la température désirée. L'inertie thermique et la capacité à supporter de très hautes températures présentent des facteurs indispensables pour les matériaux de stockage de l'énergie.[29]

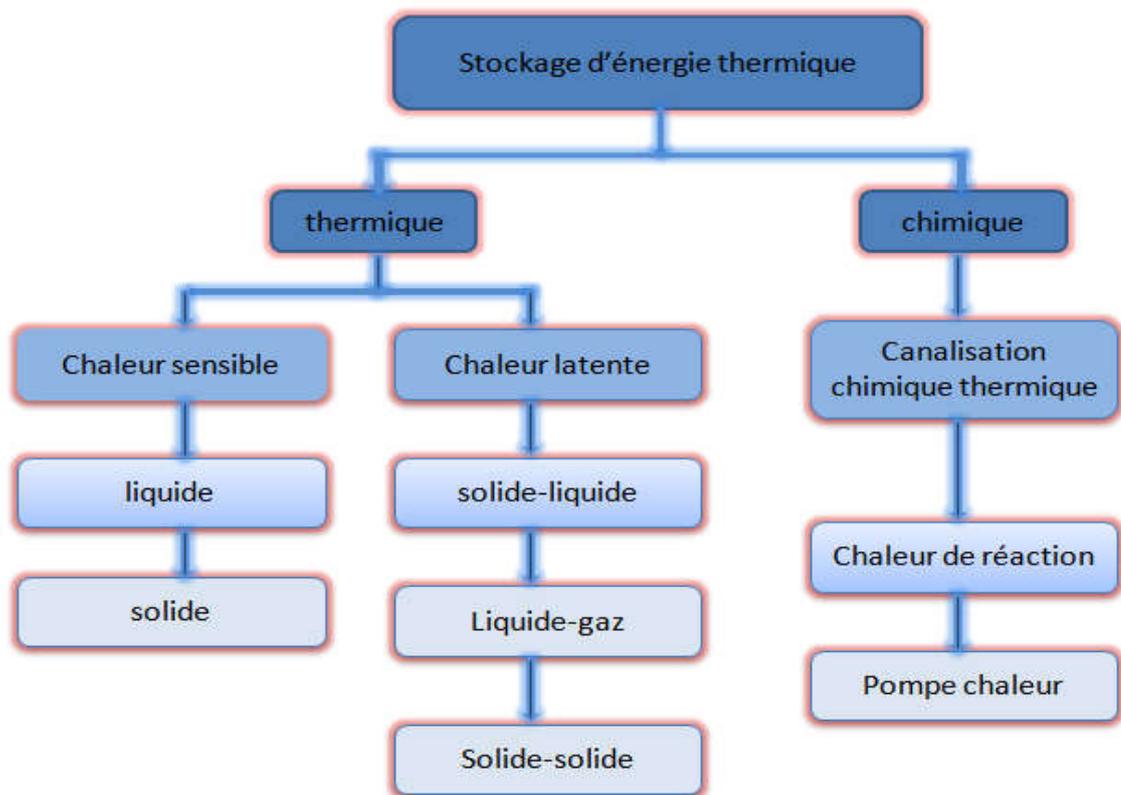


Fig. 26– Les différentes techniques de stockage de l'énergie thermique [29]

### 2.1.1 Le stockage par chaleur sensible

Dans une unité de stockage de chaleur sensible, de l'énergie thermique est stocké par modification de la température du support de stockage, qui peut être un liquide ou un solide. La quantité d'énergie stockée dans l'unité dépend de la capacité calorifique du fluide, des changements

de température et de la quantité du matériau de stockage. Ainsi, il est souhaitable que le support

de stockage ait une grande capacité thermique spécifique, stabilité à long terme sous le cycle thermique, la compatibilité avec son enceinte de confinement et, surtout, à faible coût. Le stockage de chaleur sensible peut être classé sur la base du support de stockage de chaleur que le stockage de milieux liquides tels que l'eau, les fluides à base d'huile, sel fondu, etc., ou solide et le stockage des supports comme des pierres, des métaux et d'autres. [30]

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m C_P dT = m C_{ap} (T_f - T_i) \quad (2.1)$$

### 2.1.2 Principe de stockage par chaleur latente

#### Généralités

Comme le stockage par chaleur latente permet de stocker une grande densité d'énergie, ce type de stockage est une technique attractive. De plus, il permet de stocker la chaleur sous la forme de chaleur latente de fusion à une température constante, cette température correspondant à la température de la transition de phase.

Pour donner des ordres de grandeur, l'énergie demandée pour fondre 1 kg de glace est 80 fois l'énergie demandée pour augmenter la température de 1 kg d'eau de 1°C, autrement dit et pour chiffrer l'énergie nécessaire, alors que l'on a besoin d'une énergie de 4,2 kJ pour diminuer la température de 1 kg d'eau d'une température de 1 °C à 0°C, il faut 335 kJ pour compléter sa solidification en glace à  $T = 0^\circ\text{C}$ . Une autre image en est donnée Fig. 27.[31]

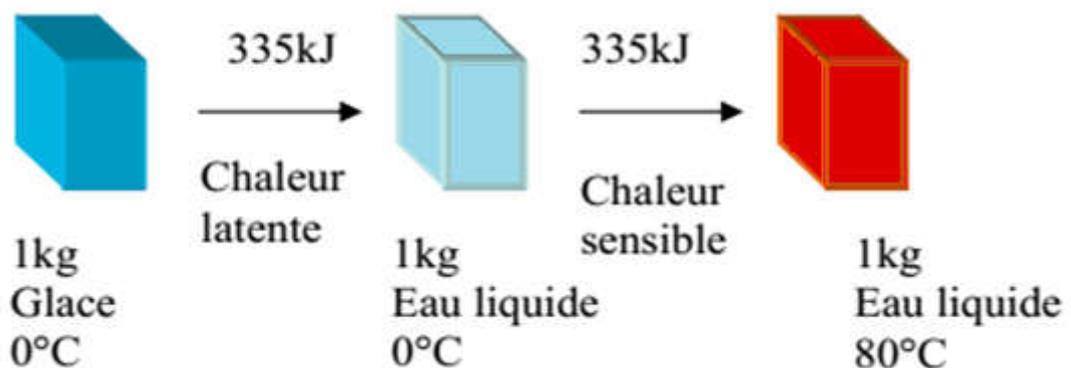


Fig. 27– Equivalence entre la chaleur latente nécessaire pour fondre 1 kg de glace et la chaleur sensible nécessaire pour chauffer l'eau liquide.[31]

#### On remarque donc que:

(i) - La chaleur latente est beaucoup plus importante que la chaleur sensible (pour un écart de température pas trop important).

(ii) - Les points de fusion dépendent des corps utilisés; ce critère permet d'utiliser des matériaux différents en fonction des températures souhaitées. Ces matériaux sont les Matériaux à Changement de Phase (MCP).

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

$$Q = m (h_f - h_i) = m \Delta h_f \quad (\text{J}) \quad (2.2)$$

Où  $\Delta h_f$  est l'enthalpie spécifique de fusion.

Généralement, il faut porter le matériau initialement à  $T_i$  à sa température de fusion  $T_F$  et l'on écrit :

$$Q = m (h_f - h_i) = m \cdot c_p \cdot (T_F - T_i) + m \Delta h_f \quad (J) \quad (2.3)$$

Dans le cas d'un corps pur on trouve une courbe de variation des températures analogue à celle présentée fig.28. Pendant le chauffage du matériau avant sa température de fusion, on observe une variation linéaire de la température en fonction du temps tandis que pendant le changement d'état la température reste constante.[31]

Si  $T_f$  est la température de changement de phase d'un corps pur qui passe de la température  $T_1$  à la température  $T_2$ , avec  $T_1 \leq T_f \leq T_2$  alors l'énergie stockée lors de cette transformation est :

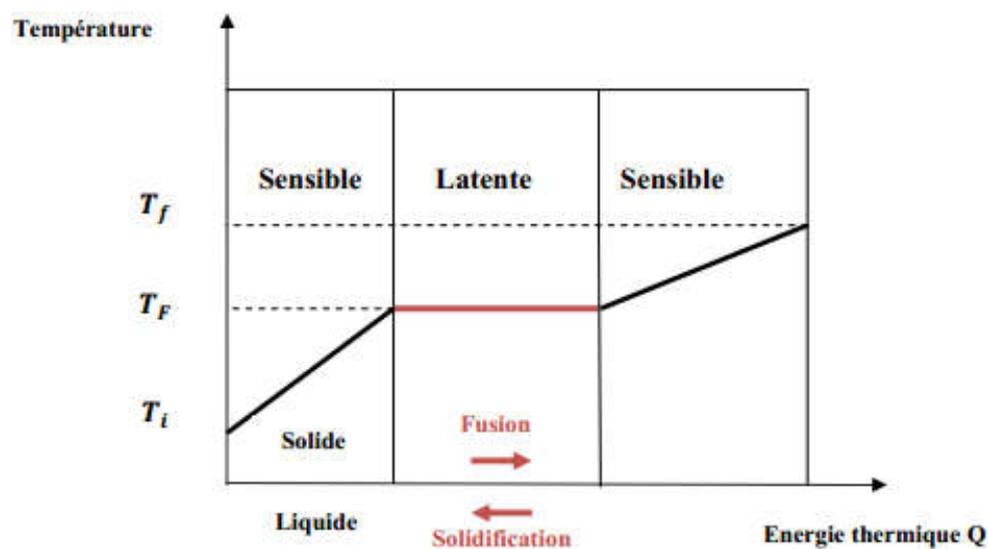
$$\Delta H = \int_{T_i}^{T_f} m \times C_S(T) dT + m \times L + \int_{T_f}^{T_2} m \times C_L(T) dT \quad (2.4)$$

$C_S(T)$  : chaleur spécifique du corps a l'état solide

$C_L(T)$  : chaleur spécifique du corps a l'état liquide

$L$ : chaleur latente de changement de phase

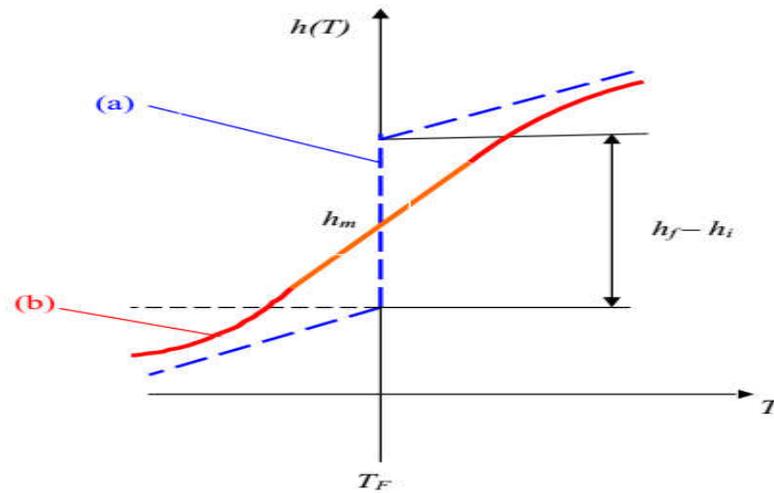
On retrouve dans l'équation (2.4) deux termes de chaleur sensible en plus du terme  $mL$  représentant la chaleur latente due a la masse  $m$ .[32]



**Fig. 28– évolution de température d'un corps pur homogène avec changement d'état[32]**

Si l'on représente l'enthalpie spécifique en fonction de la température, on obtient donc la courbe (a) de la Fig. 29. On remarque la discontinuité due au changement d'état (pas de variation de température).

Dans le cas d'un mélange (alliage,...), la variation d'enthalpie ne présente plus de discontinuité (courbe (b) Fig. 29 sauf dans le cas où l'on a formation d'un composé défini avec fusion (ou solidification) [32]



**Fig. 29-Variation de l'enthalpie spécifique en fonction de la température : (a) pour un corps pur ; (b) pour un mélange.[32]**

En résumé, les avantages de la chaleur latente sont donc:

- des densités importantes de stockage,
- une température de changement de phase (cristallisation et fusion) quasiment constante pour les corps purs ou les composés définis. [32]

### 2.1.3. Stockage Thermochimique

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

Dans ce système, la capacité de stockage de chaleur est généralement élevée parce qu'une énergie chimique élevée se produit au cours de la rupture et de la recombinaison des liaisons moléculaires dans une réaction chimique réversible. Le stockage d'énergie thermochimique peut être effectué à l'aide de caloduc chimique ou d'une pompe à chaleur chimique. Ce système est plus compliqué que le stockage de la chaleur sensible et latente.

Pour ce système, la réaction chimique doit être réversible et les composés chimiques utilisés doivent être inoffensifs et non corrosifs [30]

## 2.2 Comparaison des différents types de stockage d'énergie thermique

Le tableau 1 répertorie les caractéristiques des trois systèmes de stockage d'énergie thermique présentés. Six paramètres fondamentaux ont été choisis : la densité énergétique, la température de stockage, la durée de stockage, le transport de l'énergie, la maturité du système et la complexité de mise en œuvre du système. [33]

Tableau 1- Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur .[33]

|                                | Stockage par chaleur sensible               | Stockage par chaleur latente              | Stockage par voie thermochimique                         |
|--------------------------------|---|---|--|
| <b>volumétrique</b>            | Faible~15-60<br>KWh .m <sup>-3</sup>        | Moyenne~50-100 KWh .m <sup>-3</sup>       | Elevée ~100-500 KWh .m <sup>-3</sup>                     |
| <b>Densité énergétique</b>     |   |   |  |
| <b>Massique</b>                | Faible ~0.02- 0.03<br>KWh .Kg <sup>-1</sup> | Moyenne~0.05-0.1 KWh<br>.Kg <sup>-1</sup> | Haute~0.5-1 KWh .Kg <sup>-1</sup>                        |
| <b>Température de stockage</b> | Température de l'étape de charge            | Température de l'étape de charge          | Température de l'étape de charge ou Température ambiante |
| <b>Durée de stockage</b>       | Limitée(pertes thermiques)                  | Limitée(pertes thermiques)                | Théoriquement illimitée                                  |
| <b>Transport de l'énergie</b>  | Faible distance                             | Faible distance                           | Distance théoriquement illimitée(Kato& al ,2006)         |
| <b>Maturité</b>                | Echelle industrielle (20MW <sub>c</sub> )   | Echelle pilote (100KW <sub>th</sub> )     | Echelle laboratoire (15KW <sub>t</sub> )                 |
| <b>Technologie</b>             | Simple                                      | Moyenne                                   | Complexe   |

### 2.3 Les matériaux à changements de phase (MCP)

Les matériaux à changements de phase (MCP) sont des composés qui stockent et libèrent de la chaleur latente lors d'une transformation de phase (solide-liquide) à température constante. Leur principe de fonctionnement est simple et est illustré par la Fig. 30. Comme pour la transformation de la glace en eau qui se produit lorsque la température dépasse les °C, les matériaux à changements de phase changent d'état (solide-liquide) en fonction de leur température de fusion.[34]

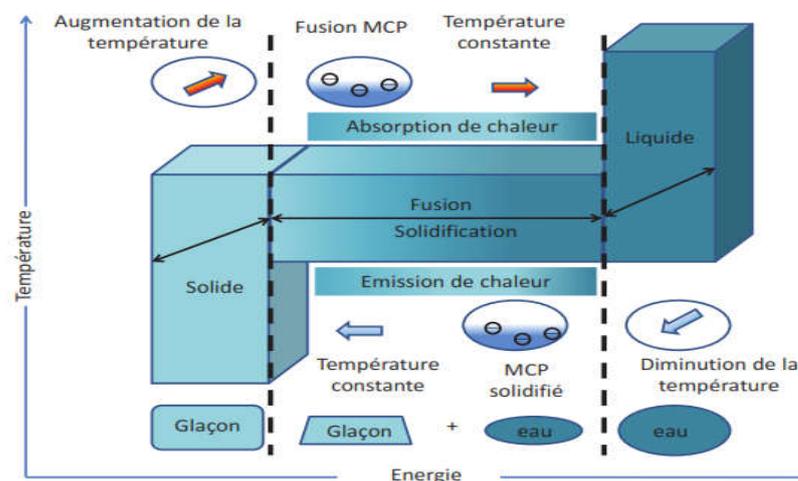


Fig. 30–Principe de fonctionnement des matériaux à changements de phase.[34]

Dans les bâtiments, il s'agit du même principe. Dès que la température du matériau à changement de phase atteint sa température de fusion, il commence à fondre et va absorber une partie de l'énergie qui l'entoure afin de la stocker en grande quantité et, dès que la température devient inférieure, l'énergie stockée est restituée. Cette transition de phase est facilitée par l'augmentation de la surface d'échange entre le MCP et l'air ambiant. Généralement, il est intégré au sein des constituants d'une paroi pour faire diminuer les pics de température d'une pièce et de limiter l'utilisation de systèmes coûteux en énergie. Le MCP peut être couplé avec un système de ventilation nocturne où à une climatisation de dimensionnement réduite, pour qu'il puisse se générer plus efficacement (décharge de l'énergie). [34]

#### 2.4 Classification des grandes familles de Matériaux à changement de phase

Nous présentons ci-dessous une représentation schématique des différentes grandes familles de matériau à changement de phase susceptibles, pour une partie d'entre elles, de nous intéresser pour la production de froid ( $-40^{\circ}\text{C}$  à  $+20^{\circ}\text{C}$ ), voir Fig. 31.[35]

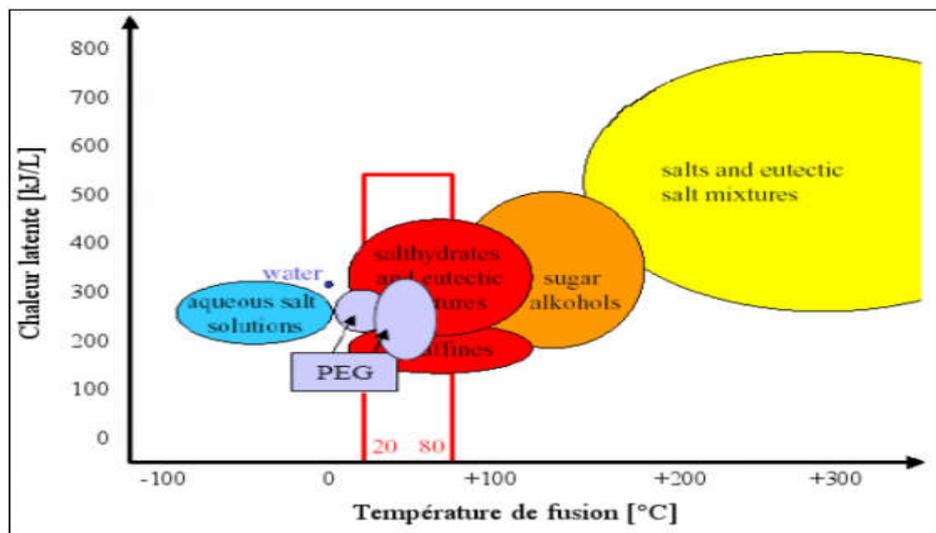


Fig. 31–Classification des grandes familles de MCP suivant leur chaleur latente et leur température de fusion. [35]

Par conséquent, un système de stockage d'énergie thermique latente doit comprendre les trois Composants:

- Un PCM approprié avec son point de fusion dans la plage de température souhaitée.
- Un échangeur de chaleur approprié
- Un conteneur adapté compatible avec le MCP

#### 2.5 Critères de choix d'un matériau à changement de phase

Le choix d'un MCP doit être fait selon plusieurs critères. Les principaux pour le stockage de l'énergie thermique sous forme de chaleur latente sont :[34]

##### 2.5.1 Propriétés thermiques

- La température de transition de phase doit être conforme au domaine d'application.

- Une chaleur latente de transition élevée.
- Une bonne qualité de transfert de chaleur. Par exemple, une conductivité thermique élevée faciliterait la charge et la décharge du stockage de l'énergie.[34]

### **2.5.2 Propriétés physiques**

• Une densité importante du corps permettra un volume de stockage très faible et donc un réservoir de stockage petit. Durant le processus du changement de phase, il faudra étudier la variation de la densité (exemple : les MCP aqueux).

• Pour réduire les contraintes mécaniques dans le conteneur, la tension en vapeur doit être minimale et l'expansion volumique petite.

- Une stabilité des phases favorable pour le stockage et le déstockage de la chaleur.[34]

### **2.5.3 Propriétés cinétiques**

• La surfusion doit être réduite. Le recours à l'utilisation d'additif est nécessaire.

- Un taux de cristallisation important[34]

### **2.5.4 Propriétés chimiques**

• Une stabilité chimique à long terme des cycles de fusion/solidification.

• La compatibilité avec les matériaux de construction.

• L'étude de la dangerosité du produit (toxicité, inflammabilité, explosion,...) passant par les réglementations et normalisations en vigueur. La dangerosité du produit doit être minimisée.

- Recyclable.[34]

### **2.5.5 Aspects économiques**

• Le coût est un critère également très important. Celui-ci sera différent selon les utilisations. Par exemple, les utilisations domestiques demandent quelques kilogrammes alors que les utilisations industrielles quelques tonnes.

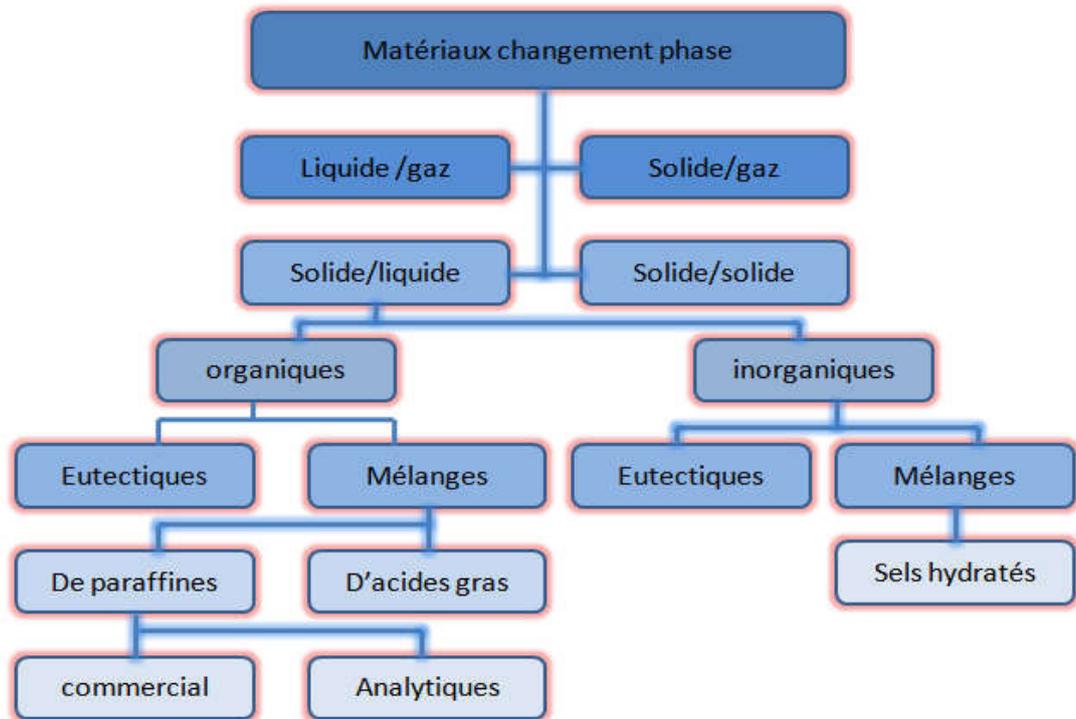
- Disponible en grande quantité. [34]

### **2.5.6 Critères technologiques**

• La fiabilité des matériels de confinement passe par une compatibilité avec les matériaux du conteneur. En respectant l'ensemble de ces critères, l'étude menée jusqu'à présent et selon la thématique de notre cadre de travail, permet d'opter pour les matériaux à changement de phase solide/liquide. Généralement, la classe des MCP qui est utilisée est organique. En effet, les principaux travaux réalisés dans le secteur du bâtiment utilisent la cire de paraffine.[34]

## 2.6 Classification des MCP

Abhat a établi, en 1983, la classification des matériaux utilisés pour le stockage thermique de l'énergie. Cette classification faisant office de référence dans le domaine est développée dans la Fig. 32 pour le stockage thermique par chaleur latente solide/liquide.[36]



**Fig. 32– organigramme de classification des MCP solide/liquide [36]**

On distingue trois grandes familles de MCP : les composés organiques, les composés inorganiques et les mélanges eutectiques. En général, les composés organiques possèdent une capacité volumique de stockage par chaleur latente de 125 à 200 kJ/dm<sup>3</sup>, alors que les composés inorganiques, du fait de leur forte densité, ont une capacité volumique de stockage presque 2 fois supérieure : de 250 à 400 kJ/dm<sup>3</sup>.

Chacune de ces familles peut être décomposée en sous-groupes, dont les comportements physiques et chimiques très différents influent sur la conception du système de stockage.[27]

### 2.6.1 Les matériaux organiques

#### 2.6.1.1 Les paraffine

Les paraffines sont, de façon générale, des substances à l'aspect cireux, aux propriétés très similaires. D'un point de vue chimique, elles font partie de la famille des alcanes, ces molécules linéaires d'hydrocarbures saturés à chaîne droite, de formule brute C<sub>n</sub>H<sub>n+2</sub> et de formule semi-développée CH<sub>3</sub>-(CH<sub>2</sub>)<sub>n</sub>-CH<sub>3</sub>. Lorsqu'elles contiennent entre 14 et 40 atomes de carbone, elles peuvent être nommées paraffines et utilisées comme MCP dont le point de fusion varie entre 6 et 80°C. Plus la chaîne n'est longue, n plus la température de fusion et la chaleur latente sont élevées.

Les paraffines sont inertes vis-à-vis de la plupart des autres matériaux quoique modérément inflammables et stables en température, sûres et non-corrosives. Elles possèdent généralement une fusion congruente et ne présentent pas ou peu de surfusion. Elles ont toutefois une conductivité thermique plutôt faible, notamment à l'état solide et peuvent présenter des variations de volume de  $\pm 15\%$  lors du changement de phase. Un bon conditionnement permet de s'affranchir de ces inconvénients mineurs .[27]



Fig. 33– MCP organique (cire de paraffine)[28]

### 2.6.1.2 Les non-paraffines

Les matériaux organiques non-paraffines constituent la plus grande gamme de MCP, avec des propriétés très diverses. De nombreux auteurs tels que LANE [37], ABHAT [38] ou BUDDHI et SAWHNEY [39] ont mené de vastes recherches sur les matériaux organiques et identifié un bon nombre d'esters, d'acides gras ou carboxyliques, d'hydrocarbures aromatiques, d'oses, d'alcools ou polyols, adaptés au stockage de l'énergie thermique.

Ces matériaux possèdent généralement une chaleur latente de fusion adéquate, mais sont inflammables et ont un point éclair assez bas. Ils sont généralement instables à hautes températures et présentent un niveau de toxicité variable. [27]

Tableau 2- Caractéristiques de quelques MCP organiques[1]

| Type de substance     | Composé                                    | de fusion (°C)<br>Température | $\Delta H_{fusion}$ (kJ/kg) | Conductivité thermique (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ) | Densité (kg.m <sup>-3</sup> )      |
|-----------------------|--|-------------------------------|-----------------------------|--|------------------------------------|
| Substances organiques | Paraffine C21-C50                          | 66-68                         | 189                         | 0.21 sol   | 0.830 liq, 70°C<br>0.930 sol, 20°C |
|                       | Naphtalène                                 | 80                            | 147.7                       | 0.132 liq, 83.8°C<br>0.341 sol,<br>49.9°C                    | 976 liq, 84°C<br>1145 sol, 20°C    |
| Eutectique organique  | 67.1% Naphtalène<br>+32.9% Acide benzoïque | 67                            | 123.4                       | 0.130 liq, 100°C<br>0.282 sol, 38°C                          | n.d.                               |
| Acides gras           | Acide caprique                             | 32                            | 152.7                       | 0.153 liq,<br>38.5°C   | 878 liq, 45°C<br>1004 sol, 24°C    |
|                       | Acide stéarique                            | 69                            | 202.5                       | 0.172 liq, 70°C  | 848 liq, 100°C<br>965 sol, 24°C    |

liq: liquid / sol : solide / n.d. : non disponible.

## 2.6.2 Les matériaux inorganiques

### 2.6.2.1 Les sels hydratés

Les sels hydrates, caractérisés par une formule de type  $M.nH_2O$  où M est un composé ionique salin inorganique, ont été étudiés en tant que MCP pour le stockage de l'énergie thermique depuis 1947, par TELKES [38]. De par leur densité, ils possèdent en général une importante chaleur latente volumique et couvrent une large gamme de températures de fusion. Au regard des autres MCP, ils possèdent de bonnes chaleurs spécifiques ( $> 1,5 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$  en phase solide, entre 2 et  $4 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$  en phase liquide) et leurs variations de volume excèdent rarement  $\pm 15\%$ . [27]

Beaucoup d'entre eux présentent une fusion incongrue. Lorsque le sel n'est pas entièrement soluble dans son eau d'hydratation à la température de fusion, un phénomène de décomposition apparaît, entraînant la formation d'une phase aqueuse saturée et d'une nouvelle phase solide, généralement un hydrate du même sel d'ordre inférieur. De la différence de densité entre les deux phases peut résulter une ségrégation macroscopique difficilement réversible, car lors du refroidissement la phase solide ne se recombine pas toujours avec la solution saturée pour reformer le sel hydrate initial. [27]

Ces MCP présentent aussi un certain degré de surfusion, qui doit être corrigé par l'ajout de matériaux énucléant pour amorcer la cristallisation et ont tendance à être corrosifs pour les conteneurs métalliques. [27]

### 2.6.2.2 Les métaux

Les métaux, bien connus comme caloporteurs, ont été moins étudiés en tant que MCP. Pourtant lorsque le volume du stockage entre en considération, ils sont de bons candidats, compte tenu de leur haute densité. Les métaux ont surtout une bonne conductivité thermique, une chaleur spécifique relativement faible et une faible tension de vapeur.

L'utilisation des métaux comme MCP pose une série de problèmes d'ingénierie inhabituels, notamment pour leur conditionnement. La température de fusion de la plupart d'entre eux étant très élevée, ils sont souvent utilisés sous forme de mélanges eutectiques. [27]

**Tableau 3- Caractéristiques de quelques MCP inorganiques [1]**

| Type de substance  | Composé   | Température de fusion (°C) | $\Delta H_{fusion}$ (kJ/kg) | Conductivité thermique (W.m-1.K-1)  | Densité (kg.m <sup>-3</sup> )      |
|--|---|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| <b>Substances inorganiques</b>                           | H <sub>2</sub> O  | 0                          | 333                         | 0.612 liq, 20°C                     | 998 liq, 20°C<br>917 sol, 0°C      |
|  | CaCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O  | 29                         | 190.8                       | 0.540liq, 38.7°C<br>1.088 sol, 23°C | 1562 liq, 32°C<br>1802 sol, 24°C   |
|  | Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O                                      | 89                         | 162.8                       | 0.490liq,95°C<br>0.611 sol, 37°C    | 1550 liq, 94°C<br>1636 sol, 25°C   |
|  | MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O  | 117                        | 168.6                       | 0.570liq, 120°C<br>0.694 sol, 90°C  | 1450 liq, 120 °C<br>1569 sol, 20°C |
| <b>Eutectique inorganique</b>                            | 58.7%Mg(NO <sub>3</sub> ).6 H <sub>2</sub> O + 41.3% MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O | 59                         | 132.2                       | 0.565liq,85°C<br>0.678 sol, 38°C    | 1550 liq, 50°C<br>1630 sol, 24°C   |
| <b>Mélange non eutectique de substances inorganiques</b> | 50%Na(CH <sub>3</sub> COO).3H <sub>2</sub> O+<br>50%HCONH <sub>2</sub>                    | 40.5                       | 255                         | n.d.                                | n.d.                               |

### 2.6.3 Les eutectiques

Les MCP eutectiques sont des substances composées de plusieurs MCP purs. En général, ce sont des mélanges de MCP organiques et inorganiques (organique-organique, organique inorganique, inorganique-inorganique). Ils ont deux principaux avantages ; ils ont un point de fusion net similaire à une substance pure et leurs chaleurs latentes volumétriques sont légèrement supérieures à celle des composés organiques purs. Leurs deux principaux inconvénients sont que l'on a peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux et ils sont peu utilisés au niveau des systèmes industriels. [40]

### 2.6.4 les MCP « commerciaux »

Au début des années 90 seules quelques compagnies, principalement basées aux états unis commercialisaient des produits de stockage de chaleur tels que les sels hydratés et les paraffines. De nos jours il existe plusieurs compagnies dans le marché des matériaux de changement de phase telles que Cristopia (en France), TEAP Energy (en Australie), Rubitherm GmbH (en Allemagne), EPS Ltd. (en Angleterre), PCM Thermal solution (aux Etats unis), Climator (en Suède) etc..... [41]

Tableau 4- Caractéristiques de quelques MCP commerciaux [1]

| Nom du MCP  | Type de produit | Température de fusion °C) | Enthalpie de fusion (kJ.kg <sup>-1</sup> ) | Densité (kg.L <sup>-1</sup> ) | Fabricant           |
|-------------|-----------------|---------------------------|--|-------------------------------|---------------------|
| RT26        | Paraffine       | 25                        | 131  | 0.88                          | Rubitherm GmbH      |
| AC27        | Sel hydraté     | 27                        | 207  | 1.47                          | Cristopia           |
| STL47       | Sel hydraté     | 47                        | 221  | 1.34                          | Mitsubishi chemical |
| TH58        | n.d.            | 58                        | 226  | n.d.                          | TEAP                |
| ClimSel C70 | n.d.            | 70                        | 194  | 1.7                           | Climator            |

n.d. : non disponible

## 2.7 Etude comparative des composés organiques et inorganiques

Nous allons présenter sous forme de tableau les avantages et inconvénients des matériaux à changement de phases organiques et inorganiques (Tableau 5). [42]

Tableau 5-Avantages et inconvénients des différentes catégories de MCP [34]

| Avantages   |  |  |
|---|--|--|
| Organiques  | Inorganiques                                 | Eutectiques  |
| ➤ disponibles dans une large gamme de température | ➤ chaleur latente élevée                     | ➤ point de fusion net  |
| ➤ pas de ségrégation                              | ➤ disponibles en grande quantité             | ➤ similaire à une substance pure                                 |
| ➤ chimiquement stables                            | ➤ faible coût                                | ➤ chaleur latente  |
| ➤ haute énergie de fusion                         | ➤ point de fusion net                        | ➤ légèrement supérieure  |
| ➤ non corrosifs                                   | ➤ inflammables                               | ➤ à celle des composés organiques                                |
| ➤ recyclables                                     | ➤ forte conductivité thermique               |  |
|   | ➤ chaleur spécifique massique élevée         |  |
| Inconvénients                                     |  |  |
| Organiques  | Inorganiques                                 | Eutectiques  |
| ➤ faible conductivité thermique                   | ➤ phénomène de surfusion                     | ➤ peu de données disponibles sur les propriétés de ces matériaux |
| ➤ chaleur latente faible                          | ➤ agent de nucléation étranger indispensable | ➤ peu utilisés au niveau des applications industrielles          |
| ➤ non inflammables                                | ➤ corrosifs                                  |  |
| ➤ chaleur spécifique massique faible              | ➤ vieillissement rapide                      |  |
| ➤ fort coût                                       |  |  |
| ➤ masse faible                                    |  |  |

## 2.8 Les Applications

Les principales applications industrielles des matériaux à changement de phase sont les suivantes :

- Isolation des bâtiments
- Climatisation passive
- Stockage d'énergie thermique
- Refroidissement et transport de produits alimentaires ou de produits sensibles pharmaceutiques ou médicaux.
- Industrie Textile[43]

### Et également

- Récupération de la chaleur issue de l'incinération des déchets
- Diminuer les effets exothermiques de réactions chimiques
- Energie solaire
- Système thermique dans l'aérospatiale
- Refroidissement de moteur dans l'industrie automobile
- Protection thermique de composants et circuits électroniques[43]

### 2.8.1 L'isolation des bâtiments

On retrouve les matériaux à changement de phase dans le bâtiment principalement sous la forme de plaques où les MCP sont encapsulés. L'énergie stockée dans les parois (enthalpie de fusion) n'est pas transmise à l'intérieur de l'édifice. En période de surchauffe, le MCP fond et la chaleur est emmagasinée ; lorsque le bâtiment se refroidi, le MCP se solidifie et l'énergie stockée est restituée.

Dans une certaine gamme de température, le MCP accroît donc l'inertie thermique du bâtiment.

L'emploi de MCP dans un projet de rénovation, là où les demandes de maîtrise de l'énergie sont les plus fortes, apparaît très prometteur pour réduire les consommations d'été (climatisation) tout en préservant un bon niveau de confort pour les bâtiments à faible inertie. L'emploi dans les structures très légères (construction à ossature bois, habitat préfabriqué, cabanes de chantiers, camping-car, ...) apparaît comme un des débouchés privilégiés de cette technique[43]

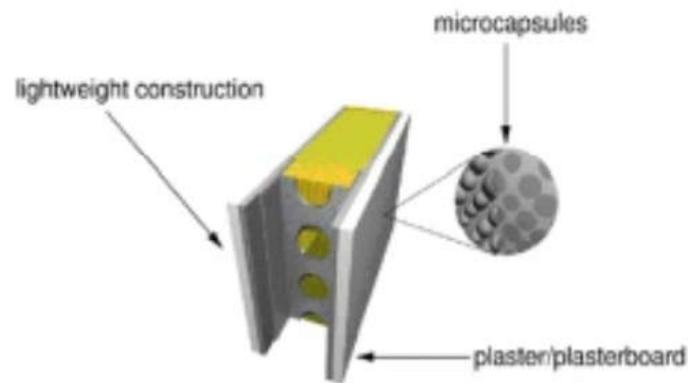


Fig. 34—Intégration d'un MCP dans un mur de plâtre[43]

### 2.8.2 La climatisation passive et le chauffage

Selon une étude du CSTB (Les matériaux à changement de phase : une innovation pour améliorer les performances énergétiques des bâtiments, Daniel Quenard), en intégrant les MCP dans des parois des bâtiments (cloisons, briques, carreaux de plâtre...) il est alors possible de diminuer la température de 3 °C à 5 °C ce qui limite le recours aux systèmes de climatisation coûteux en énergie.

Le changement de phase a lieu, selon les matériaux (paraffine, acides gras...), entre 19 °C et 27 °C, températures correspondant aux valeurs limites respectivement fixées pour le confort d'hiver et d'été.

Un système de ventilation nocturne associé permet de régénérer plus efficacement les MCP (restitution des calories).[43]

### 2.8.3 Le stockage de l'énergie thermique

Les MCP stockent l'énergie en changeant de phase solide à liquide (il fond). Puis ils restituent la chaleur par le changement de phase liquide à solide (gèle). Le choix de PCM le plus approprié est fondé sur un certain nombre de facteurs, incluant le prix, la chaleur latente et la conductivité thermique tant sur les phases liquides que solides.

Un PCM 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

Les cellules thermiques latentes utilisées pour stocker l'énergie sont également réalisées à partir de matériaux à changements de phase. Ces dispositifs sont souvent utilisés en complément d'une installation solaire ou d'un échangeur thermique.[43]



**Fig. 35– Nouvel accumulateur de chaleur solaire développé par le DLR (© DLR - German Aerospace Center)[43]**

#### **2.8.4 Le Textile**

On retrouve également des matériaux MCP dans l'industrie textile où ils sont utilisés sous forme de microcapsules placées au cœur des fibres, qui absorbent, stockent et libèrent l'énergie de façon réactive afin de réchauffer lorsqu'il fait froid ou de rafraîchir lorsqu'il fait chaud. Les MCP interviennent pour réguler les transferts de chaleur entre le corps humain et l'extérieur. Les applications les plus nombreuses dans ce domaine se font actuellement autour :

- des vêtements de montagne et de sports
- des textiles techniques à usage médical
- des vêtements de travail et de sécurité[43]

#### **2.8.5 Transport de produits alimentaires**

Les MCP sont utilisés dans l'industrie agroalimentaire, pharmaceutique et médicale pour limiter au maximum les variations de températures que subissent les aliments, les médicaments ou les composants sensibles comme par exemple dans le cas du transport du sang.

Ils se présentent la plupart du temps sous la forme de petits « sacs » plastiques contenant le MCP choisi, qui sont disposés au plus près du produit à conserver.[43]



**Fig. 36– Les applications Transport de produits alimentaires.[43]**

Les MCP sont également utilisés dans l'industrie du Catering (ex plateau repas). Le point de fusion du MCP dépend de la température à laquelle les aliments doivent être maintenus :

60° a 70°C sont les températures optimales pour que les aliments ne continuent pas à cuire mais soient assez chaud pour être mangés.[43]

## **2.9 Classe de MCP**

Il a plusieurs class de MCP, les MCP plus utiliser c'est :

### **2.9.1 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. [28]

### **2.9.2 Matériaux changement de phase RT**

Le stockage d'énergie thermique avec un matériau RT absorbe une grande quantité de chaleur ; appelée chaleur latente, à une température relativement constante. Lorsque ce processus de changement de phase est inversé, c'est-à-dire du liquide à solide ; la chaleur latente précédemment stockée est libérée. [44]

## **2.10 Les problèmes liés au changement de phase**

### **2.10.1 La corrosion**

Le manque de stabilité à long-terme du système MCP-container a longtemps limité l'expansion de l'utilisation des stockages à chaleur à latente. Ce phénomène peut être dû à deux facteurs : le manque de stabilité chimique du matériau lui-même, et/ou la corrosion entre le MCP et le container. A ce sujet, les paraffines sont réputées pour la conservation de leurs propriétés thermiques au fil des cycles charge/décharge. En revanche, la nature ionique des sels hydratés cause des problèmes de corrosion avec les containers métalliques. [1]

### **2.10.2 La ségrégation**

C'est malheureusement un phénomène observé dans la plupart des matériaux à changement de phase. 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 solidification s'accompagne de la formation de deux phases (liquide et solide).La phase la plus dense, en général le solide, se dépose au fond du récipient : c'est la ségrégation des phases. Cette dernière rend difficile l'utilisation de ces composés pour un stockage à chaleur latente. Diverses méthodes peuvent être utilisées pour minimiser la ségrégation et stabiliser les composés.

- L'agitation : elle permet de rendre homogène le liquide de départ avant la solidification, elle n'est pas très pratique car c'est une méthode de laboratoire.

- 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 réaliste dans le bâtiment. L'utilisation

d'agents épaississants afin de produire un gel au sein de la solution. Les substances les plus utilisées sont : copeaux de bois, pulpe de papier, des boues minérales etc.[41]

### 2.10.3 La surfusion

Le graphe ci-après illustre l'évolution théorique de la température pendant le changement d'état lors de la décharge thermique.[41]

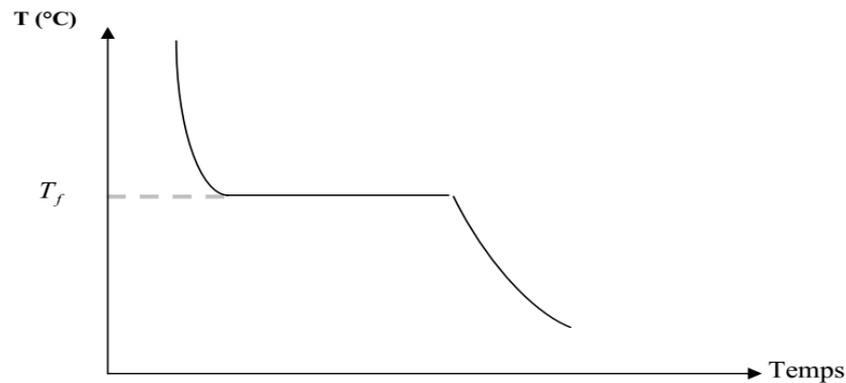
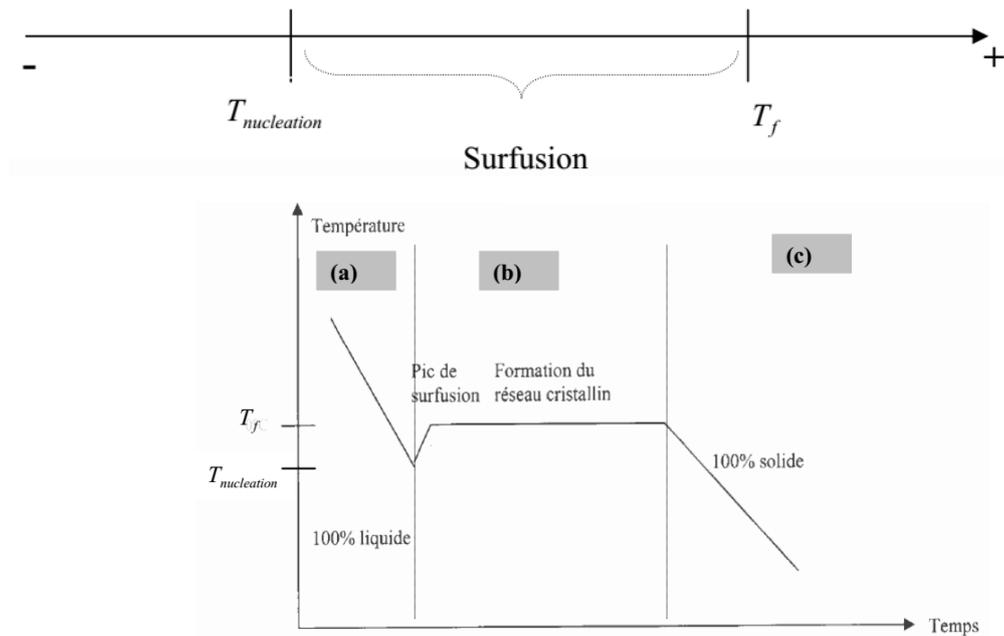


Fig. 37–Evolution théorique de T en fonction du temps.[41]

Dans la réalité, les courbes de solidification des corps ont souvent des allures plus ou moins différentes de cette courbe théorique du fait de la surfusion des composés utilisés. Ce phénomène de surfusion est intimement lié à la cristallisation, c'est l'une des difficultés majeures affectant le stockage à chaleur latente.

Physiquement, comprendre la surfusion revient à comprendre les mécanismes qui font que lors du refroidissement d'un liquide, la solidification se fait en général en dessous de la température de changement de phase : le matériau peut rester liquide jusqu'à plusieurs dizaines de degrés en dessous de la température de fusion dans certains cas. Par contre, on n'observe jamais un solide pur au delà 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 .[41]

Dans ce cas, pour cristalliser sous une pression atmosphérique (pression constante), la température d'un matériau à changement de phase doit être abaissée jusqu'à une température inférieure à la température de solidification théorique ( $T_f$ ). Cette température est appelée température de nucléation ( $T_{nucléation}$ ). Entre ces deux températures, la solution est en surfusion, elle est à l'état liquide mais présente une plus ou moins grande instabilité. Ainsi à tout moment, le départ d'un cristal peut engendrer la cristallisation complète et rapide de l'ensemble. Ce phénomène de surfusion réduit les performances énergétiques des matériaux de stockage par chaleur latente car la réaction exothermique de solidification (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.[41]



**Fig. 38– Evolution de T en fonction du temps[41]**

Sur la zone (a) de la courbe, on note une chute de la température qui s'accompagne d'un dégagement de chaleur, ce dernier est d'autant plus élevé que la masse du liquide est grande. Si l'échange de chaleur avec l'extérieur est faible alors la chaleur confinée dans le milieu provoque une remontée de la température du matériau jusqu'à la température de changement de phase (début de b). Cet échange interne engendre une dégradation énergétique du stock. Dans la zone (c) on est phase solide. [41]

## 2.11 Théorie de la solidification – fusion

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

Dans cette partie le changement de phase n'est étudié que d'un point de vue exclusivement thermique. Les solutions présentées sont basés uniquement sur l'équation classique du transfert de chaleur par conduction. la solidification sera simplifiée comme étant l'inverse de la fusion .Dans ce cas, les phénomènes plus complexes comme la cinétique de cristallisation (régie par les phénomènes de nucléation et de croissance cristalline), la surfusion, les réactions chimiques et le transfert de masse ne sont pas considérés.[32]

### 2.11.1 la solidification-fusion d'un produit pur

La principale caractéristique du changement de phase d'un matériau pur est que le dégagement ( ou absorption) de la chaleur latente de transformation se passe à une température bien précise . stefan [45]a été un des premiers à étudier ce type de problème . En 1831 il a cherché à modéliser la fusion de la calotte glaciaire.

La Fig.39 schématise la solidification d'une substance pure (ou quasiment pure). Ici, on suppose que le processus de transfert de chaleur est dominé par la conduction seulement, bien que dans certains cas les transferts convectifs et par rayonnement peuvent jouer un rôle important. Dans cet exemple la chaleur est évacuée lentement par la surface d'échange ( $T_0 < T_f$ ) et  $T_L$  est la température du fluide loin de l'interface liquide-solide ( $T_f < T_L$ ). On constate que la morphologie de l'interface solide-liquide est plane.

Cette interface est le front de solidification .Elle se déplace en fonction de temps  $t$  au fur et à mesure que la phase solide avance et est repérée par l'abscisse  $s(t)$ . [32]

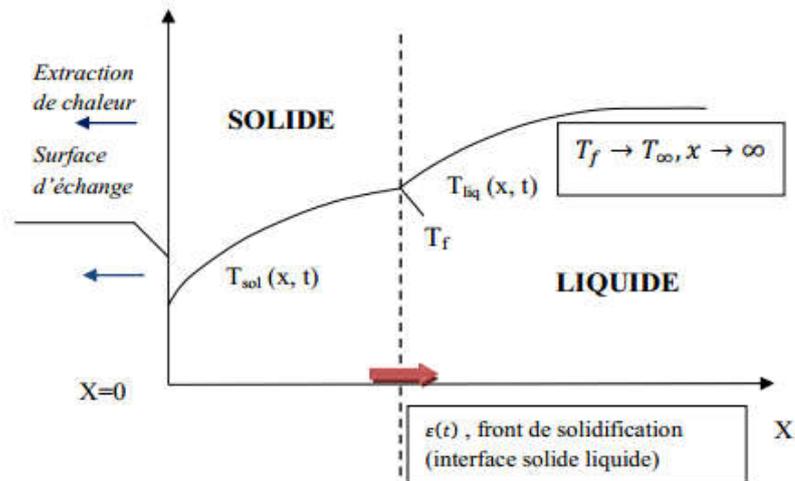


Fig. 39–solidification d'une substance pure[32]

### 2.11.2 La solidification-fusion d'un mélange homogène

Dans le cas d'un mélange le changement de phase peut avoir lieu sur un intervalle de température où les phases liquide coexistent .La chaleur latente de changement de phase est dégagée (ou absorbée) sur cette plage de propriétés des constituants du mélange (Fig. 40).

La Fig. 40 représente la solidification d'un produit homogène .Le transfert de chaleur par convection et rayonnement est supposé négligeable devant le transfert de chaleur par conduction .Dans cet exemple on constate la présence d'une région de mélange entre les fronts  $S_1(t)$  et  $S_2(t)$  où les phases solide et liquide coexistent. [32]

Les variables  $T_S$  et  $T_L$  sont respectivement la température à l'interface solide/mélange et la température à l'interface liquide/mélange .Entre  $s_1(t)$  et  $s_2(t)$  le transfert de matière peut intervenir dans le processus de solidification par formation d'une zone d'échange –qui peut assumer une forme cellulaire ou dendritique –adaptée aux besoins de la transformation exigés par le transfert de chaleur. [32]

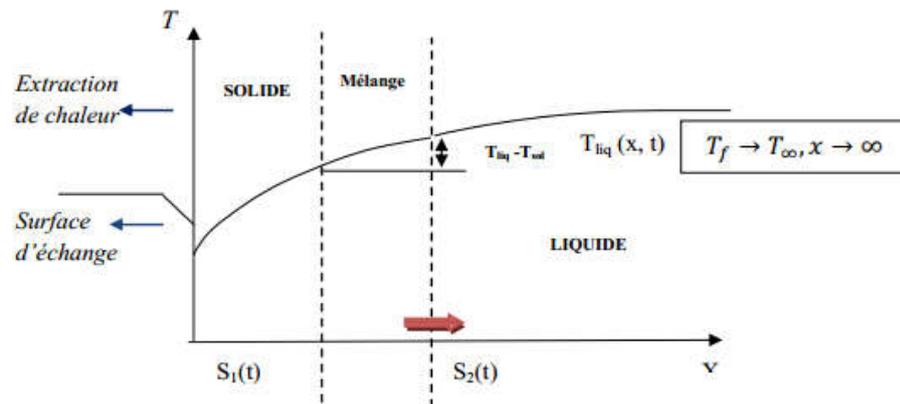


Fig. 40– la solidification d'un produit homogène[32]

## 2.12 Différents moyens d'intégration de MCP dans les bâtiments

Parmi les différents moyens d'intégration de MCP dans les bâtiments : l'intégration directe et l'encapsulation avant intégration.

### 2.12.1 intégration directe

Les MCP sont intégrés dans les matériaux de construction lors de la fabrication de ces matériaux de construction ou les MCP sont disposés dans les éléments autres du bâtiment.

### 2. 12.2 encapsulation avant intégration

Les MCP sont soit en micro encapsulation soit en macro encapsulation. Ces derniers sont intégrés soit dans les matériaux de construction soit dans les échangeurs de chaleur. [46]

#### 2. 12.2.1 Capsules de diverses géométries (micro-encapsulation)

La micro-encapsulation est un dispositif où les MCP sont enfermés dans des coquilles de petites tailles prenant différentes formes. L'avantage de MCP micro-encapsulés est qu'elle offre une grande surface d'échange.[30]

La taille des particules micro-encapsulées varie entre 1  $\mu\text{m}$  et 1 mm. Les microparticules ainsi formées contiennent généralement entre 1 et 90 % en masse de la matière active.[29]



Fig. 41– Exemple des MCP micro-encapsulés : à l'état poudre et à l'état liquide [29]

### 2.12.2 .2 Capsules de diverses géométries (macro-encapsulation)

Macro-encapsulation moyens de remplissage du MCP dans une enceinte macroscopique qui correspond à des quantités allant de quelques millilitres à plusieurs litres. Ce sont souvent des conteneurs et des sacs en plastique ou en métal, comme le montre quelques exemples de la Fig.42. L'avantage de la macro-encapsulation est que la possibilité de demander à la fois liquide et l'air comme fluides de transfert de chaleur et plus facile à transporter et à manipuler. [30]



Stainless steel ball capsule, EPS LTD



Cylindrical capsule, U.K.M (SERI)



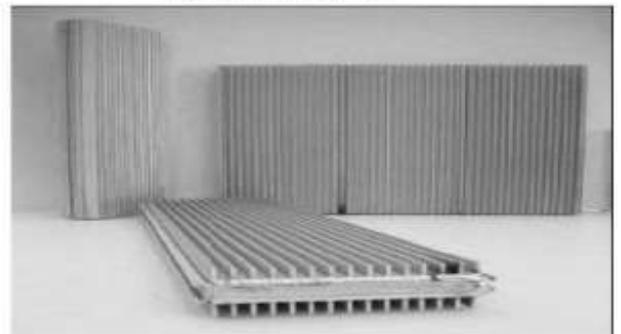
Stripe capsule (Dörken)



Spherical capsule



Bag capsule (Dörken)



Aluminum profiles with fins, (Climator)



Fig. 42–Photographies de macro encapsulation de diverses géométries [30]

Ces MCP, sous ces différentes formes sont utilisés soit de manière passive soit de manière active, comme indiqué sur la Fig.43.[46]

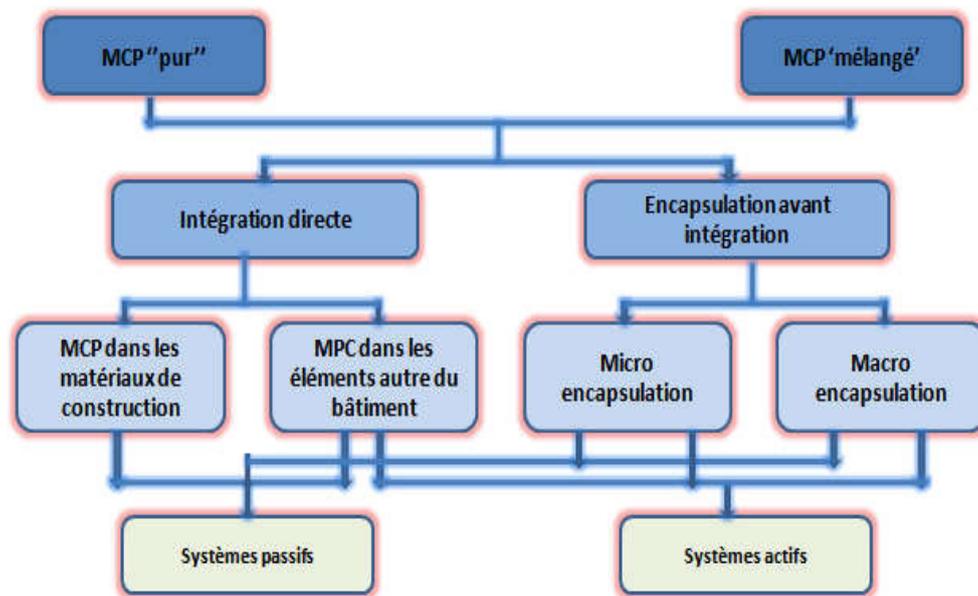


Fig. 43– Différentes modes d'utilisation des MCP dans le bâtiment. [46]

### 2.13 Systèmes de stockage latent

Il existe deux types de systèmes de stockage de chaleur latente pour centrales solaires à concentration pour génération directe de vapeur : Passif et Actif. Quel que soit le système, pendant la phase de charge (stockage), la vapeur d'eau provenant du champ solaire rentre dans le condenseur, elle cède sa chaleur au MCP qui passe de l'état solide à l'état liquide; et pendant la phase de décharge (déstockage), de l'eau liquide rentre dans l'évaporateur, elle prend la chaleur du MCP et se transforme en vapeur au même temps que le MCP se solidifie. Suivant le système, les fonctions « évaporateur » et « condenseur » sont réalisés dans les mêmes tubes au sein du MCP ou dans des faisceaux de tubes différents.[47]

#### 2.13.1 Système de stockage Passif

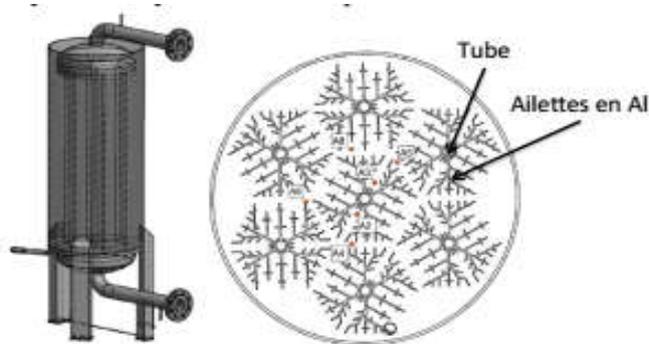
Un système de stockage passif se caractérise par la circulation non forcée du MCP dans le réservoir de stockage, le matériau de stockage reste statique et le transfert de chaleur se fait plutôt par conduction et par convection si le matériau est liquide. Dans le cas d'un système passif les mêmes tubes sont employés pour faire évaporation et puis condensation.

Le principal problème de ces systèmes vient de la faible conductivité thermique des sels, laquelle est de l'ordre de  $10^{-1}$  W/(m·K). Cela signifie que pour une quantité définie de chaleur transférée il faudra une grande surface d'échange ; laquelle a une relation directe avec la taille de l'échangeur.

Dans le cas spécifique de la décharge, le sel commence à se solidifier et il s'accroche fortement à la surface d'échange (tubes), ce qui se traduit par une diminution de la puissance

échangée.

Pour augmenter les échanges thermiques, plusieurs recherches se font actuellement pour optimiser la surface d'échange des échangeurs avec des tubes ailettes et en introduisant des matériaux qui augmentent la conductivité thermique du MCP. La Fig. 44 montre un module de stockage de chaleur par MCP passif et la coupe transversale des tubes ailettes du module[47]



**Fig. 44—Module pour stockage passif (gauche), coupe transversale des tubes ailettes (droite) [47]**

Une solution alternative au problème de conductivité thermique des sels est de faire circuler le matériau de stockage. Cela nous emmène à l'étude des systèmes de stockage actif.

### **2.13 .2 Système de stockage Actif**

Comme mentionné dans la section précédente, l'objectif d'un système actif est d'améliorer l'échange thermique dans l'échangeur en faisant circuler le matériau de stockage, on va donc favoriser le transfert thermique, plutôt en phase de décharge, par convection au lieu de le faire par conduction, pour surmonter le problème de la faible conductivité thermique des sels.

Pour arriver à réaliser cet objectif, l'emploi de systèmes auxiliaires est nécessaire. Cependant, ces systèmes ont aussi besoin d'électricité pour leur fonctionnement, alors un compromis est nécessaire entre la quantité d'énergie produite et celle requise pour les systèmes auxiliaires.

Dans le cas d'un système actif, les tubes du condenseur ne sont pas forcément les mêmes que ceux de l'évaporateur. [47]

### **Conclusion**

Dans ce chapitre nous allons voir que le stockage thermique est une solution intéressante pour emmagasiner de l'énergie. Il existe trois modes de stockage : par chaleur sensible, par chaleur latente et par voie thermochimique, et parmi les trois types de stockages le stockage par chaleur latente semble être le plus adapté pour stocker l'énergie thermique par l'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) qui ont des fortes densités de stockage (quantité d'énergie stockée par unité de masse). on a d'abord donné les principes et décrit les avantages du stockage de l'énergie thermique par chaleur latente par rapport au stockage par chaleur sensible.

Puis, au travers de l'analyse des différentes études sur les matériaux à changement de phase (MCP) on a défini :

- Caractérisation des technologies de stockage thermique latent
- Les matériaux utilisés et leur conditionnement.
- Les principales applications.

Les matériaux utilisés sont de plusieurs types et les principaux sont :

- Les hydrates salins
- Les paraffines
- Les composés organiques non- non-paraffines
- Les mélanges de composition eutectique

Un système de stockage thermique par changement de phase est composé de trois organes principaux, à savoir :

- Le matériau à changement de phase ou matériau de stockage.
- L'échangeur de chaleur.
- Le fluide de travail ou fluide caloporteur.

Le MCP dépend de la température de travail et est donc choisi pour une application spécifique. Le travail qui a été réalisé et qui est présenté par la suite concerne essentiellement l'échangeur de chaleur et le fluide de travail.

# Méthode numérique et position du problème

## INTRODUCTION

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). Ensuite on présente la configuration géométrique, les propriétés thermophysiques 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 6.3.26 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 Résolution numérique à l'aide de codes CFD

La simulation numériques en mécanique des fluides (CFD ; Computational Fluid Dynamics) est reconnue aujourd'hui comme l'un des outils incontournables de conception et est largement utilisée dans l'industrie. 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 in stationnaire. 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. [48]

#### 3.1.1 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.

Contrairement à la méthode des différences finies qui met en jeu des approximations des dérivées, les méthodes des volumes finis et des éléments finis exploitent des approximations d'intégrales. Toutefois, la méthode des volumes finis se base directement sur la forme dite forte de l'équation à résoudre, alors que la méthode des éléments finis 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, etc... 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  $\varepsilon$ . C'est l'écart de la valeur d'une variable donnée entre deux itérations consécutives.[49]

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

Toutefois, il est bien souvent 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.[49]

### 3.2 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 :[50]

#### 3.2.1 DNS

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  $ReL^{9/4}$ . Dans la mesure où cette approche est très coûteuse en temps de calcul et en occupation mémoire, elle reste utilisée sur des configurations à faible Reynolds et de dimensions réduites. Néanmoins, l'amélioration constante de la puissance de calcul permet de considérer désormais des configurations plus "pratiques" par exemple le calcul de la stabilisation d'une flamme non-prémélangée détachée, à nombre de Reynolds modéré [50]

#### 3.2.2 RANS

L'approche RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) consiste en 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 ( $\overline{\bar{\Psi}} = \bar{\Psi}$  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  $\Psi$ . [50]

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

$$\widetilde{\Phi} = \frac{\overline{\rho\Phi}}{\bar{\rho}} \quad (3.2)$$

La décomposition du signal entre sa partie moyenne et sa partie fluctuante s'écrit alors  $\Psi = \widetilde{\Psi} + \Psi''$ . 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 :

$$\widetilde{\Phi} - \bar{\Phi} = \frac{\overline{\rho'\Phi'}}{\bar{\rho}} \quad (3.3)$$

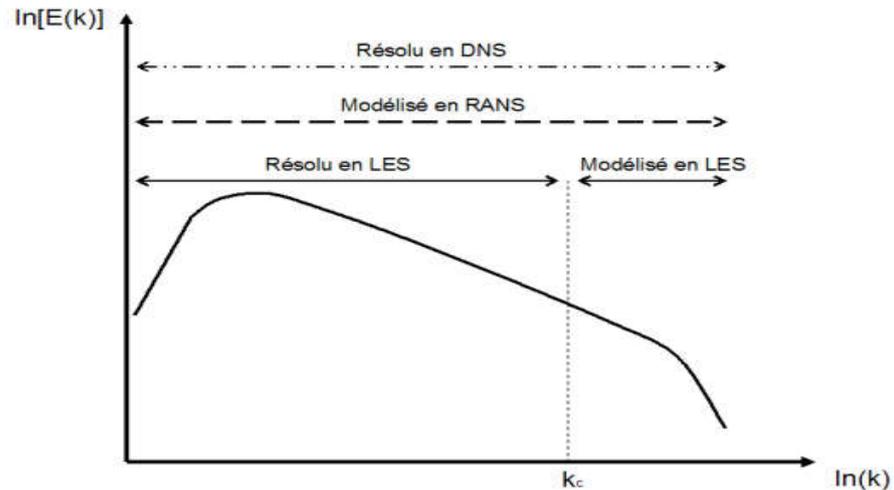
Lorsque la masse volumique est constante, les opérateurs de Reynolds et Favre sont strictement équivalents. La différence entre la moyenne au sens de Favre et au sens de Reynolds reste faible lorsque le nombre de Mach est inférieur à cinq et le taux de turbulence modéré. Dans ce cas, la comparaison des grandeurs moyennes (au sens de Favre) calculées aux grandeurs moyennes mesurées expérimentalement est justifiée, tant qu'aucune réaction chimique exothermique n'entre en jeu. [50]

### 3.2.3 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  $kc$  (Fig. 45) 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 : [50]

$$\bar{\Psi}(X, t) = \frac{1}{\Delta} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{F}\left(\frac{x-x'}{\Delta}, t-t'\right) \Psi(x', t') d^3x' dt' \quad (3.4)$$

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. [50]



**Fig. 45– Modélisation du spectre d’énergie cinétique turbulente en fonction de l’approche utilisée[50]**

### 3.3 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.[49]

La méthode des volumes finis a été décrite pour la première fois en 1971 par Patankar et Spalding et publiée en 1980 par Patankar [51]; 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 (46). 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.[49]

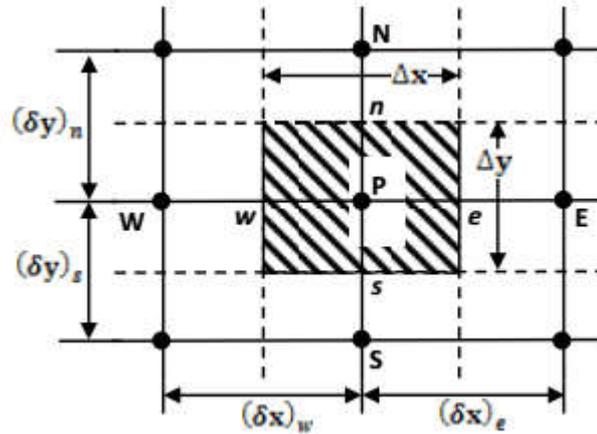


Fig. 46- Volume de contrôle bidimensionnel.[49]

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.[49]

### 3.3.1 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 du vecteur 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 (47-a), tandis que les grandeurs vectorielles u et v sont stockées au milieu des segments reliant les nœuds.[49]

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.[49]

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 (47-b)), celui de la composante longitudinale v est décalé suivant la direction y (voir la Fig (47-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.[49]

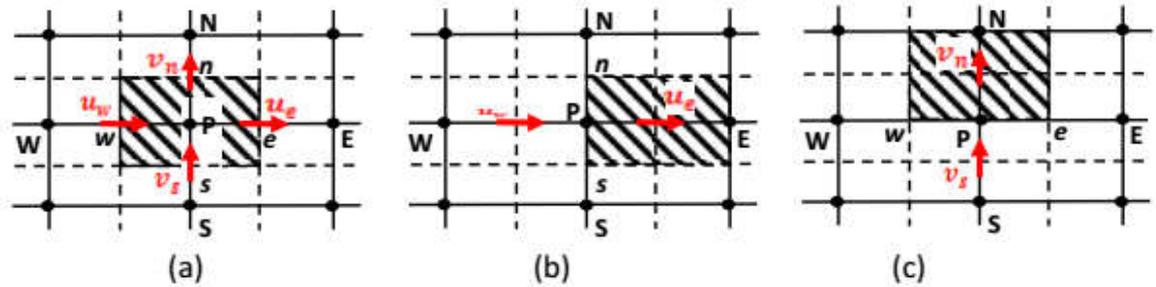


Fig. 47- Schéma du volume de contrôle (a), maillage décalé pour  $u_e$  (b), maillage décalé pour  $v_n$  (c).[49]

### 3.4 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 :

$$R_{\phi} = \frac{\sum |\sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + s_c - a_p \phi_p|}{F_{in,\phi}} \quad (3.12)$$

$R_{\phi}$  : 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  $10^{-4}$  et des itérations supplémentaires ne doivent pas modifier les résultats une fois la convergence atteinte.[52]

### 3.5 la modélisations des écoulements avec changement de phase

Généralement, il existe deux approches pour l'analyse des problèmes des changements de phase: [42]

- les schémas numériques avec maillage fixe;
- les schémas numériques avec maillage mobile ("front tracking methods").

#### 3.5.1 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.[53]

### 3.5.2 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[53]

### 3.6 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 :

$$\rho(T) \cdot C_{eff}(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3.5)$$

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 :

$$C_{eff} = C_{p_{sol}}(T) \quad (3.6)$$

- Dans la région de mélange :

$$C_{eff} = \frac{1}{2} \cdot (\overline{C_{p_{sol}}} + \overline{C_{p_{liq}}}) + \frac{dL_f(T)}{dT} \quad (3.7)$$

- Dans la zone liquide

$$C_{eff} = C_{p_{liq}}(T) \quad (3.8)$$

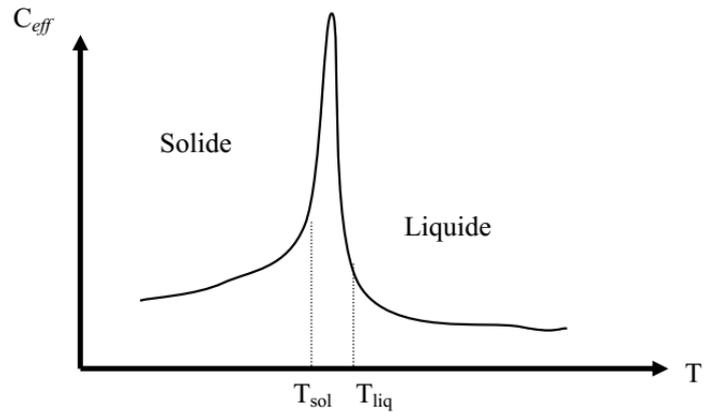
$C_{p_{liq}}$  et  $C_{p_{sol}}$  sont respectivement les capacités thermiques massiques moyennes des phases liquide et solide.[54]

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 (3.5 à 3.8) décrit ci dessus en une seule équation de la forme :

$$\rho(T) \cdot C_{eff}(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3.9)$$

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



**Fig. 48- Evolution de la capacité thermique en fonction de la Température lors d'un changement de phase.[54]**

La fig.48 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.[54]

### 3.7 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 [55, 56] vient surmonter ce problème, ainsi le système des équations de conservation est réduit à l'équation suivante :[54]

$$\rho(T) \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3.10)$$

Si on admet l'existence d'une surface de mélange (fig.51), la fonction qui permettra de passer de la variable de température  $T$  à la variable enthalpie  $h$  est donnée par :

$$\int dh(T) = \int g(T, w) \cdot CP_{sol}(T) \cdot dT + \int [1 - g(T, w)] \cdot CP_{liq}(T) \cdot dT + [1 - g(T, w)] \cdot L \quad (4.2)$$

où  $g(T, w)$  est la fraction solide [57] [58] dépendant de la température  $T$  et de la composition du produit  $w$ , donnée par la relation suivante[54]

$$g(T, w) = 1 - \left( \frac{T - T_{sol}}{T_{liq} - T_{sol}} \right)^{\frac{1}{v-1}} \quad (3.11)$$

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

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

### 3.8 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) 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. La propriété thermophysique est résumée dans le tableau 7.

Les dimensions de la géométrie étudiée sont présentées dans le tableau 6 ci-dessous. L'eau utilisée comme fluide caloporteur s'écoule par convection forcée à l'intérieur du tube central. Afin de parvenir à une simultanément état d'écoulement développé.

Les propriétés thermophysiques de l'eau à 25°C pour la solidification et 88 °C pour la fusion sont résumées dans Tableau 8.

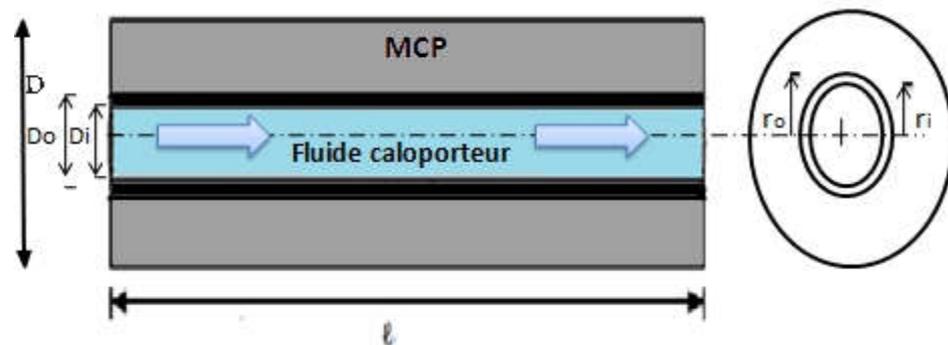


Fig. 49-Modèle physique pour le calcul numérique.

Tableau 6 les dimension de la géométrie

| La mesure     | Values [m] |
|---------------|------------|
| la langur (L) | 1          |
| Diamètre (Di) | 0.0108     |
| Diamètre (Do) | 0.012      |
| Diamètre (D)  | 0.036      |

## Propriétés thermophysiques

Tableau 7- Les propriétés du matériau à changement de phase de la cire de paraffine.[59]

| Propriétés                             | Values                      |
|--|-----------------------------|
| Température de fusion                  | 61 °C                       |
| Densité à l'état liquide               | 790 kg/m <sup>3</sup>       |
| Densité à l'état solide                | 910 kg/m <sup>3</sup>       |
| Chaleur spécifique de solide           | 2000 J/kg K                 |
| Chaleur spécifique du liquide          | 2150 J/kg K                 |
| Chaleur latente                        | 190000 J/kg                 |
| Conductivité thermique en solide       | 0.24 W/m·K                  |
| Conductivité thermique dans le liquide | 0.22 W/m·K                  |
| Viscosité cinématique                  | 0.0000052 m <sup>2</sup> /s |
| Viscosité dynamique solide             | 0.004732 N s/m <sup>2</sup> |
| Liquide de viscosité dynamique         | 0.004108 N s/m              |

Tableau 8- Propriétés thermophysiques de l'eau.[59]

| Eau à 25 ° C           | valeur                      |
|------------------------|-----------------------------|
| Densité                | 997 kg/m <sup>3</sup>       |
| Chaleur spécifique     | 4179 J/kg K                 |
| Conductivité thermique | 0.613 W/m·K                 |
| Viscosité dynamique    | 0.000855 N s/m <sup>2</sup> |

| Eau à 88 ° C           | valeur                      |
|------------------------|-----------------------------|
| Densité                | 967.1 kg/m <sup>3</sup>     |
| Chaleur spécifique     | 4203 kg/m <sup>3</sup>      |
| Conductivité thermique | 0.674 W/m                   |
| Viscosité dynamique    | 0.000324 N s/m <sup>2</sup> |

## Hypothèses simplificatrices

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

- 1) Les propriétés thermophysiques 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

## 3.9 Formulation mathématique

### 3.9.1 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:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (3.13)$$

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 :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.14)$$

### 3.9.2 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 :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \rho g \sin(\alpha) + S_x \quad (3.15)$$

Équation de quantité de mouvement suivant l'axe y:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v^2) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \rho g \cos(\alpha) + S_y \quad (3.16)$$

Avec :

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \quad (3.17)$$

### 3.9.3 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 :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u h) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v h) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\right) + S_h \quad (3.18)$$

Où :

- $x, y$  Les coordonnées cartésiennes.
- $u_i$  Composante de vitesse dans la direction  $x_i$
- $T$ : 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

$$h_s = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (3.19)$$

L'enthalpie totale, H est défini comme suivant :

$$H = h_s + \Delta H \quad (3.20)$$

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)

$$\gamma = \frac{\Delta H}{L} = 0 \quad (3.21)$$

Si  $T_{\text{solidus}} < T < T_{\text{liquidus}}$  (état .....

$$\gamma = \frac{\Delta H}{L} = \frac{T - T_s}{T_l - T_s} \quad (3.22)$$

Si  $T > T_{\text{Liquidus}}$  (état liquide)

$$\gamma = \frac{\Delta H}{L} = 1 \quad (3.23)$$

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

$$S_i = -A(\gamma)u_i \frac{C(1-\gamma)^2}{\gamma^3 + \varepsilon} u_i \quad (3.24)$$

$$S_h = \rho L \frac{\partial \gamma}{\partial t} \quad (3.25)$$

- **Les condutio aux limit**

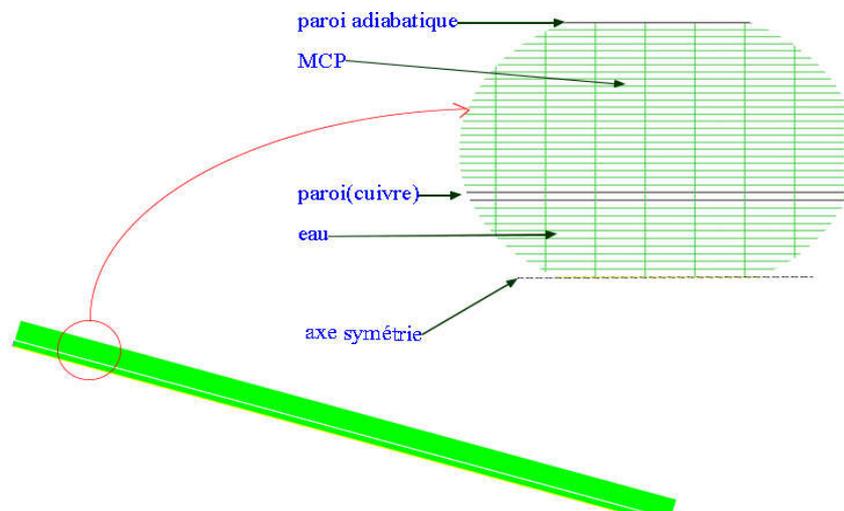
Pour :  $0 < x < L_x$  et  $y=0$   $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$

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

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

### 3.10 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), le domaine de calcul ne comportera que la moitié d'une coupe Longitudinal de la cylindre (axisymmetry conditions).



**Fig. 50-maillage du domaine de calcul**

### 3.11 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 6.3.26, 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 9- Configuration pour la simulation FLUENT**

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

#### 3.11.1 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-Implicit 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 10- Le pas de temps et facteurs de sous-relaxation**

|  |                               |           |
|--|-------------------------------|-----------|
| Paramètres de calcul<br>instationnaire | convergence                   | $10^{-8}$ |
|  | pas de temps                  | 0,1 s     |
|  | nombre d'itérations           | 20        |
| Equations                              | Mouvement                     | oui       |
|  | Energie                       | oui       |
| Facteurs de sous- relaxation           | Pression                      | 0.3       |
|  | Densité                       | 1         |
|  | Forces                        | 1         |
|  | Update de Fraction<br>Liquide | 0.7       |
|  | Energie                       | 1         |

### 3.11.3 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 présentée 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 6.3.26.

# 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  $88^{\circ}\text{C}$  et un débit massique de  $0.072\text{ kg/min}$  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.

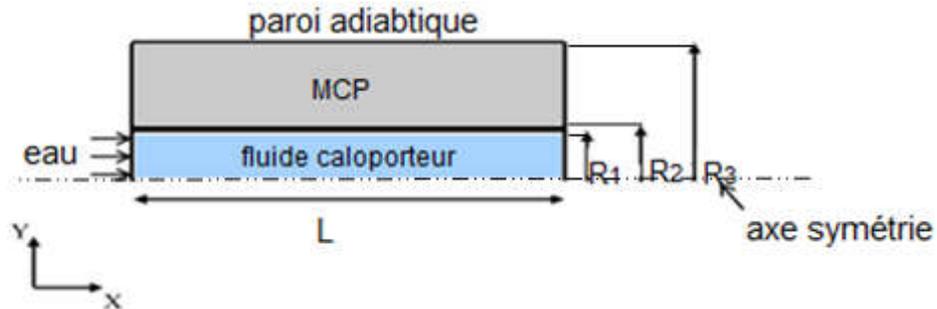


Fig. 51-Modèle physique pour le calcul numérique.

## Validation

Le modèle numérique utilisé dans le présent travail a été validé avec des résultats expérimentaux et numériques de KIBRIA et al [59] comme montrée les Fig 52a et 52b. Une bonne concordance a été obtenue pour les deux phases de charge et de décharge.

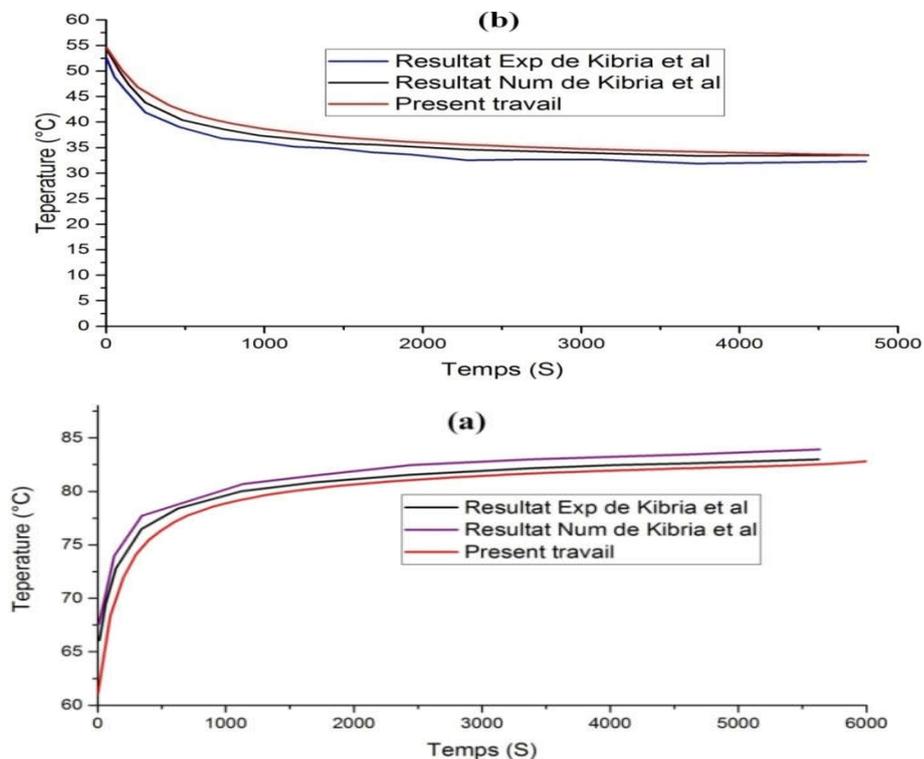


Fig. 52– La validation des températures de sortie du fluide caloporteur dans le cycle de charge et de décharge.

## 4.2 Etude paramétriques

### 4.2.1 L'impact de la variation de la température d'entrée de l'eau

Pour illustrer l'influence du gradient de température d'entrée du fluide caloporteur sur le processus de stockage de chaleur, nous avons pris trois valeurs de températures différentes (88°C, 75°C et 65°C).

Les résultats obtenus montre que le gradient de la température d'entrée joue un rôle très important pendant le cycle de charge Fig.53. Pour une température d'entrée plus élevée, le temps de fusion diminue sensiblement en raison de l'augmentation du taux de transfert de chaleur. En outre, on peut observer que le temps de fusion total a été réduit lorsque la température de l'eau d'entrée a été augmentée de 65 à 75 et 88°C.

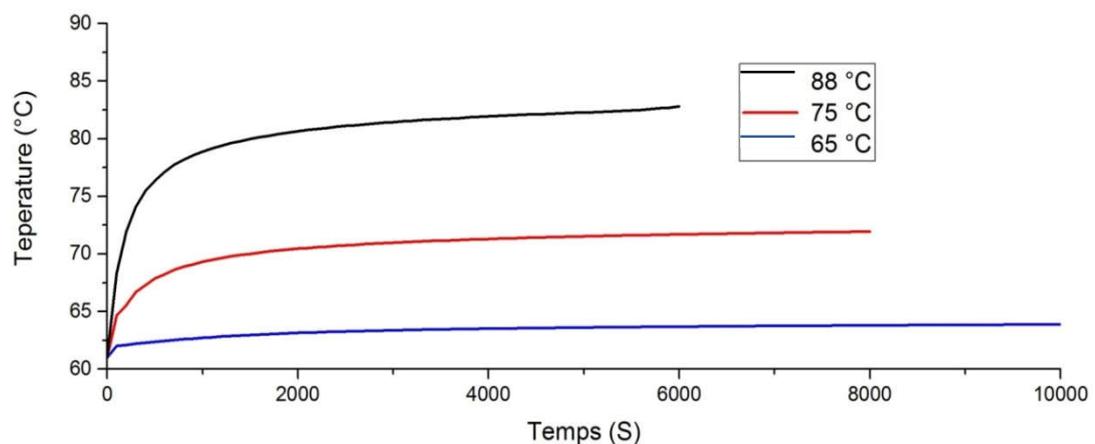


Fig. 53– Effet de la température d'entrée de l'eau.

### 4.2.2 L'impact de la variation du débit massique de l'eau

La Fig 54 montre l'effet de la variation du débit massique d'entrée du fluide caloporteur sur les performances thermique de l'unité de stockage. Il est clair que le débit massique du fluide caloporteur n'a pas d'influence sur le temps de fonctionnement et la température de sortie du système à la fois dans les cycles de décharge et de charge représentés. Lorsque le débit massique augmente, en gardant la même température d'entrée. Le temps nécessaire pour la solidification et la fusion diminuent. Car pour un débit massique plus élevé, le taux de transfert de chaleur augmente légèrement dans la région du MCP. En plus, pour une valeur de débit massique plus élevée, la température de sortie du fluide caloporteur se rapproche de la température d'entrée à la fois dans les cycles de solidification et de fusion.

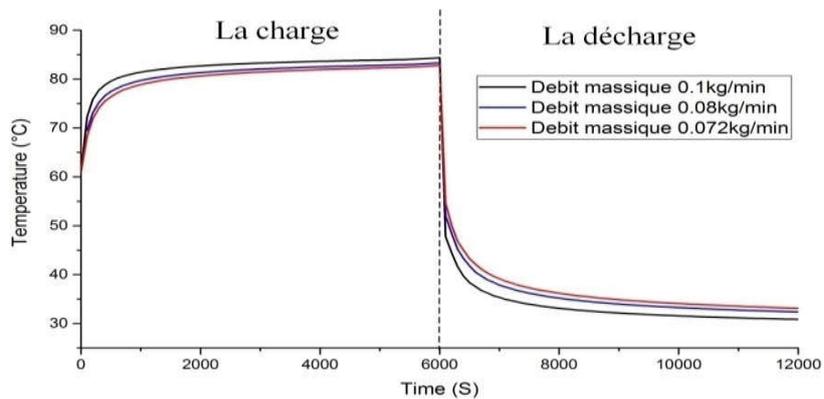


Fig. 54– Effet du débit massique

#### 4.2.3 L'impact de la variation de la longueur de l'unité de stockage.

Nous avons étudié aussi l'effet de la longueur de l'unité de stockage ( $L_t$ ) sur leurs performances thermiques au cours du cycle de charge et de décharge. Pour cela nous avons varié la longueur du tube de 0,25 à 1 m avec une augmentation de 0.25 m.

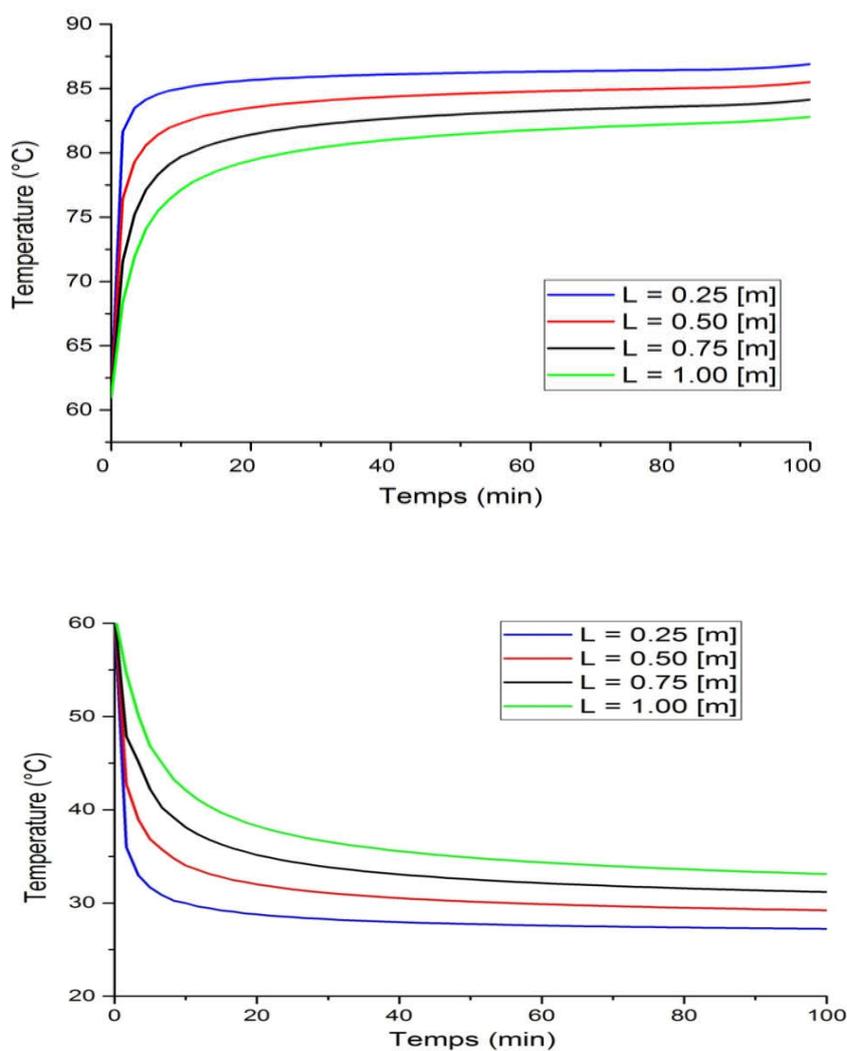


Fig. 55– Effet de la variation de la longueur de l'unité de stockage

La Fig55 montre l'évolution de la température de sortie au cour du temps des configurations sous investigation. D'après la figure, il est clair que le temps de charge et de décharge est proportionnel à la longueur du tube. Une augmentation de la longueur ramène à une augmentation du temps de fusion et de solidification. En outre, l'augmentation de  $L_t$  entraîne une diminution de la température de sortie du fluide caloporteur de  $87\text{ ° C}$  pour  $L_t = 0,25\text{ m}$  à  $82\text{ ° C}$  pour  $L_t = 1\text{ m}$  pendant 100 min. Cela conduit à un gradient de température maximal  $\Delta T_{ch}$  égal à  $5\text{ ° C}$  entre les températures de sortie fluide caloporteur des unités de stockage pendant le cycle de charge. En ce qui concerne le processus de décharge, il est clairement visible que la température de sortie du fluide caloporteur est proportionnelle à la longueur  $L_t$ . En effet, elle augmente de  $25\text{ ° C}$  à  $37\text{ ° C}$  le long des 100 min pour la configuration de 1m de longueur. Cela est due à la grande quantité du MCP utilisé qui stocke une grande de chaleur pendant le cycle de charge. A partir de cette figure, on peut voir que la longueur du tube est un paramètre important pour optimiser le temps de fusion et de solidification ainsi pour améliorer la température de sortie du fluide caloporteur.

### **Conclusion**

Une étude paramétrique a été réalisée pour évaluer les performances de l'unité de stockage avec différents paramètres de débit et de température ainsi la longueur de l'unité de stockage. Les résultats obtenus montre que la température d'entrée du fluide caloporteur a une grande influence sur la solidification et la fusion de MCP et par conséquent réduire le temps de charge pour les température d'entrée beaucoup plus supérieur à la température de fusion du MCP utilisé, et quand la température s'approche à celle de fusion du MCP, le système de stockage prend beaucoup de temps de charge et de décharge. en plus de sa la longueur du tube est un paramètre important pour optimiser le temps de fusion et de solidification ainsi pour améliorer la température de sortie du fluide caloporteur. Par contre, le débit massique n'a pas une grande influence.

# Conclusion générale

## **Conclusion générale**

Un synthèse bibliographique sur les systèmes de stockage par chaleur latente et leur modélisation a été étudié pour une meilleur compréhension du principe de fonctionnement des système de stockage de l'énergie. Un modèle numérique a été développé pour un système de stockage d'énergie horizontale avec un MCP, afin de comprendre le comportement du PCM lors de ses processus de fusion et de solidification.

Ce travail se concentre principalement sur l'influence de plusieurs paramètres: la température d'entrée de fluide caloporteur, le débit et la longueur de l'unité du stockage sur les performances thermiques de du système de stockage. En effet, on a observé que:

- la température d'entrée du fluide caloporteur a une grande influence sur la fusion et la solidification du MCP et par conséquent réduire le temps de charge pour les températures d'entrée beaucoup plus supérieur à la température de fusion du MCP utilisé, et quand la température s'approche à celle de fusion du MCP, le système de stockage prend beaucoup de temps de charge et de décharge. Les calculs actuels ont démontré qu'en augmentant la température de l'eau d'entrée à 80 ° C, le temps de fusion total est réduit à 37%.

- Le débit massique n'a pas une grande influence sur le temps de fonctionnement et la température de sortie du système.

- La longueur du tube est un paramètre important pour optimiser le temps de fusion et de solidification ainsi pour améliorer la température de sortie du fluide caloporteur.



# Bibliographie

## Bibliographie

- [1] Hongois, S., Stockage de chaleur inter-saisonnier par voie thermochimique pour le chauffage solaire de la maison individuelle. 2011, INSA de Lyon.
- [2] CONSEIL DE L'UNION EUROPÉENNE du 8 et 9 mars 2007, paragraphe 32, Bruxelles, le 2 mai 2007.
- [3] Mefti, A., Bouroubi M, Y., Mimouni, H. Evaluation du potentiel énergétique solaire, Bulletin des Energies Renouvelables, N°2, p 12, décembre. (2002).
- [4] BENMOUSSA, F., BENMOUSSA, H., and BENZAOU, A. Stockage de l'énergie thermique: Effet des paramètres physiques et géométriques sur les performances de stockage.
- [5] Benmoussa, F., Benmoussa H., and Benzaoui A. Numerical analysis of a latent thermal energy storage unit using two phase change materials with different melting temperatures. *Revue des Energies Renouvelables*, 2016. **19**(3): p. 333-343.
- [6] Wang, Y., et al. Numerical study on thermal performance characteristics of a cascaded latent heat storage unit. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2016. **230**(1): p. 126-137.
- [7] Khodadadi, J., and Zhang, Y. Effects of buoyancy-driven convection on melting within spherical containers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001. **44**(8): p. 1605-1618.
- [8] Medrano, M., Nogués, I. Martorell, Joan Roca, Luisa F. Cabeza, Experimental evaluation of commercial heat exchangers for use as PCM thermal storage systems, *Applied Energy* 86 (2009) 2047–2055.
- [9] Seeniraj, R. V., Narasimhan, N. L. Thermal analysis of a finned-tube LHTS module for a solar dynamic power system, *Heat and Mass Transfer* 38 (2002) 409–417.
- [10] Agyenim, F., Eames, P., and Smyth, M. Heat transfer enhancement in medium temperature thermal energy storage system using a multitube heat transfer array. *Renewable Energy*, 2010. **35**(1): p. 198-207.
- [11] Fortunato, B., et al. Simple mathematical model of a thermal storage with PCM. *AASRI Procedia*, 2012. **2**: p. 241-248.
- [12] Azzouz, K., et al. Modélisation dynamique d'un système frigorifique domestique couplé à un matériau à changement de phase. in *JITH 2007*. 2007. ENSTIMAC.
- [13] Foudhil, W., et al. SIMULATION NUMÉRIQUE DU STOCKAGE THERMIQUE PAR CHALEUR SENSIBLE ET LATENTE DANS UN CANAL POREUX: ANALYSE DES PERFORMANCES ET COMPARAISON. 2012.
- [14] Kurklu, A. O., Bilgin, S. «Thermal performance of a water-phase change material solar collector», *Renewable Energy* 26 (2002) 391–399.
- [15] Eman-Bellah, S., Mettawee, G. M. R. A. «Experimental study of a compact PCM solar collector», *Energy* 31 (2006) 2958–2968.
- [16] Li, Y., et al., Optimal design of PCM thermal storage tank and its application for winter available open-air swimming pool. *Applied Energy*, 2018. **209**: p. 224-235.
- [17] Murray, R., et al. Design of a latent heat energy storage system coupled with a domestic hot water solar thermal system. in *World Renewable Energy Congress-Sweden*; 8-13 May; 2011; Linköping; Sweden. 2011. Linköping University Electronic Press.
- [18] Agyenim, F., Eames, P., and Smyth, M. A comparison of heat transfer enhancement in a medium temperature thermal energy storage heat exchanger using fins. *Solar Energy*, 2009. **83**(9): p. 1509-1520.
- [19] Rahimi, M., et al. Experimental investigation of phase change inside a finned-tube heat exchanger. *Journal of Engineering*, 2014. **2014**.

- [20] Ezan, M., and Ereğ, A. "Experimental study on charging and discharging periods of water in a latent heat storage unit," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 50, no. 11, pp. 2205–2219, 2011.
- [21] Mettawee, E.-B. S., and Assassa, G. M. "Solar Energy", vol. 81, no. 7, pp. 839–845, 2007.
- [22] Hamada, Y., et Fukai J. "Thermal response in thermal energy storage material around heat transfer tubes: effect of additives on heat transfer rates", *Solar Energy*, vol. 75, no. 4, pp. 317-328, Oct. 2003.
- [23] Benmansour, A., and Hamdan, M. 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.
- [24] GUERRAICHE, D., and BOUGRIOU, C. MODELISATION DE LA SOLIDIFICATION D'UN MATERIAU A CHANGEMENT DE PHASE (MCP) DANS UN CYLINDRE.
- [25] Younsi, Z., et al. Analyse numérique de la fusion de matériaux à changement de phase dans une enceinte rectangulaire chauffée par une paroi latérale. *Faculté des Sciences Appliquées de l'Université d'Artois, Canada*, 2009.
- [26] Bédécarrats, J.-P., et al. Study of a phase change energy storage using spherical capsules. Part I: Experimental results. *Energy Conversion and Management*, 2009. 50(10): p. 2527-2536.
- [27] Roget, F. Définition, modélisation et validation expérimentale d'une capacité de stockage thermique par chaleur latente adaptée à une centrale thermodynamique solaire à basse température. 2012, Toulon.
- [28] Boutaoui, M. Simulation numérique du stockage thermique par chaleur latente dans une capsule elliptique. 2016.
- [29] Drissi, S. Développement de nouveaux bétons "accumulateurs d'énergie": investigations expérimentale, probabiliste et numérique du comportement thermique. 2015, Université Paris-Est.
- [30] Belkhir, B.A.e.S. SIMULATION NUMERIQUE D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN UTILISANT DES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE, in *Faculté des Sciences Appliquées Département de Génie Mécanique*. 2016, KASDI Merbah d' Ouargla: KASDI Merbah d' Ouargla. p. 79.
- [31] Ahmad, M. Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère des bâtiments. Couplage matériaux à changement de phase, super-isolation, apports solaires. 2004, Université Joseph Fourier (Grenoble).
- [32] Akrouche, A. Etude du stockage et déstockage d'énergie dans un matériau à changement de phase. 2011.
- [33] Verdier-Gorcias, D. Stockage thermique de protection à chaleur latente intégré à un récepteur solaire à air pressurisé. 2016, Perpignan.
- [34] Guichard, S. Contribution à l'Étude des Parois Complexes intégrant des Matériaux à Changement de Phase: Modélisation, Expérimentation et Évaluation de la performance énergétique globale. 2013, Université de la Réunion.
- [35] F. Trinquet. Stockage d'énergie pour la production de froid.  
file:///H:/les%20memoire%20reference%20de%20chapitre%20/Cours%20N1%20Stockage.pdf
- [36] Rouault, F. Système intégré de rafraîchissement d'air pour le bâtiment à base de matériaux à changement de phase. 2014, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers-ENSAM.
- [37] Lane, G.A. Phase change materials for energy storage nucleation to prevent supercooling. *Solar energy materials and solar cells*, 1992. 27(2): p. 135-160.
- [38] Abhat, A. Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials. *Solar energy*, 1983. 30(4): p. 313-332.
- [39] Buddhi, D., and R. Sawhney. Proceeding of thermal energy storage and energy conversion. *School of Energy And Environmental Studies, Devri Ahilya Universty, Indore, India*, 1994.

- [40] Tayeb, D.M. Etude expérimentale de l'effet des MCP sur l'amélioration du confort thermique des habitats, in Faculté des hydrocarbures et énergie Renouvelable et science de la terre et l'univers. 2015, KASDI MERBAH OUARGLA.
- [41] Seck, C. Analyse et modélisation du comportement thermique d'un système de préchauffage d'air neuf pour l'habitat, intégrant un matériau à changement de phase. 2010, Artois.
- [42] BOURGUEBA, D., and I. BEKKOUCHE. Simulation numérique du stockage De l'énergie solaire par chaleur latente. 2014.
- [43] phase, D.T.S.m.a.c.d. and [http://www.entreprise-europe-raa.fr/servlet/com.univ.collaboratif.utils.LectureFichier?CODE\\_FICHER=1237903661981&ID\\_FICHE=1118](http://www.entreprise-europe-raa.fr/servlet/com.univ.collaboratif.utils.LectureFichier?CODE_FICHER=1237903661981&ID_FICHE=1118).
- [44] Berreksi, S., and S. Latarsa. Simulation numérique du stockage thermique par chaleur latente dans une capsule sphérique. 2016.
- [45] Delaunay, D. La thermique des matériaux, transferts de chaleur et caractérisation en cours de transformation. Rev. Gén. Therm. 1991, n°356-357, p.517-530 [46] Ango, S.E., Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment: développement d'un système actif à matériaux à changement de phase. 2011, Arts et Métiers ParisTech.
- [47] Riofrío Almeida, M.C. Conception d'un système de stockage de chaleur pour centrale solaire à concentration. 2013, Francia/University Joseph Fourier/2013.
- [48] Korti, M.C. Simulation numérique de champ dynamique et thermique durant le moulage par injection à haute pression des métaux. 2012.
- [49] Souiadi, L. LA CONVECTION MIXTE DANS UN CANAL HORIZONTAL MUNI DE BLOCS CHAUFFES.
- [50] Moule, Y. Modélisation et Simulation de la Combustion dans les Ecoulements Rapides. Applications aux Superstatoréacteurs. 2013, Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique-Poitiers.
- [51] Patankar, S. Numerical heat transfer and fluid flow. 1980: CRC press.
- [52] Guestral, M., Modélisation de la convection naturelle laminaire dans une enceinte avec une paroi chauffée partiellement. 2009.
- [53] Perron, S. Résolution avec la méthode des volumes finis dirigés de l'équation de la chaleur pour des problèmes diphasiques en 1D et 2D. 1998: Université du Québec à Chicoutimi.
- [54] 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.
- [55] Woinet, B. Etude expérimentale et théorique de la cristallisation de l'eau dans les gels alimentaires congelés, Thèse de Doctorat, Chimie minérale, Université Claude Bernard, Lyon 1, 1999.
- [56] Banaszek, J. R.D., Rebow, M., et El-saghir, F. Experimental study of solid-solid change in a spiral thermal energy storage unit, Applied thermal engineering, Vol. 19, pp.1253-1277, 1999
- [57] Banaszek, J., Domanski, R., Rebow, M. et El-saghir, F. Experimental study of solid-solid change in a spiral thermal energy storage unit, Applied thermal engineering, Vol.19, pp.1253-1277, 1999
- [58] Rappaz M. Modelling of microstructure formation in solidification processes, International Materials Reviews; V: 34, Issue 1 (01 January 1989), pp. 93-124. .
- [59] Kibria, M., et al. Numerical and experimental investigation of heat transfer in a shell and tube thermal energy storage system. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2014. **53**: p. 71-78.

# Présentation des Logiciels Gambit et Fluent

## Présentation des logiciels Gambit et Fluent

La résolution par le logiciel de simulation numérique des écoulements FLUENT nécessite la présentation de logiciel GAMBIT.

### Gambit et Fluent

FLUENT est employé pour résoudre les problèmes de flux de fluide dans les phénomènes de la solidification ou de fusion à une température constant (métaux purs) ou dans un intervalle de températures (alliages binaires).

FLUENT utilise une formulation d'enthalpie-porosité, où la zone pâteuse (liquide-solide) est traitée comme zone poreuse avec la porosité égale à la fraction liquide.

La résolution par le logiciel de simulation numérique des écoulements FLUENT nécessite la présentation de logiciel GAMBIT.

- **Préprocesseur Gambit**

Le GAMBIT est un logiciel de DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) et de génération de maillage. Il permet de réaliser des géométries en 2D ou 3D et de construire le maillage.

Les options de génération de maillage de GAMBIT offrent une flexibilité de choix. La géométrie peut être décomposé en plusieurs parties pour générer un maillage structuré, sinon GAMBIT génère automatique un maillage non structure adapté au type de géométrie construite.

[60]

### Interface de Gambit

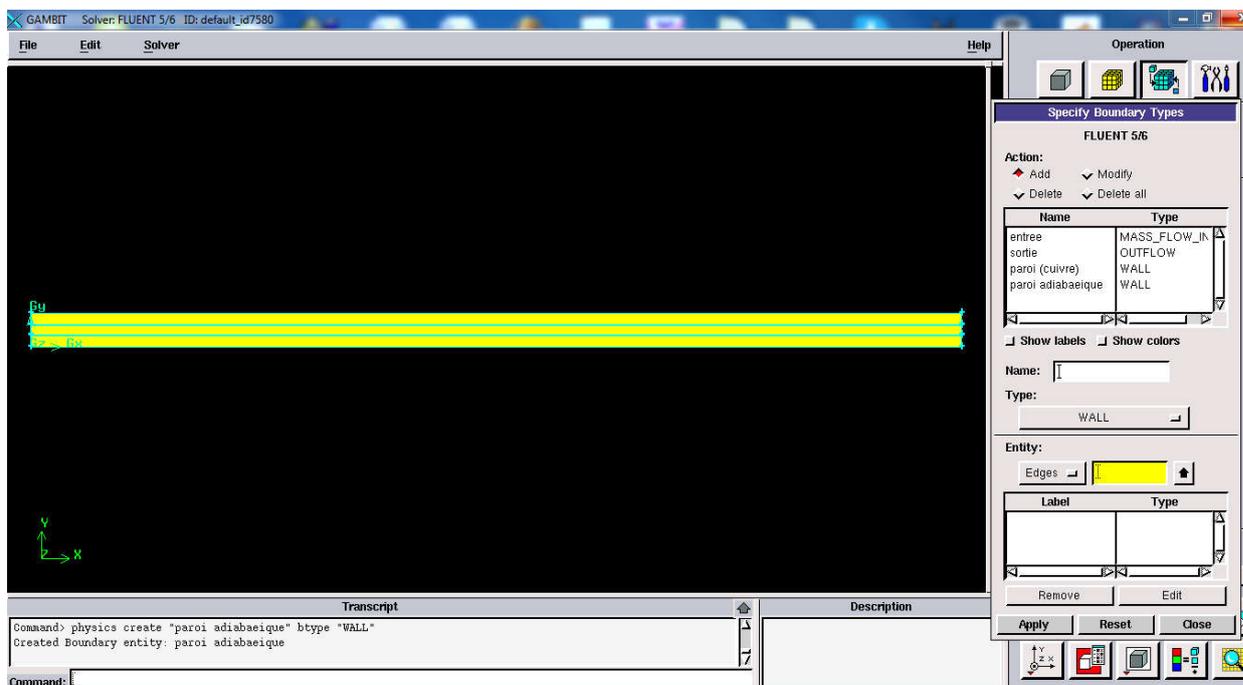


Fig. 56-Vue globale de Gambit.

- **Préprocesseur FLUENT**

FLUENT est un code de calcul pour modéliser les écoulements des fluides et les transferts thermiques dans des géométries complexes. Il peut résoudre des problèmes d'écoulement avec des mailles non structurées, qui peuvent être produites pour des géométries complexes, avec une relative facilité. Les types de mailles supportées sont :

- Des mailles en 2D, triangulaires ou quadrilatérales ;
- Des mailles en 3D tétraédriques/hexaédriques/pyramidales ;
- Des mailles (hybrides) mixtes.

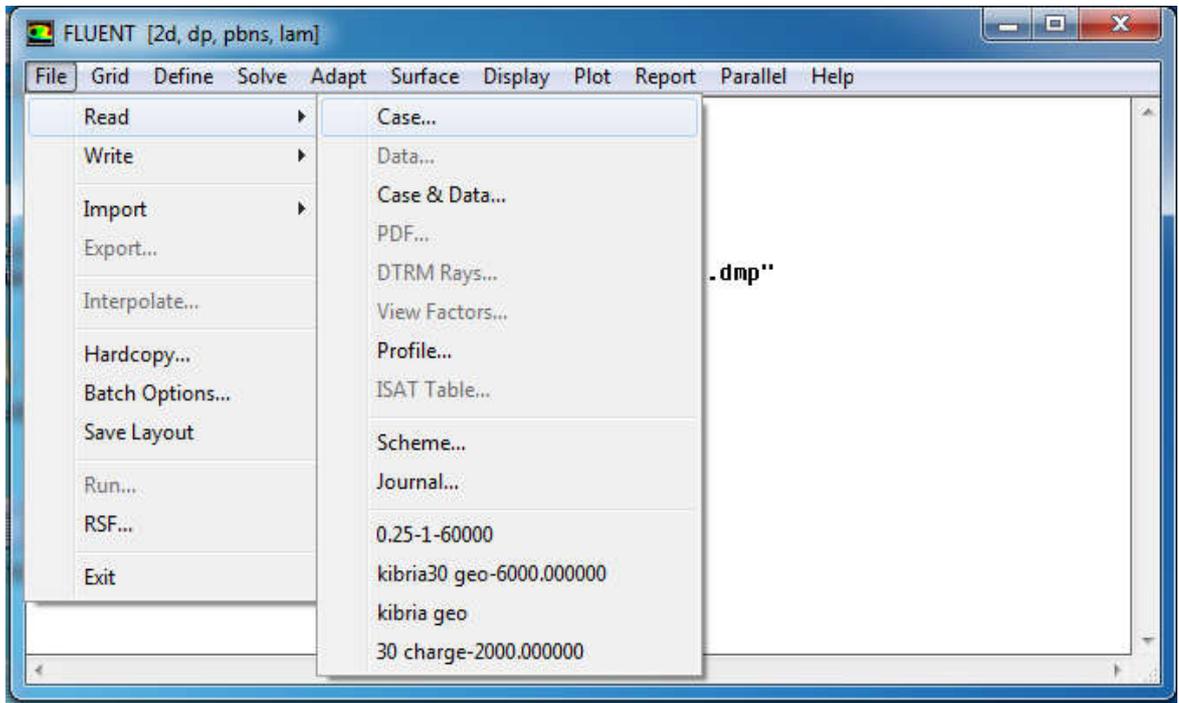
FLUENT est écrit en langage de programmation C et utilise pleinement la flexibilité et la puissance offerte par ce langage (pare exemple allocation de la mémoire dynamique). En outre, il utilise une architecture qui lui permet d'exécuter plusieurs processus simultanément sur le même poste de travail ou sur des postes séparés pour une exécution plus efficace. FLUENT s'utilise à travers une interface graphique, l'utilisateur avancé peut adapter ou augmenter aux besoins l'interface en écrivant des macros et des fonctions de menu, afin d'automatiser certaines procédures.

Ainsi, à titre non exhaustif, FLUENT permet les capacités de modélisation suivantes:

Écoulements 2D ou 3D ;

- Écoulement stationnaire ou instationnaire ;
- Écoulements incompressibles ou compressibles (subsoniques, transsoniques, supersoniques ou hypersoniques) ;
- Écoulements non visqueux, laminaires ou turbulents ;
- Fluide Newtonien ou non ;
- Transfert de chaleur forcé, par conduction, par convection ou les deux (conjugue) ou radiatif ;
- Écoulements avec changements de phases ;
- Écoulements en milieu poreux.

### **Interface du code Fluent**



**Fig. 57- Vue globale de Fluent.**

## المخلص :

الشمس هي مصدر للطاقة الحرارية المتقطعة. من اجل استغلال هذا المصدر، هناك حاجة إلى بعض تكنولوجيا تخزين الطاقة الحرارية. تعد مواد تغيير الحالة الفيزيائية (MCP) الحل الأكثر فاعلية لاستغلالها في أجهزة تخزين الحرارة الكامنة. نظرًا لخصائصها وسعة تخزينها .

كجزء من مشروعنا درسنا تخزين الطاقة الشمسية بواسطة الحرارة الكامنة مع المحاكاة العددية التي يؤديها الرمز الحسابي عبر برنامج Fluent CFD الذي يعتمد على طريقة الحل بالحجم. تتكون الوحدة من اسطوانية مملوءة بمادة تغيير الحالة الفيزيائية، داخلها أنبوب يمر عبره المياه لتخزين الحرارة خلال فترات مشمسة واستعادتها خلال فترات غيابها. و بالفعل. تم التحقق من المحاكاة العددية مع نتائج الأدب ، حيث تم الحصول على توافق جيد. بالإضافة إلى ذلك، قمنا بدراسة تأثير التغيير في درجة حرارة الماء المار عبر الأنبوب والتدفق إلى جانب تأثير طول الأنبوب على عملية الشحن والتفريغ.

أثبتت النتائج المتحصل عليها من الدراسة أن تغيير درجة حرارة مدخل المياه وطول الأنبوب له تأثير كبير على الأداء التخزين الحراري. مقارنة بتأثير تدفق الماء في كل من الشحن والتفريغ

**الكلمات المفتاحية -** التخزين الحراري ، الحرارة الكامنة ، MCP ، التبادل الحراري.

---

## Résumé

Le soleil est une source d'énergie thermique intermittente. Pour gérer l'utilisation de cette source, une certaine technologie de stockage d'énergie thermique est nécessaire. En raison de la capacité de stockage et les caractéristiques quasi isothermes lors du changement de phase, les matériaux à changement de phase (MCP) se sont la solution la plus efficace pour les exploiter dans les dispositifs de stockage thermique par chaleur latente.

Dans le cadre de ce travail, nous avons étudié et traité numériquement les performances d'une unité de stockage thermique par chaleur latente. L'unité est composé par deux tube coaxiaux où l'espace annulaire est remplie par un matériau à changement de phase (MCP). ainsi que l'eau utilisée comme un fluide caloporteur circule dans le tube central pendant les deux cycles de charge et de décharge de l'énergie thermique. En effet, les calculs sont basés sur une procédure numérique par volume fini qui incorpore une formulation d'enthalpie pour la modélisation du phénomène de changement de phase solide-liquide. Ensuite notre modèle numérique a été validé avec les résultats de la littérature, où une bonne concordance a été achevée. En outre, une étude paramétrique est également réalisée pour différents paramètres d'écoulement du système à savoir le débits massiques, la températures d'entrée de l'eau et la longueur de l'unité de stockage. Les résultats obtenus montrent que la variation de la température l'entée de l'eau et la longueur a beaucoup d'influence sur les performances thermique de l'unité de stockage. par rapport la variation du débit massique en termes de temps de fonctionnement du stockage ( charge et décharge) et de température de sortie du fluide caloporteur.

**mots clés** --stockage thermique, chaleur latente , MCP, échangeur de chaleur.

## **ABSTRACT**

The sun is an intermittent source of thermal energy. So to manage the use of this source, some thermal energy storage technology is needed. Due to the high storage capacity and quasi-isothermal characteristics during phase change, a phase change materials (PCMs) are the most efficient solution for exploiting them in latent heat storage devices.

The present work, aims at studying and numerically processed the performance of a latent heat thermal energy storage unit. which is composed of two coaxial tubes where the annular space is filled by a phase change material (PCM). as well as the water used as a hest transfer fluid circulates in the central tube for the charging and discharging cycles of the thermal energy. In fact, the computational are based on numerical procedure by using finite volume method that incorporates an enthalpy formulation for the modeling of the solid-liquid phase change phenomenon. Then our numerical model was validated with an experimental and numerical results of the literature, where a good agreement was obtained. In addition, a parametric study is also performed for different flow parameters of the system such as the mass flow rates, water inlet temperature and the length of the thermal energy storage unit. The results obtained show that the variation of the heat transfer fluid inlet temperature and the length has a great influence on the thermal performance of the storage unit. relative to the variation of the mass flow in terms of the operating time of the storage (charging and discharging) and the outlet temperature of the heat transfer fluid.

**Keywords** - thermal storage, latent heat, MCP, heat exchanger.