

## Résumé

Dans le cadre de notre projet, nous avons étudié le stockage d'énergie solaire par chaleur latente avec une simulation numérique effectuée par le code de calcul **COMSOL**. Nous avons effectué plusieurs simulations avec des cylindriques remplis à l'intérieur par l'eau chauffée à travers la source de chaleur pour stocker la chaleur par un Matériaux à Changement de Phase (MCP) qui est entourée de l'eau. Une comparaison entre différentes configurations ainsi que l'effet du débit d'eau sur le stockage et l'épaisseur du MCP.

**Mots Clés :** Stockage par chaleur latente ; source de chaleur ; Matériaux à Changement de Phase ; Simulation numérique.

## Abstract

As part of our project, we studied the storage of solar energy by latent heat with a numerical simulation performed by the code **COMSOL**. We performed several simulations with cylindrical filled with heated water by a heat source through to store heat in a Phase Change Material (PCM), A comparison between different types of configurations as well as the effect of water flow on the storage and also the thickness of the PCM.

**Keywords:** Latent heat storage; Heat exchanger; Phase Change Materials; numerical simulation.

## Consistance de l'étude

كجزء من مشروعنا، درسنا تخزين الطاقة الشمسية بواسطة الحرارة الكامنة مع المحاكاة العددية التي يؤديها الرمز الحسابي COMSOL. أجرينا العديد من عمليات المحاكاة مع مبادلات حرارية في اسطوانية مملوءة بالماء ، ويحيط به مادة تغيير المرحلة لتخزين الحرارة واستعادتها. ثم قمنا بمقارنة بين أنواع مختلفة من المبادلات الحرارية .

**كلمات البحث :** تخزين الحرارة الكامنة ؛ مبادل حراري ؛ مادة تغيير المرحلة ؛ المحاكاة العددية.

### Nomenclature

|           | Définition                | unités            |
|-----------|---------------------------|-------------------|
| Cp        | Chaleur spécifique        | J/Kg.K            |
| Ls        | Chaleur latente de fusion | J/Kg              |
| T         | Température               | K                 |
| t         | Variable de temps         | S                 |
| Q         | Quantité de chaleur       | J/Kg.K            |
| X,y       | Coordonnées cartésiennes  |                   |
| $\rho$    | Masse volumique           | Kg.m <sup>3</sup> |
| $\dot{m}$ | Débit massique            | Kg/s              |

### Indice:

s: solide

l: liquide

## Liste des figures

### Chapitre I :

|   |    |
|---|----|
| Fig.1.1. Le vaisseau cylindre-plein (a) et le modèle pour un cylindre .....                 | 6  |
| Fig.1.2. schéma du lit de stockage.....   | 8  |
| Fig.1.3. Croix d'un groupe du réservoir de la chaleur cylindrique<br>associé avec MCP ..... | 9  |
| Fig.1.4. Plan de la situation expérimentale .....   | 11 |
| Fig.1.5. Lit de stockage multicouche .....  | 12 |
| Fig.1.6. Modèle physique .....  | 12 |
| Fig.1.7. Système solaire de changement de phase .....                                       | 13 |
| Fig.1.8. Schéma du problème .....   | 14 |
| Fig.1.9. Système du stockage d'énergie solaire par chaleur latente.....                     | 15 |
| Fig.1.10. Système de stockage .....   | 15 |
| Fig.1.11. Modèle physique étudié .....  | 17 |

### Chapitre II :

|   |    |
|---|----|
| Fig.2.1. Chaîne de conversion de l'énergie nécessaire pour le stockage ..                                 | 19 |
| Fig.2.2. Les grandes formes de l'énergie .....  | 20 |
| Fig. 2.3. Evolution de la température au cours d'un processus de<br>stockage-déstockage de l'énergie..... | 27 |
| Fig. 2.4. Volume requis pour le stockage de 6,7 MJ .....  | 28 |
| Fig. 2.5. Classification des MCP .....  | 37 |
| Fig. 2.6. Schéma des températures de stockage-déstockage .....  | 39 |
| Fig. 2.7. Evolution de Q en fonction de T pour un corps pur.....  | 39 |
| Fig. 2.8. Evolution de Q en fonction de T pour un mélange .....   | 40 |
| Fig. 2.9. Evolution théorique de T en fonction du temps .....   | 41 |
| Fig. 2.10. Evolution de T en fonction du temps .....  | 43 |

## Chapitre III :

|   |    |
|---|----|
| Fig. 3.1. Représentation de l'enthalpie en fonction de la température.....        | 51 |
| Fig. 3.2. Courbe de refroidissement lent d'un métal pur en fonction du temps..... | 52 |
| Fig. 3.3. Variation de $C_p$ en fonction de température .....                     | 58 |

## Chapitre VI :

|   |    |
|---|----|
| Fig. 4.1. Représentation bidimensionnelle des composants de la cuve de stockage ..... | 61 |
| Fig. 4.2. Échange thermique dans une section de la cuve .....                         | 62 |
| Fig. 4.3. Affichage au démarrage .....  | 65 |
| Fig. 4.4 Pour ajouter une physique .....  | 66 |
| Fig. 4.5. Affichage au démarrage .....  | 67 |
| Fig.4.6. La géométrie : coupe de la cuve de stockage .....                            | 67 |
| Fig. 4.7. Introduction des propriétés des domaines .....                              | 68 |
| Fig. 4.8. Introduction de l'eau dans le domaine .....                                 | 69 |
| Fig. 4.9. Introduction de terme source .....  | 69 |
| Fig.4.10. Introduction de MCP .....   | 70 |
| Fig.4.11. Introduire le transfert thermique dans les fluides .....                    | 71 |
| Fig.4.12. Introduire les valeurs initiales .....                                      | 71 |
| Fig.4.13. Introduire le changement de phase .....                                     | 72 |
| Fig.4.14. Introduire la source de chaleur .....                                       | 72 |
| Fig.4.15. Procède de maillage .....   | 73 |
| Fig.4.16. Résultat final .....  | 73 |

## Chapitre V :

|  |    |
|--|----|
| Fig.5.1. Résultat avec $h=20\text{cm}$ ..... | 76 |
| Fig.5.2. Résultat avec $h=35\text{cm}$ ..... | 77 |
| Fig.5.3. Résultat avec $l=15\text{cm}$ ..... | 78 |
| Fig.5.4. Résultat avec $e=2\text{cm}$ .....  | 79 |
| Fig.5.5. Résultat avec $e=4\text{cm}$ .....  | 79 |
| Fig.5.6. Résultat avec $e=1\text{cm}$ .....  | 80 |

## Consistance de l'étude

---

|  |    |
|--|----|
| Fig.5.7. Résultat pour $Q= 289,541 \text{ KW/m}^3$ ..... | 81 |
| Fig.5.8. Résultat pour $Q= 400 \text{ KW/m}^3$ .....     | 81 |
| Fig.5.9. Résultat pour $Q= 180 \text{ KW/m}^3$ .....     | 82 |

### Liste des tableaux

|   |    |
|---|----|
| Tableau 1. Matériaux Adsorbants .....   | 23 |
| Tableau 2. Propriétés des matériaux de stockage de la chaleur<br>sensible à 20°C.....           | 25 |
| Tableau 3. Résumé des trois types de MCP .....  | 30 |
| Tableau 4. Les matériaux minéraux potentiellement candidats pour le<br>stockage thermique ..... | 32 |
| Tableau 5. Les composés organiques candidats au stockage thermique .....                        | 35 |
| Tableau 6. Les eutectiques candidats au stockage thermique.....                                 | 36 |
| Tableau 7. Avantages et inconvénients des MCP .....   | 38 |
| Tableau 8. Contient des matériaux à changement de phase commercialisés.....                     | 47 |

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale

L'objectif de ce travail est d'étudier le stockage thermique d'un échangeur de chaleur à eau à l'aide d'un matériau à changement de phase. La simulation numérique du système a été effectuée pour la détermination de l'évolution des températures des différents composants de l'eau et de la fusion de MCP. Cette étude a été réalisée à l'aide du code de calcul **COMSOL**.

Les équations qui régissent le problème sont les équations d'énergie. Pour le phénomène de changement de phase la méthode enthalpique et Cp variable a été adoptée. Les effets de l'épaisseur (quantité massique) du MCP, la dimension et le flux de chaleur de la source de chaleur (l'échangeur) ont été examinés. Les résultats obtenus montrent clairement l'influence de ces paramètres sur la variation de température de fusion en fonction du temps.

Enfin, en perspective, cette étude peut être étendue en s'intéressant à :

- Changer la source thermique par d'autres solutions adoptées par exemple : capteur solaire et introduire un écoulement dans la cuve de stockage.
- L'utilisation des différents types de MCP pour tirer le meilleur performant.
- Combiner différents types de MCP dans le même échangeur.

## Stockage thermique par chaleur latente

---

### Date du rapport

28 nov. 2015 21:01:20



# Compte rendu

---

## Contenu

|   |    |
|---|----|
| 1. Définitions globales .....                   | 86 |
| 1.1. Paramètres 1 .....                         | 86 |
| 1.2. Fonctions .....                            | 86 |
| 2. Composant 1 .....                            | 88 |
| 2.1. Définitions .....                          | 88 |
| 2.2. Géométrie 1.....                           | 88 |
| 2.3. Matériaux .....                            | 89 |
| 2.4. Transfert de chaleur dans les fluides..... | 91 |
| 2.5. Maillage 1 .....                           | 92 |
| 3. Etude 1.....                                 | 93 |
| 3.1. Temporel .....                             | 93 |
| 4. Résultats .....                              | 94 |
| 4.1. Jeux de données .....                      | 94 |
| 4.2. Groupes de graphiques .....                | 95 |

# Compte rendu

---

## 1 Définitions globales

|      |                       |
|------|-----------------------|
| Date | 28 nov. 2015 18:48:24 |
|------|-----------------------|

### Réglages globaux

|                   |   |
|-------------------|---|
| Nom               | Model temporel.mph                            |
| Chemin            | C:\Users\admin\Documents\1\model temporel.mph |
| Version de COMSOL | COMSOL 5.1 (Version: 234)                     |

### Produits utilisés

|                      |
|----------------------|
| COMSOL Multiphysics  |
| Heat Transfer Module |

## 1.1 Paramètres 1

### Paramètres

| Nom     | Expression | Valeur   | Description               |
|---------|------------|----------|---------------------------|
| T_trans | 57[degC]   | 330.15 K | température de transition |
| dT      | 2[K]       | 2 K      | interval de température   |
| T_0     | 25[degC]   | 298.15 K | température initial       |
| T_hot   | 60[degC]   | 333.15 K | température final         |
| dt      | 10[min]    | 600 s    | pas de temps              |

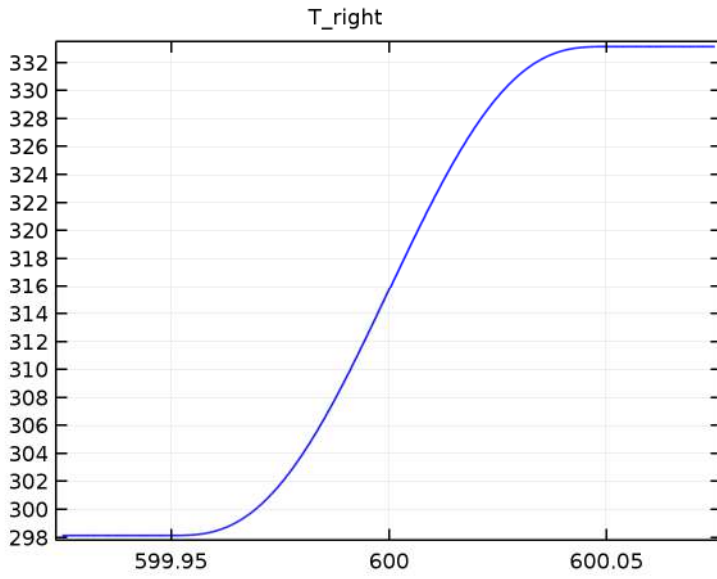
## 1.2 Fonctions

### 1.2.1 Etape 1

|                    |         |
|--------------------|---------|
| Nom de la fonction | T_right |
| Type de fonction   | Etape   |

# Compte rendu

---



*Etape 1*

## 2 Composant 1

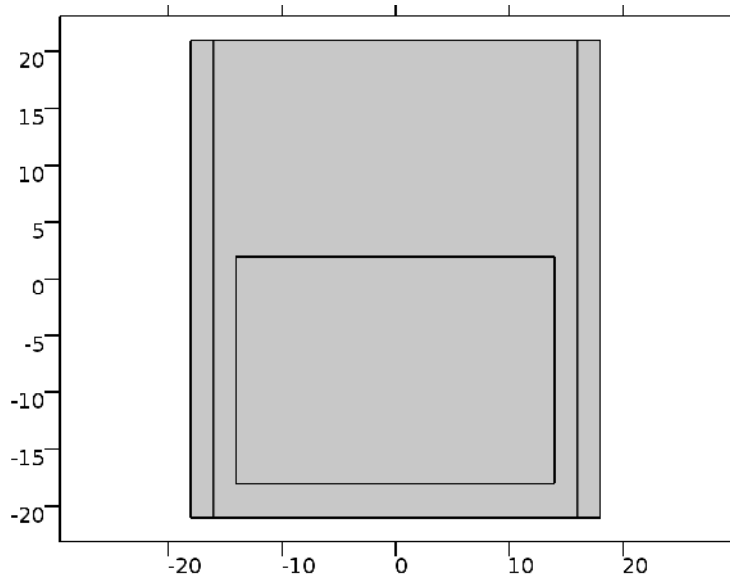
### 2.1 Définitions

#### 2.1.1 Repères

##### *Repère sur frontière 1*

|                                |                      |
|--------------------------------|----------------------|
| Type de système de coordonnées | Repère sur frontière |
| Etiquette                      | sys1                 |

### 2.2 Géométrie 1



##### *Géométrie 1*

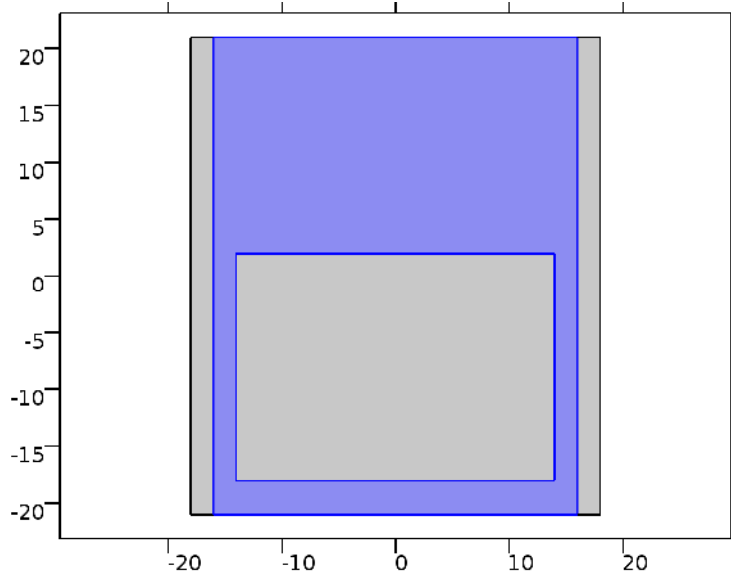
##### **Unités**

|                   |     |
|-------------------|-----|
| Unité de longueur | cm  |
| Unité d'angle     | deg |

# Compte rendu

## 2.3 Matériaux

### 2.3.1 Water

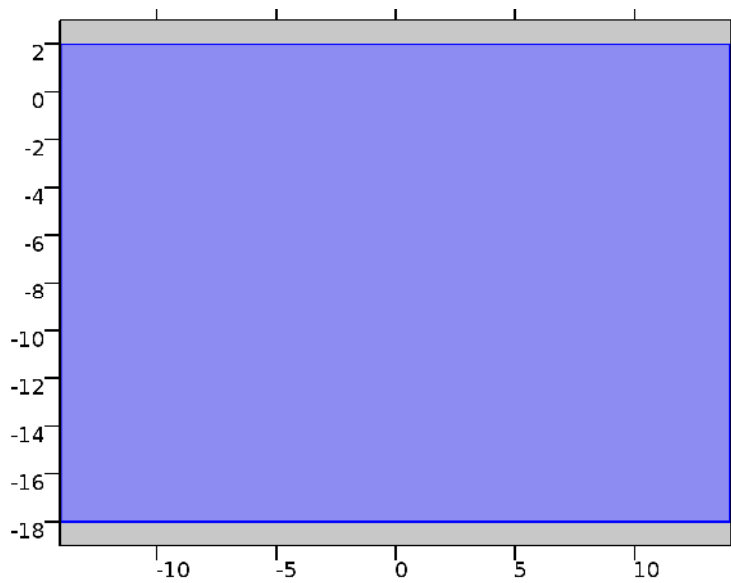


*Water*

#### Sélection

|                    |           |
|--------------------|-----------|
| Niveau géométrique | Domaine   |
| Sélection          | Domaine 2 |

### 2.3.2 Water 1



*Water 1*

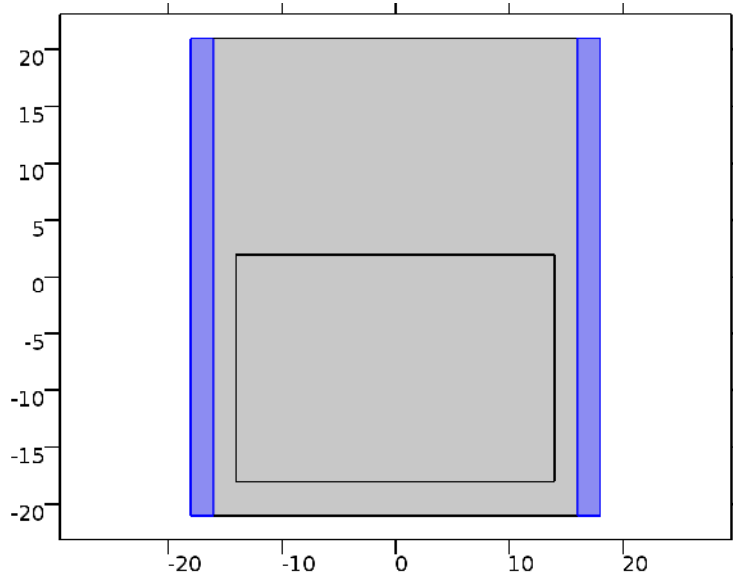
#### Sélection

# Compte rendu

---

|                    |           |
|--------------------|-----------|
| Niveau géométrique | Domaine   |
| Sélection          | Domaine 3 |

## 2.3.3 Matériau 3

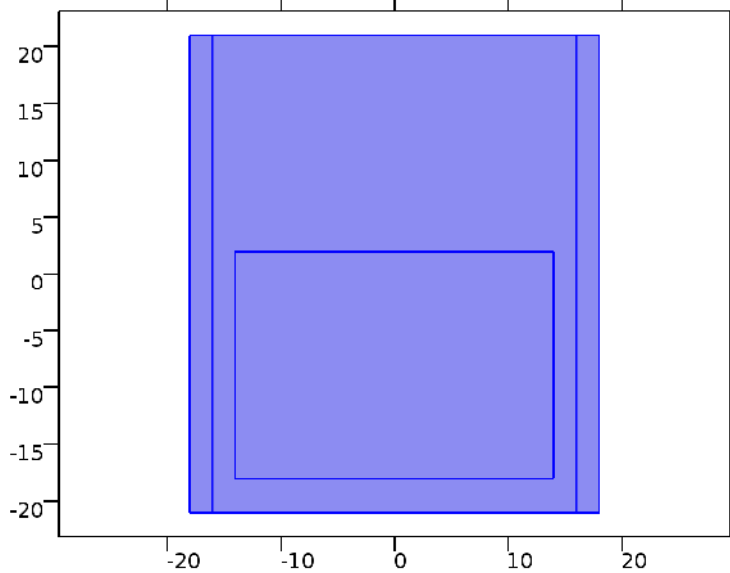


*Matériau 3*

### Sélection

|                    |               |
|--------------------|---------------|
| Niveau géométrique | Domaine       |
| Sélection          | Domaines 1, 4 |

## 2.4 Transfert de chaleur dans les fluides



*Transfert de chaleur dans les fluides*

### Equations

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = \rho Q + q_0 + \rho Q_p + \rho Q_{vd}$$

$$\mathbf{q} = -k \nabla T$$

### Fonctionnalités

|   |
|---|
| Transfert de chaleur dans les fluides 1         |
| Valeurs initiales 1                             |
| Isolation thermique 1                           |
| Transfert de chaleur avec changement de phase 1 |
| Source de chaleur 1                             |

#### 2.4.1 Transfert de chaleur dans les fluides 1

##### Équations

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = \rho Q + q_0 + \rho Q_p + \rho Q_{vd}$$

$$\mathbf{q} = -k \nabla T$$

#### 2.4.2 Isolation thermique 1

##### Équations

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = 0$$

# Compte rendu

## 2.4.3 Transfert de chaleur avec changement de phase 1

Équations

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = \dot{Q} + q_0 + \dot{Q}_p + \dot{Q}_{vd}$$

$$\mathbf{q} = -k \nabla T$$

$$\rho = \theta \rho_{\text{phase1}} + (1 - \theta) \rho_{\text{phase2}}$$

$$C_p = \frac{1}{\rho} (\theta \rho_{\text{phase1}} C_{p,\text{phase1}} + (1 - \theta) \rho_{\text{phase2}} C_{p,\text{phase2}}) + L \frac{d\alpha_m}{dT}$$

$$k = \theta k_{\text{phase1}} + (1 - \theta) k_{\text{phase2}}$$

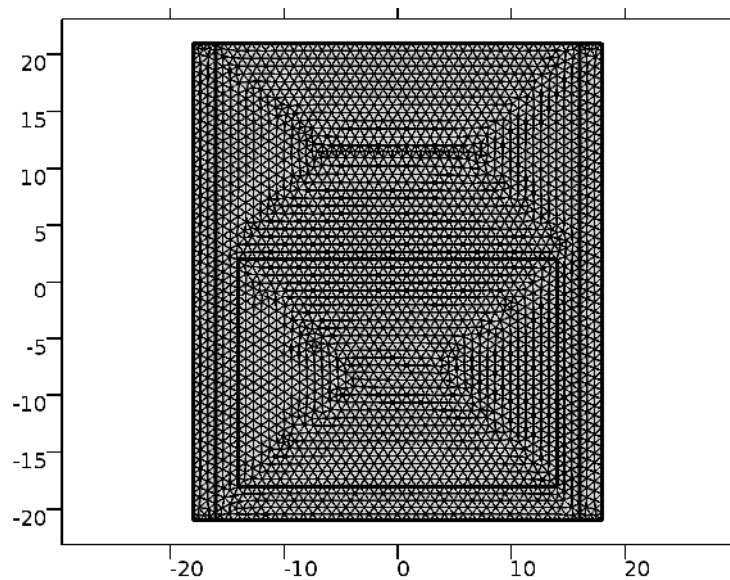
$$\alpha_m = \frac{1}{2} \frac{(1 - \theta) \rho_{\text{phase2}} - \theta \rho_{\text{phase1}}}{\theta \rho_{\text{phase1}} + (1 - \theta) \rho_{\text{phase2}}}$$

## 2.4.4 Source de chaleur 1

Équations

$$\dot{Q} = \dot{Q}_0$$

## 2.5 Maillage 1



Maillage 1



# Compte rendu

---

## 3 Etude 1

### Information sur le calcul

|                        |   |
|------------------------|---|
| Temps de calcul        | 19 min 11 s                                       |
| CPU                    | Intel(R) Pentium(R) CPU 2020M @ 2.40GHz, 2 coeurs |
| système d'exploitation | Windows 7   |

### 3.1 Temporel

#### Réglages de l'étude

| Description                          | Valeur    |
|--------------------------------------|-----------|
| Inclure la non-linéarité géométrique | Désactivé |

| Temps                     | Unité |
|---------------------------|-------|
| range(0,1,2) range(3,1,8) | h     |

#### Sélection de la physique et des variables

| Interface physique                         | Discrétisation |
|--|----------------|
| Transfert de chaleur dans les fluides (ht) | physics        |

#### Sélection du maillage

| Géométrie           | Maillage |
|---------------------|----------|
| Géométrie 1 (geom1) | mesh1    |

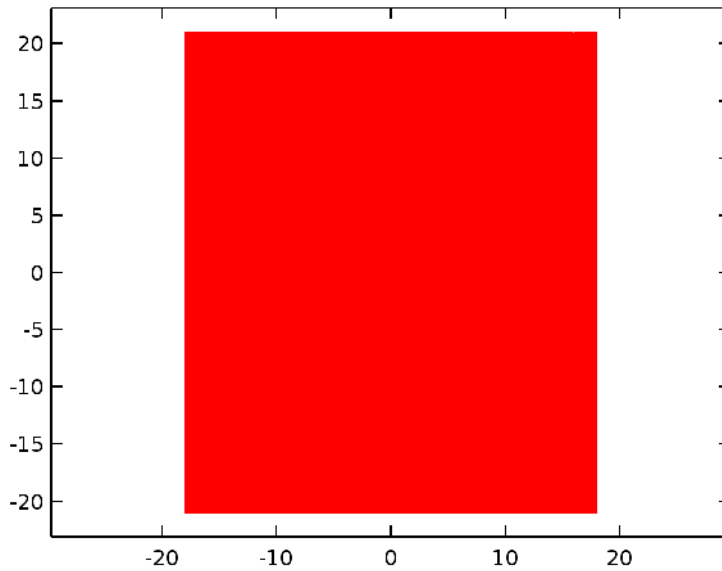
## 4 Résultats

### 4.1 Jeux de données

#### 4.1.1 Etude 1/Solution 1

##### Solution

| Description | Valeur                |
|-------------|-----------------------|
| Solution    | Solution 1            |
| Composant   | Save Point Geometry 1 |



*Jeu de données: Etude 1/Solution 1*

#### 4.1.2 Point en 2D 1

##### Données

| Description    | Valeur             |
|----------------|--------------------|
| Jeu de données | Etude 1/Solution 1 |

##### Données du point

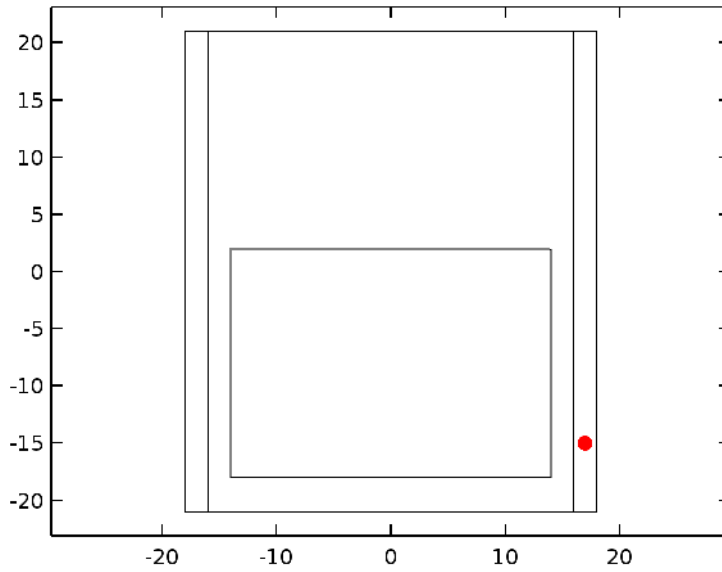
| Description           | Valeur      |
|-----------------------|-------------|
| Méthode de définition | Coordonnées |

##### Réglages

| Description | Valeur |
|-------------|--------|
| x           | 17     |

# Compte rendu

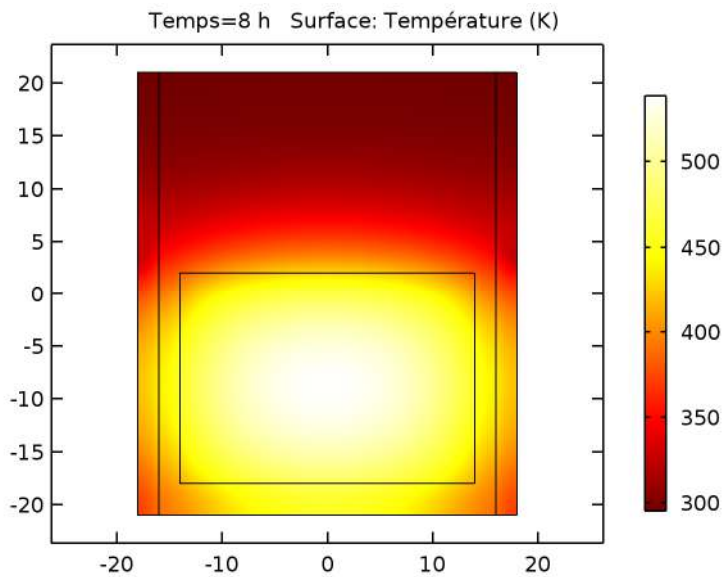
| Description | Valeur |
|-------------|--------|
| y           | -15    |



*Jeu de données: Point en 2D 1*

## 4.2 Groupes de graphiques

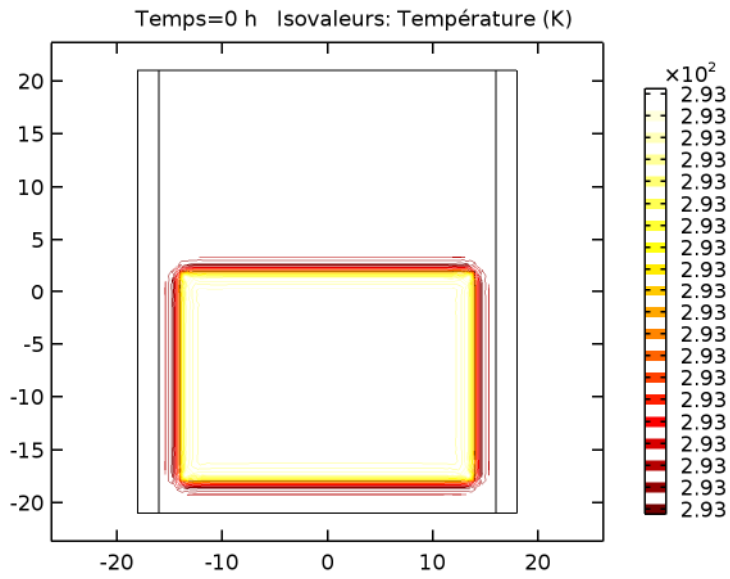
### 4.2.1 Température (ht)



*Temps=8 h Surface: Température (K)*

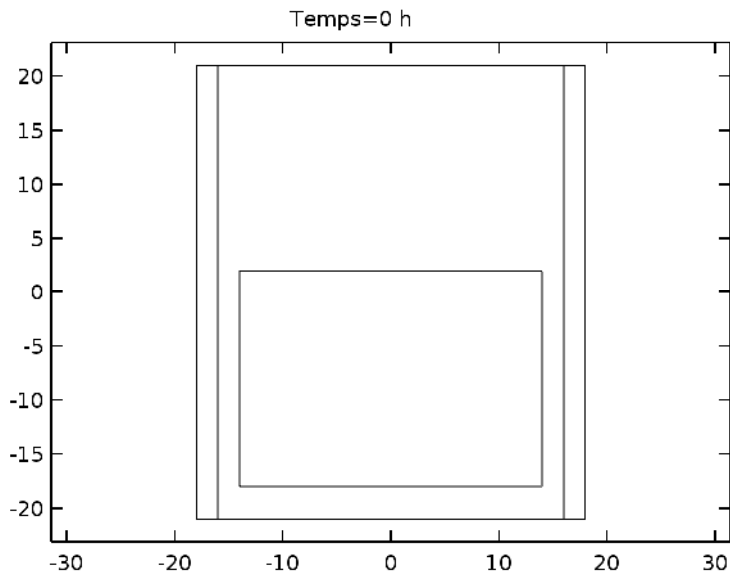
# Compte rendu

## 4.2.2 Isothermes (ht)



Temps=0 h Isovaleurs: Température (K)

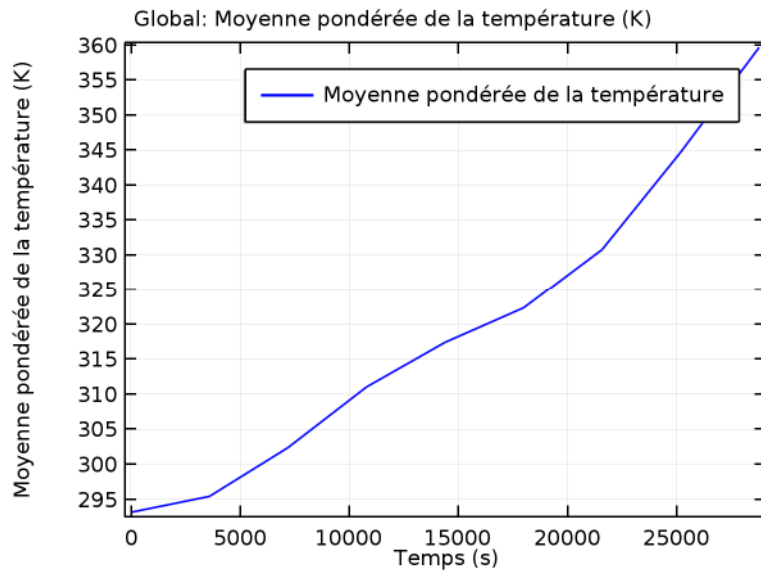
## 4.2.3 Groupe de graphiques 2D 3



Temps=0 h

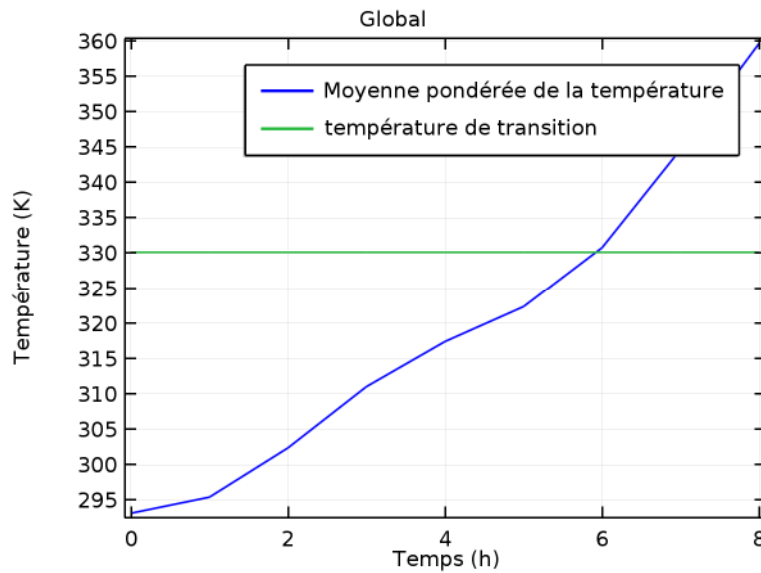
# Compte rendu

## 4.2.4 Groupe de graphiques 1D 4



Global: Moyenne pondérée de la température (K)

## 4.2.5 Groupe de graphiques 1D 5



Graphique ponctuel: Température (K) Global

## Sommaire

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| Résumé                      |   |
| Abstract                    |   |
| ملخص                        |   |
| Nomenclature                |   |
| Liste des figures           |   |
| Liste des tableaux          |   |
| Introduction générale ..... | 1 |

### Chapitre I : Recherche bibliographique

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| Recherche bibliographique ..... | 4 |
|---------------------------------|---|

### Chapitre II : Généralités sur le stockage et matériaux de changement de phase

|  |    |
|--|----|
| Introduction .....                         | 19 |
| I. Stockage d'énergie. ....                | 19 |
| 1- Les grands formes de stockage.....      | 19 |
| 1.1. Stockage de combustible .....         | 20 |
| 1.2. Stockage mécanique .....              | 20 |
| 1.3. Stockage hydraulique.....             | 21 |
| 1.4. Stockage électrochimique .....        | 21 |
| 1.5. Stockage de chaleur .....             | 21 |
| 1.5.1. Stockage thermochimique .....       | 22 |
| 1.5.2. Stockage chimique .....             | 23 |
| 1.5.3. Stockage par chaleur sensible ..... | 23 |

|   |    |
|---|----|
| 1.5.4. Stockage par chaleur latente .....                         | 25 |
| 2. Comparaison des différents types de stockage .....             | 27 |
| II. Matériaux à changement de phase (MCP) .....                   | 29 |
| 1. Les différents types de changement de phase .....              | 29 |
| 2. Types des matériaux à changement de phase .....                | 30 |
| 2.1. Les MCP inorganiques .....                                   | 30 |
| 2.2. Les MCP organiques .....                                     | 32 |
| 2.3. Les MCP eutectiques .....                                    | 34 |
| 3. Classification des matériaux à changement de phase .....       | 36 |
| 4. Etude comparative des composés organiques et inorganiques..... | 37 |
| 5. Base théorique des matériaux à changement de phase .....       | 38 |
| 5.1. Température de fusion .....                                  | 38 |
| 5.2. La cristallisation .....                                     | 40 |
| 6. Les problèmes liés au changement de phase .....                | 41 |
| 6.1. La ségrégation .....   | 41 |
| 6.2. La surfusion .....   | 41 |
| 6.3. La corrosion .....   | 43 |
| 7. Amélioration de la conductivité des MCP .....                  | 44 |
| 8. Propriétés des matériaux à changement de phase .....           | 44 |
| 8.1. Critères thermodynamiques .....                              | 45 |
| 8.2. Critères cinétiques .....                                    | 45 |
| 8.3. Critères chimiques .....                                     | 45 |
| 8.4. Critères économiques .....                                   | 45 |

|   |    |
|---|----|
| 9. Contexte industriel et l'intérêt du stockage de l'énergie thermique<br>à haute température ..... | 46 |
|---|----|

## **Chapitre III : Modélisation Mathématiques du phénomène de changement de phase**

|   |    |
|---|----|
| Introduction ... ..   | 49 |
| I. Les méthodes de discrétisation .....   | 49 |
| 1. Méthodes des volumes finis .....   | 49 |
| 2. Méthodes des différences finies .....  | 50 |
| 3. Méthodes des éléments finis .....  | 50 |
| II. Modélisation thermique de la théorie de la solidification (Problème<br>de Stefan) ..... | 50 |
| 1. Méthode à maillage mobile .....  | 53 |
| 2. Méthode à maillage fixe .....  | 54 |
| 2.1. Méthode de la capacité effective .....   | 55 |
| 2.2. Méthode enthalpique .....  | 56 |
| 2.3. Méthode de Cp variables .....  | 57 |

## **Chapitre VI : Présentation du logiciel et les équations de chaleur**

|  |    |
|--|----|
| Introduction .....   | 60 |
| 1. Model choisi .....  | 60 |
| 2. Position de problème .....  | 61 |
| 3. Formulation des équations réagissant le champ thermique<br>dans la cuve de stockage ..... | 62 |



|   |    |
|---|----|
| 3.1. Equation régissant la température de l'eau .....           | 62 |
| 3.2. Equation régissant la chaleur dans la paraffine .....      | 63 |
| 4. Présentation du logiciel.....                                | 65 |
| 4.1. Description du logiciel .....                              | 65 |
| 4.2. Présentation générale du logiciel .....                    | 65 |
| 4.3. Choix du modèle .....                                      | 66 |
| 4.4. Définition de la géométrie .....                           | 67 |
| 4.5. Introduction des propriétés des domaines.....              | 68 |
| 4.6. Introduction de la physique et conditions aux limites..... | 70 |
| 4.7. Maillage.....  | 73 |
| 4.8. Résolution du problème .....                               | 73 |
| Conclusion .....  | 74 |

## Chapitre V : Résultats & discussions

|  |            |
|--|------------|
| <b>Introduction .....</b>                          | <b>76</b>  |
| 1. Effet de dimension de la source de chaleur..... | 76         |
| 2. Effet de l'épaisseur du MCP.....                | 78         |
| 3. Le flux de chaleur volumique .....              | 80         |
| Compte rendu .....                                 | 84         |
| <b>Conclusion .....</b>                            | <b>99</b>  |
| <b>Références bibliographiques .....</b>           | <b>100</b> |

## Références bibliographiques

---

### Liste des références

- [1] : **Bransier (1979)**. Stockage périodique par chaleur latente. Aspect fondamentaux liée à la cinétique des transferts. Int.j.heat mass transfert. Vol. 22pp875-883.
- [2] : **Farid et Kanazawa (1989)**. Thermal performance of a heat storage module using PCMs with a different melting temperature : mathematical modeling ASME j solar energy Enj. Vol 111 pp.152-157.
- [3] : **Farid et cool (1990)**. Thermal performance of heat storage module using PCMs with different melting temperature : experimental, ASME j. solar Energy Eng. Vol 112,pp 125-132.
- [4] : **Farid et Husian (1990)**. An electrical storage heater using the phase change method of heat storage. Energy conversion and management 30 (3) : 219-230.
- [5] : **B.ANSAL (1992)**. An analytical study of a heat system in a cylinder solar energy.
- [6] : **Laouadi, Lacroix et Galanis (1994)**. Thermal performance of a planer latent heat energy storage unit with electric heat sources. Fundamentals of phase change : conf.organised by ASME. Chicago. Nov. 13-18.
- [7]: **Yaghi (1995 )**. Storage of thermal energy for effective use of waste heat from industries. Journal of Materials Processing Technology,48, pp. 739-804.
- [8] : **Mehmet Esen et Teoman Ayhan (1996)**. Development of a Modal Compatible With Solar Assisted cylindrical of Energy storage tank and variation of stored energy with time for Different phase change Materials. Energy Convers. Mgmt vol. 37,No.12.pp. 1775-1785.
- [9] : **Binet (1998)**. Etude de la fusion dans des enceintes munies de sources de chaleur discrète, thèse doctorale, université de Sherbrooke (Québec), Canada, 1998.
- [10] : **A. Benmansour et M.A. Hamdan(2001)**.  
Simulation du Stockage de l'Energie  
Thermique dans un Lit Fixe de Sphères Contenant un Matériau à Changement de Phase , Département de Chimie, Faculté des Sciences, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf d'Oran.
- [11]: **Suat Canbazog˘lua, Abdulmuttalip S,ahinaslana, Ahmet Ekmekyaparb,Y Go˘khan Aksoya, Fatih Akarsua(2004)**.  
Enhancement of solar thermal energy storage  
performance using sodium thiosulfate pentahydrate of a conventional solar water  
-  
heating system , a Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,  
I˘no˘nu˘ University.

## Références bibliographiques

---

- [12]: **C. Arkar, S. Medved (2005)**. Influence of accuracy of thermal property data of a phase change material on the result of a numerical model of a packed bed latent heat storage with spheres , University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering.
- [13] : **Abdeldjellil Benmansour (2007)**. Etude numérique du stockage de l'énergie thermique en lit multicouches , Laboratoire de Mécanique Appliquée, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran BP 1505 El - M'Naouer Oran, Algérie, Grenoble, 27-31 août.
- [14] : **T. Kousko, F. Strub, J. Castaing Lasvignottes, A. Jamil, J.P. Bédécarrats , Second law(2007)**. analysis of latent thermal storage for solar system, Laboratoire de Thermique e énergétique et Procédés, Avenue de l'Université.
- [15] : **Zouhir YOUNSI, Annabelle JOULIN, Laurent ZALEWSKI, Stéphane LASSUE, et Daniel ROUSSE(2009)**. 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, Lille.
- [16]: **Robynne Murray, Louis Desgrosseilliers, Jeremy Stewart, Nick Osbourne, Gina Marin, Alex Safatli, Dominic Groulx, Mary Anne White (2011)**. Design of a Latent Heat Energy Storage System Coupled with a Domestic Hot Water Solar Thermal System , Department of Mechanical Engineering, Dalhousie University, Halifax, Canada , May 2011.
- [17] : **Abdul Jabbar N. Khalifa , Kadhim H. Suffer, Mahmoud Sh. Mahmoud (2012)**. A storage domestic solar hot water system with a back layer of phase change material , Nahrain University, College of Engineering, Jadiriya, P.O. Box 64040, Baghdad, Iraq, Available online 23 June 2012 .
- [18] : **Radouane ElBahjaoui , Hamid El Qarnia et El Khadir Lakhal (2013)** Etude numérique d'un élément de stockage d'énergie par chaleur latente de fusion chauffé par un fluide en écoulement pulsé, Université Cadi Ayyad, Faculté des sciences Semlalia, Département de physique.
- [19] : **IBRAHIM H. A ILINCA, R YOUNÈS, J PERRON, T BASBOUS (2007)**, Study of a Hybrid Wind-Diesel System with Compressed Air Energy

## Références bibliographiques

---

Storage, Electrical Power Conference 2007, Renewable and Alternative Energy Resources, EPC2007, Montreal, Canada, October 25-26.

[20] : **Marie DUQUESNE (2013)**, résolution et réduction d'un modèle non linéaire de stockage d'énergie par adsorption sur des zéolithes, l'université de bordeaux.

[21] : **Cheik SECK**, analyse et modélisation du comportement thermique d'un système de préchauffage d'air neuf pour l'habitat intégrant un matériau à changement de phase, université d'Artois.

[22] : **Serge Blaise EKOMY ANGO (2011)**, Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers.

[23] : **Stéphanie HONGOIS (2011) (Ingénieur)** Stockage de chaleur inter-saisonnier par voie thermo-chimique pour le chauffage solaire de la maison individuelle, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1er avril.

[24] : **Amina Akrouche (2010\_2011)** Etude de stockage et déstockage d'énergie dans un matériau à changement de phase, Université de Pau des pays de l'Adour.

[25] : **B.Zelba, J.M.Martin, L F. Cabeza and Mehling (2003)**, Review on thermal energy storage with phase change materials, heat transfer analysis and applications. Applied Thermal Engineering 23 251-283.

[26] : **J.Taine et J.P.Petit (1995)**, cours et données de bases-transfert de chaleur MDF an isothermes , E d. Dunod.

[27] : **Alain bricad-Dominique Gobi (1986)**, Transmission de la chaleur, technique de l'ingénieur à 1570.

[28] : **A .Boumahrat et Gourdin**, Méthodes numériques appliquées, Réimpression 1993 Alger. Edition TEC et Doc- PARIS.

[29] : **A.N.KORTI (2000)**, Modélisation numérique du transfert de chaleur lors de la solidification des métaux, Mémoire de magister, Université Abou bekr belkaid, Algérie.

[30]: **D. G. R. Sharma, Krishnan M., Ravindran C. (2000)**, Determination of the rate of latent heat liberation in binary alloys, Materials Characterization 44, 309–320.

[31] : **J.S. Hasio (1985)**, An efficient algorithm for finite difference analyses of heat transfer with melting and solidification, Numerical heat transfer, vol 8, 653-666.

[32] : **s.v. patankar (1980)**, Numerical heat transfer and fluid flow, Hemisphere, Washinpto, DC 196.

[33]: **R.I. Issa,A.D. gosman, A.P.Watkins.**

## Références bibliographiques

---

[34]: **Rong-Tsonglce and Wu-Yao Chiou (1995)**, Finite element analyses of phase-change problem using multivel techniques, Numerical heat transfer, 277-290.

[35] : **Saib Hind (2009)**, Etude de simulation des phénomènes de transfert thermique lors de la solidification d'alliages, mémoire de magister.

[36] : **SARADA KURAVI (2006)**, Numérical study of encapsulated phase change material (EPCM) slurry flow in microchannels, M.S. University of Central Florida.

## Introduction générale

Généralement, toutes les formes des énergies du monde sont d'origine énergie solaire. Le pétrole, le charbon, le gaz naturel et le bois. Le soleil peut être classé comme une source d'énergie très importante.

L'énergie solaire reste la forme la plus exploitée dans le domaine du stockage. Il peut s'effectuer sous diverses formes, surtout sous forme de chaleur sensible (eau, huile, béton, céramique, etc.) ou sous forme de chaleur latente (eau, paraffines, sels, etc.).

Le stockage d'énergie sous forme de chaleur est beaucoup moins coûteux que sous forme électrique. Donc, vue l'importance d'énergie solaire, la place qu'elle peut occuper dans l'énergétique future, son stockage thermique économe et efficace, il est amplement justifié de concentrer les efforts de recherche pour améliorer le rendement du stockage des systèmes actuels et de chercher de nouvelles technologies de stockage.

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.

## Introduction générale

---

Dans le cadre de ce travail, on s'intéresse à l'étude numérique de stockage de l'énergie solaire par chaleur latent à l'aide d'un échangeur de chaleur.

La présente mémoire comporte cinq chapitres :

Le premier chapitre est une synthèse bibliographique sur les différentes utilisations de matériaux à changement de phase (MCP) et les techniques de stockage de l'énergie solaire.

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.

Une étude théorique sur la modélisation des phénomènes de changement de phase est présentée dans le troisième chapitre.

Dans le quatrième chapitre nous présentons le problème et les équations gouvernantes pour la résolution numérique ainsi que la méthode utilisée.

Les résultats obtenus d'une simulation numérique on utilisant le logiciel Comsol sont présentés dans le cinquième chapitre.

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

### L'état de l'art :

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 1967 **Tao** était le premier chercheur qui a résolu numériquement le problème de solidification dans une capsule, à lesquelles beaucoup de travaux ont référé.

**Pedrosso et Domoto (1973)** ont utilisé La technique des perturbations pour résoudre le problème de solidification d'un liquide saturé avec une température constante à la surface. La même technique (perturbation) a été utilisée pour un problème de solidification sphérique et cylindrique d'un liquide saturé pour un grand nombre de Stefan par **Riely** et ces collaborateurs (1974). Une année plus tard la même étude est reprise par **Huang et Shih**.

**Brasier (1979) [1]** est le premier qui a étudié analytiquement la solidification et la fusion cyclique d'un MCP.

**H.Reiger (1981)** a éludé la fusion d'un MCP autour d'un cylindre vertical, le transfert de chaleur conductive et convectif ont été mise en considération, les résultats numériques sont obtenue pour des nombres de Stefan très réduites  $0.005 < Ste < 0.08$ .

**Farid et Kanazawa (1989) [2]** et **Farid et cool (1990) [3]** ont étudié expérimentalement et analytiquement un élément de stockage d'énergie par chaleur latente constitue de plusieurs capsules cylindrique montées verticalement et fixes dans un tube isolé. Les capsules sont disposées en trois groupes contenant trois différents MCP.

Pendant la charge, de l'air chaud passe a travers les capsules de façon a ce que les températures de fusion des trois MCP décroissent dans la direction de l'écoulement.

Cependant, pendant la décharge, la direction de l'air est inversée. Les autres rapportent que le taux de transfert est amélioré pendant la charge et la décharge, et leur modèle numérique est en accord raisonnable avec l'expérience.



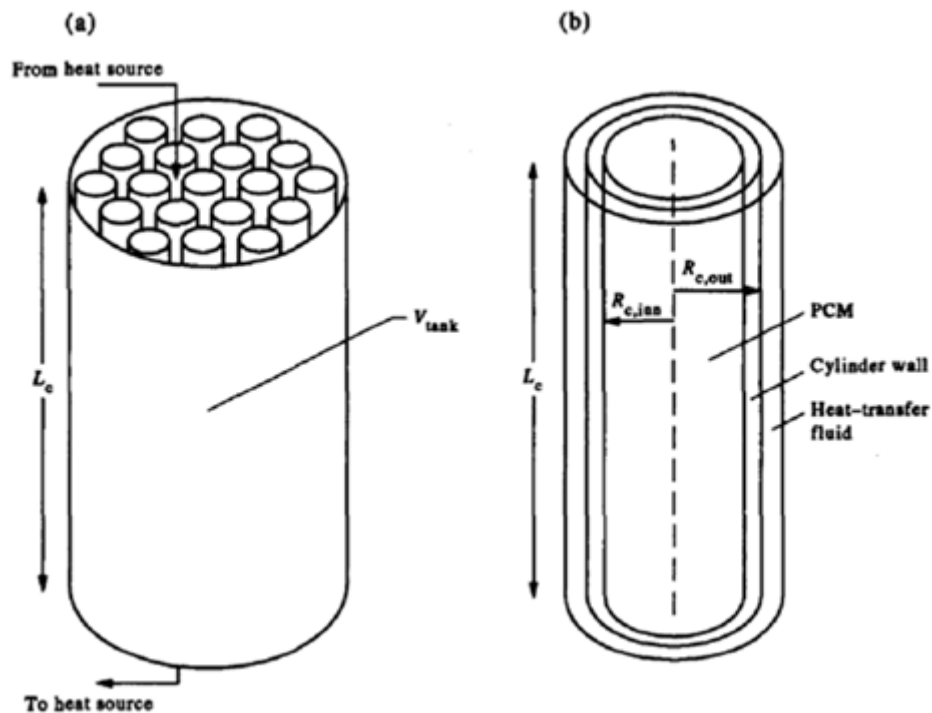
**Farid et Husian (1990) [4]** ont étudié expérimentalement et analytiquement un élément planaire qui consiste en plusieurs couches dans le MCP est fait par l'intermédiaire d'éléments électrique chauffants et de l'air circulant entre les couches permet le déstockage. Le transfert de chaleur à travers le MCP est supposé unidimensionnel justifié par le fait que l'épaisseur des couches est très faible devant leur hauteur. La convection naturelle dans la phase liquide a été prise en compte à l'aide d'une conductivité thermique équivalente calculée à partir de la conductivité de la phase en utilisant une corrélation ou les valeurs de deux constantes sont déterminées par comparaison entre des résultats expérimentaux et des résultats théorique. Les résultats montrent entre autre que 20% à 50% de la résistance thermique totale se trouve dans l'air de circulation suggérant qu'il faut autant que possible augmenter la turbulence dans l'air servant au stockage afin d'améliorer le transfert de chaleur.

**BANSAL (1992) [5]** a étudié également les éléments de stockage comme les MCP pour les capteurs solaires thermique. L'air intérieur circule dans l'élément de stockage pour être réchauffé ou refroidi selon le type de MCP.

**Laouadi, Lacroix et Galanis (1994) [6]** ont développé et utilisé un modèle basé sur la conduction unidimensionnel pour étudier les performances d'un accumulateur de chaleur plan d'un côté. Le stockage de chaleur s'effectue grâce à des résistances électriques chauffantes placés dans le MCP juste au dessous de l'isolant. Le déstockage vers l'environnement se fait par radiation et/ou par convection. Cette étude a montré que cette unité peut être chargé et déchargé deux fois par jours et pourrait donc servir pour déplacer les pics dus aux appels de puissance en période de pointe vers les heures creuses de la journée.

**Yaghi (1995) [7]** a utilisé la méthode enthalpique avec un schéma de changement de phase à très haute température (aux environs de 500°C) dans une sphère de 4cm de diamètre, avec une petite différences sur la condition à la surface. Ce qui se traduit par un échange convecto-radiatif.

**ESEN (1995)** a présenté la performance d'un réservoir cylindrique de stockage d'énergie solaire. L'énergie entrée posée comme chaleur latente de MCP et ce dernière est emballé dans les cylindres, les courants qui transfert la chaleur de fluides placent parallèlement à lui. La méthode enthalpique c'est La base du modèle.



**Figure 1.1.** Le vaisseau cylindre-plein (a) et le modèle pour un cylindre (b).

Ce modèle a montré que l'énergie d'entrée posée pas beaucoup plus de ces considérations, La matière du cylindre ne soit pas approprié parce que la conductivité thermique de la matière du cylindre est même petit, Le temps qui fondant MCP est allongé plus, les radius du mur du cylindre sont grands, La conductivité thermique de la matière du cylindre doit être beaucoup plus grande. Et ce type MCP doit être sélectionné avec soin pour optimiser la performance du réservoir. Les prédictions numériques sont validées avec expérimental données et seulement une analyse théorique a été présentée.

**Mehmet Esen et Teoman Ayhan (1996) [8]** dans ce travail, les performances d'une cuve de stockage cylindrique de l'énergie solaire sont étudiées théoriquement. Un modèle décrivant le comportement dynamique d'une unité de stockage thermique à changement de phase est utilisées. Le modèle numérique de la cuve de stockage thermique est décrit à court terme (journée). Dans le réservoir, l'énergie est stockée comme chaleur latente du matériau à changement de phase (MCP), qui est emballé dans des cylindres, et le fluide caloporteur s'écoule parallèlement à lui. Le modèle est basé sur la méthode enthalpique. Le système d'équations résultant est résolu en utilisant la méthode itérative de Gauss-Seidel. Des simulations sur ordinateur choisies sont

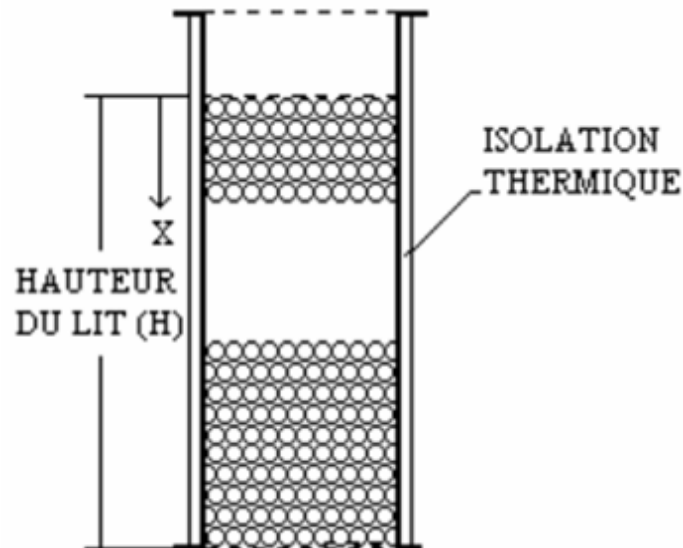
dessinées en fonction de quelques paramètres du modèle, et la capacité de stockage de chaleur pour les différents MCP, qui peuvent être employées en tant que matériaux de stockage de chaleur pour le chauffage domestique par des pompes à chaleur, étaient déterminées et comparées. Les résultats prouvent que le MCP, le rayon de cylindre, le débit d'écoulement de fluide, et la température à l'entrée de fluide doivent être choisis soigneusement afin d'optimiser les performances du réservoir.

**Binet (1998) [9]** a étudié la fusion avec convection naturelle d'un matériaux a changement de phase (MCP) dans une enceinte rectangulaire chauffée à l'aide de sources de chaleurs discrètes réparties le long des parois latérales conductrices. Un modèle numérique reposant sur les exposés. Une méthode de volumes de contrôle couplée à une formulation enthalpique (termes sources) pour le changement de phase est adoptée. L'effet de la dimension, de l'espacement, de la puissance et du nombre de sources de chaleur sur le phénomène de fusion est examiné. L'effet du rapport de forme de l'enceinte et des propriétés thermiques des parois est étudié.

**Ismail (2000)** a présenté une étude numérique pour examiner l'influence du rayon intérieur de la capsule, son épaisseur, ainsi que la température externe sur le processus de solidification d'un MCP dans une sphère. Le modèle, ne pris en compte que de la phase solide. L'analyse de l'effet de l'épaisseur a conduit à l'introduction du rayon critique défini comme  $r_c = k/h$  qui indique une valeur de laquelle la taille de la sphère et le flux seront inversement proportionnels.

**Benmansour (2001) [10]** a présenté une étude numérique du stockage de l'énergie thermique par chaleur latente à basses températures (0 °C à 100 °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 (Fig.1.2). 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.

L'évolution de la température à l'intérieur du lit a permis de déterminer les domaines de stockage les plus efficaces et de définir par conséquent les dimensions optimales de l'unité de stockage.



**Figure.1.2.** Schéma du lit de stockage.

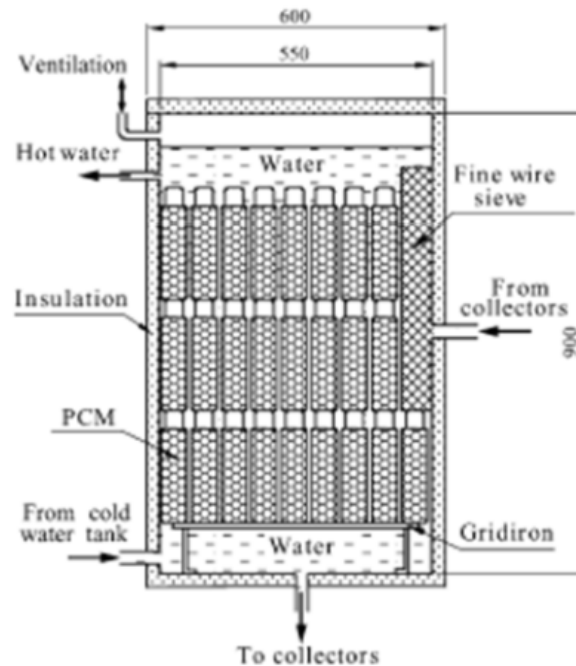
Ce modèle a permis de mettre en évidence l'influence des paramètres dynamiques et thermiques de l'air à l'entrée du lit et de montrer que la vitesse d'écoulement de l'air ainsi que le rapport hauteur/diamètre du lit avaient une influence notable sur le processus de stockage.

**Kurklu (2002)** a étudié les performances d'un capteur solaire thermique à eau intégrant un MCP pour l'eau chaude sanitaire. Le MCP est utilisé pour le stockage des quantités de chaleur en journée, isolé les canalisations du capteur solaire l'ambiance extérieure (à l'arrière du capteur) et pour limiter les baisses de température en restituant les quantités d'énergie pendant la nuit les hauteurs présentes des températures d'eau toujours supérieures à 30°C la nuit (pour des températures d'air extérieur entre 0°C et 10°C). Les capteurs ainsi développés sont également annoncés plus légers et moins coûteux que les capteurs traditionnels.

**Ismail** encore dans une autre publication (**2003**) a étudié l'influence de quelques paramètres sur la durée de la solidification complète d'un MCP dans une sphère. L'auteur a conclu que cette durée est proportionnelle à la taille de la sphère.

Cette étude a permis aussi de justifier le choix d'une enveloppe non métallique, car bien que la conductivité des matériaux est très élevée, son utilisation comme enveloppe ne peut réduire la durée de solidification complète que par 30 minutes environ.

**Suat Canbazoglu(2004) [11]** a présenté les variations temporelles des températures d'eau au milieu d'un réservoir de stockage de la chaleur avec un système eau-chauffant de solaire passif combiné avec matière du changement de phase hydrate du sodium MCP pour amélioration de performance du stockage de l'énergie thermique solaire du système par comparer avec ceux de système conventionnel qui n'inclut aucun MCP a été observé, le stockage du même système l'eau-chauffage solaire combinées avec plusieurs types de MCP.



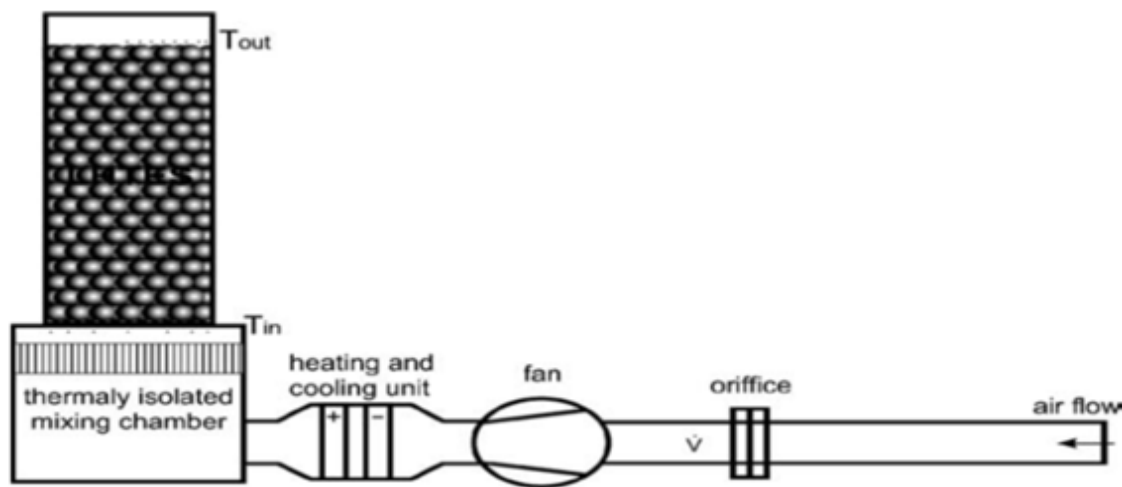
**Figure 1.3.** Croix d'un groupe du réservoir de la chaleur cylindrique associé avec MCP.

Le modèle montré que les systèmes d'énergie solaires combinés avec le MCP peuvent être utilisés pour le stockage de l'énergie thermique solaire, il a été observé que le temps moyenne mensuel arrosez la température au milieu du stockage le réservoir a diminué régulièrement d'ici jour jusqu'à la température de changement de phase de MCP après l'intensité de radiation solaire diminué puis c'était une valeur constante de 45 °C dans un temps période d'approximativement 10 h pendant la nuit jusqu'au soulèvement le temps du

soleil depuis que l'eau chaude n'est pas consommée, la température est une considérable différence qui expose la haute performance du stockage de la chaleur du système du stockage de la chaleur combiné avec MCP bien que les expériences aient été effectuées pendant novembre, C'est évident que les systèmes de l'eau-chauffage solaires passifs s'associé avec MCP sera capable d'exposer une meilleure performance dans les saisons de l'été à cause de la plus haute intensité de absorbé radiation solaire et les pertes de la chaleur inférieures du système, Les sels hydratés du la plus haute performance du stockage de l'énergie thermique solaire, les systèmes du stockage de l'énergie thermiques solaires s'associé avec MCP sera capable d'être utilisé efficacement et largement dans les applications pratiques, le coût inférieur et performance améliorée par améliorations technologiques. Le coût supplémentaire de le système solaire du stockage d'énergie thermique est compris MCP usagé dans le l'étude présente a été estimée comme américain 0.5\$ par l'unité de volume du réservoir de la chaleur dans le litre, c'est évident que l'usage de MCP dans le système ne peut pas causer une augmentation importante dans le coût.

**Lamberg (2004)** a présenté une méthode appelée la capacité thermique effective, cette méthode consiste à exprimer la capacité thermique lors du changement de phase, du MCP en fonction du degré de surfusion.

**Arkar (2005) [12]** a étudié la chaleur latente de stockage d'énergie thermique dans un cylindrique contenir des sphères remplies de la paraffine a été développé. Un lit a été adapté pour prendre en considération la non-uniformité du la porosité de MCP et la vitesse du fluide. La boîte prend aussi en considération les propriétés thermiques température-dépendantes du MCP. La distribution de la température de la chaleur latente de la paraffine (RT20) usagé dans l'expérience dans la forme de capacité de la chaleur apparente a été déterminée par une utilisation d'une analyse différentielle calorimètre (ADC) à chauffage différent et taux refroidissants.



**Figure 1.4.** Plan de la situation expérimentale.

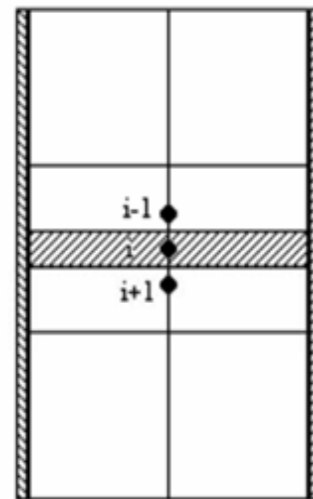
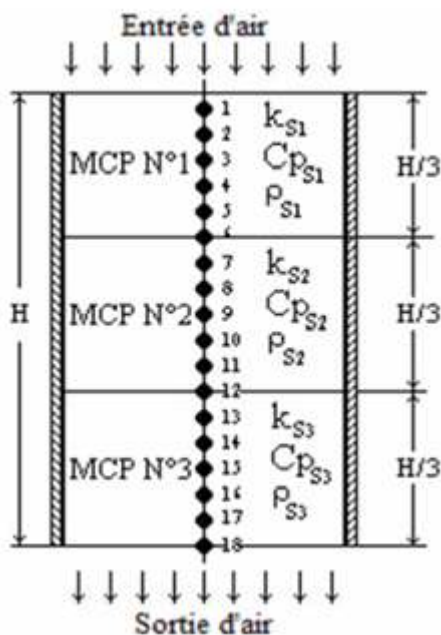
Le modèle a montré que la capacité de la chaleur apparente,  $C_{app}(T)$ , un paramètre qui décrit comme la chaleur latente du MCP évolue sur la gamme de la température, devrait inclure aussi un paramètre  $\theta$  influent supplémentaire qui chauffe ou taux refroidissant. La capacité de la chaleur apparente du RT20 la paraffine a été déterminée pour chauffage différent et taux refroidissants. La fonction polynomiale obtenue,  $C_{app}(T, \theta)$ , pour la fonte et solidification ont été intégrées dans le numérique modèle. Le taux de changement de température MCP était dans nos expériences aussi enquêté, et il a été trouvé que pour notre application sur faites la moyenne il ne dépasse pas 0.1 K / min. les propriétés thermiques de MCP devraient être déterminées par conséquent et devraient être citées pour chauffer et taux refroidissants qui sont semblables aux taux réels du changement de la température dans l'application.

**Wei (2005)** a fait une étude expérimentale et analytique sur MCP encapsulé dans quatre différentes capsules (sphérique, cylindrique, rectangulaire et tubulaire). L'auteur a examiné l'effet thermique de la géométrie et ces dimensions (l'épaisseur, la longueur caractéristique) et il a conclu que la sphère reste la géométrie privilégiée pour les échanges thermiques, puis avec un degré de performance décroissant le cylindre, le rectangle, et la capsule tubulaire.

**Kuznik (2006)** a montré que ce logiciel **CODYMUR** n'analyse que le comportement d'une paroi unique, il n'est pas possible d'avoir un couplage direct entre cette paroi et la température du local, il faudrait pour cela traiter le local dans son ensemble, tenir compte des apports thermiques par les fenêtres et ceux dus aux appareils de conditionnement. Cependant, l'analyse des flux

échangés avec le local côté intérieur de la paroi nous a permis de quantifier les énergies stockées et déstockées par la paroi dans une hypothèse probable d'évolution de la température intérieure. Ceci a conduit à déterminer l'épaisseur optimale de MCP à placer dans la paroi. Un autre logiciel CODYBA, qui traite du bâtiment dans sa globalité, devrait lui aussi être adapté pour tenir compte des MCP. Des études en prévision permettront de vérifier les évolutions libres obtenues pour une maison de structure légère et connaître ainsi l'incidence sur le gain de confort thermique.

**Abdeldjellil Benmansour (2007) [13]** à présente une étude numérique du stockage de l'énergie thermique par chaleur latente à basses températures (0 °C à 100 °C), dans un lit fixe multicouches composé de trois sections de hauteur égale. Chaque section contient un matériau de changement de phase MPC avec des températures de fusion différente rempli dans des sphères disposées de manière quelconque et traversé par un flux d'air.



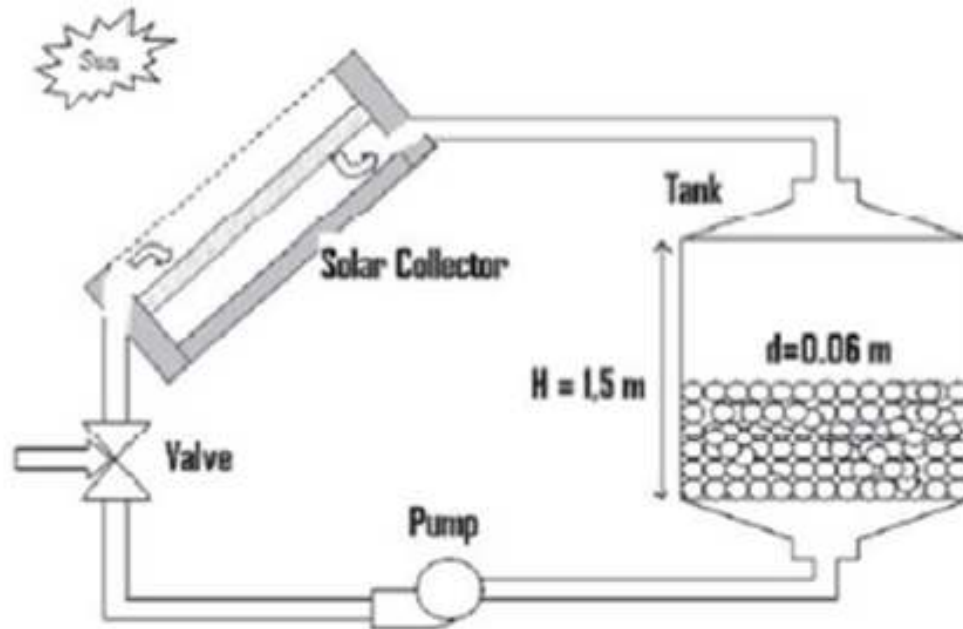
**Figure 1.5.** Lit de stockage multicouche.

**Figure 1.6.** Modèle physique.

Ce modèle a permis que l'utilisation de trois MCP au lieu d'un seul se traduise par un gain énergétique sensible en particulier pour les faibles débits, et peut être appliqué à un lit multicouches composé d'un nombre de section quelconque.



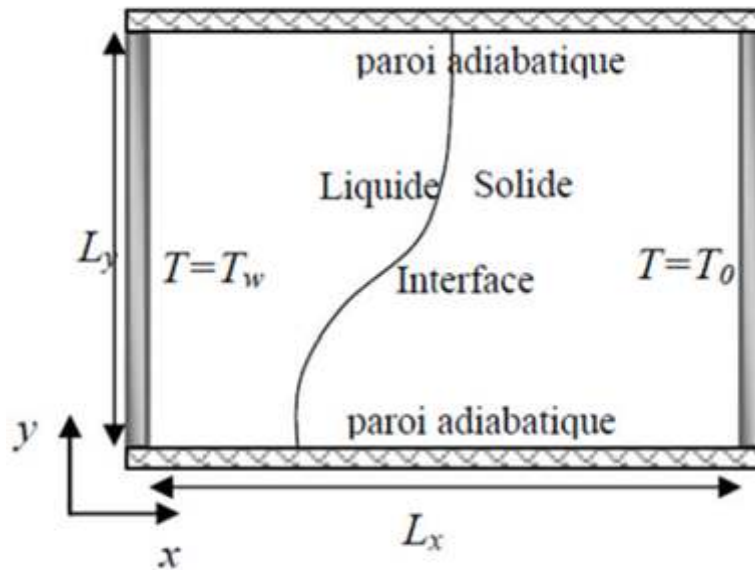
**Kousksou (2007) [14]** a présenté un système consiste un collecteur solaire chauffé l'air qui associé avec un réservoir cylindrique contient des capsules sphériques rempli d'un MCP.



**Figure 1.7.** Système solaire de changement de phase.

Ce modèle numérique a montré que l'efficacité thermique du système peut être considérablement améliorée pour une sélection adéquate de la température fondante du MCP, et peut réduire aussi l'irréversibilité à l'intérieur du système qui utilise MCP multiple. Le processus de la sélection pour le MCP devra être établi basé sur les conditions d'usage. Ce serait raisonnable de faire cette étude pour la période saisonnière réaliste et pas seulement pour les jours typiques choisis.

**YOUNSI (2009) [15]** a étudié l'intégration des éléments de MCP dans les murs solaires passifs. Le matériau à changement de phase étudié (MCP 27 sels hydratés) a un point de fusion situé à 27°C. Les échantillons fournis par le fabricant sont des éléments parallélépipédiques (briquettes) de dimensions 210, 140, 25 mm<sup>3</sup>. Géométrie qui semble bien adaptée à l'intégration dans un mur.

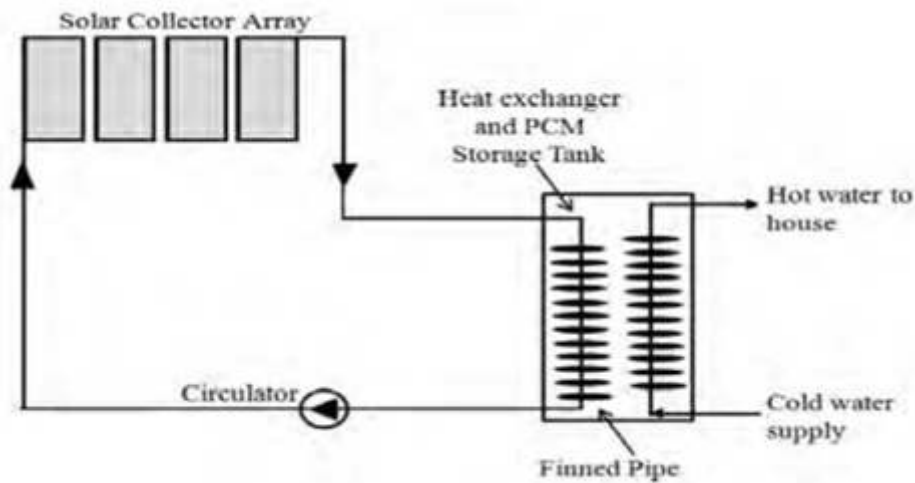


**Figure 1.8.** Schéma du problème.

L'objectif est d'étudier les caractéristiques thermiques du processus de fusion du MCP chauffé sur une paroi verticale d'une enceinte rectangulaire (Fig.1.1). Une formulation enthalpique est utilisée pour analyser le stockage par chaleur latente. La solution est obtenue en employant la méthode des volumes finis afin de comprendre la part de convection naturelle dans la fusion.

**Housseynatou Bah (2010)** fait une étude sur l'effet de l'épaisseur de la paraffine sur la performance d'un chauffe-eau solaire à changement de phase pour produire de l'eau chaude sanitaire. Formé de deux sections dont l'une est remplie de paraffine ( $52^{\circ}\text{C}$ - $54^{\circ}\text{C}$ ) et l'autre d'eau, ce type de capteur utilise le stockage combiné de chaleur sensible et de chaleur latente et peut être une alternative pour chauffe-eau traditionnel.

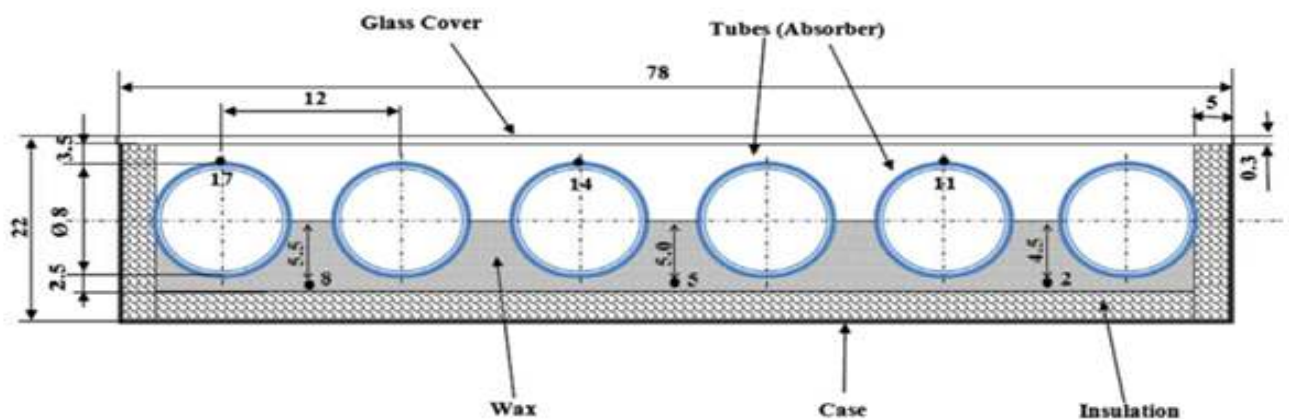
**Murray (2011) [16]** a présenté que l'eau chaude domestique solaire peut être utilisée pour réduire la facture d'énergie et les émissions du gaz de la serre associé avec chauffer l'eau domestique. Cependant, une des barrières les plus considérables à déploiement supplémentaire d'applications thermiques solaires est l'espace et le poids exigé pour stockage de l'énergie rassemblé. Les matériaux à changement de phase MCP sont avantageuses pour stockage de l'énergie journalière avec leur haute densité de stockage et opération isotherme pendant transitions de la phase, et contournerait ces problèmes.



**Figure 1.9.** Système de stockage solaire par chaleur latente.

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.

**Abdul Jabbar N (2012) [17]** a étudié un stockage d'un collecteur solaire qui consiste en pipes du cuivre relié en série est intégré avec un arrière récipient de paraffine solide comme un MCP moyens du stockage thermiques. Pour montrer la possibilité du stockage l'énergie solaire pour un chauffage d'eau.

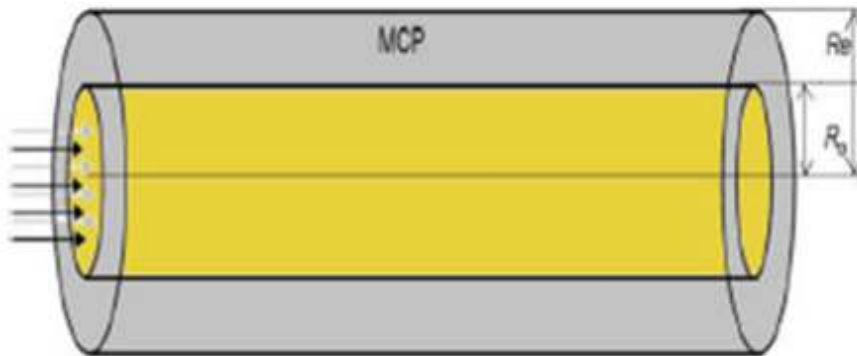


**Figure 1.10.** Système de stockage.

Ce modèle a montré un système s'est refroidi et le MCP liquide a transféré la chaleur à l'eau circulante comme une chaleur utile jusqu'à ce que le MCP ait solidifié, l'eau continue recevoir la chaleur après que le coucher de soleil comme le MCP agisse comme une source de la chaleur. La variation de la plaque moyenne et températures de la cire avec le temps montré une tendance semblable pour les jours clairs de janvier et février, pendant que la température de la cire était pour le jour semi-nuageux de mars trouvez pour être plus grand que la température de l'amortisseur qui signifie le capacité du stockage du MCP. Variation presque stable dans le système l'efficacité utile est remarquée pour tous les mois.

**MAKHLOUF (2013)** a montré que le composite paraffine/bentonite est préparé comme un matériau de stockage d'énergie thermique à forme stabilisée pour les applications de stockage d'énergie dans le bâtiment. Ce composite a été préparé par la méthode dite dispersion de la poudre dans le MCP fondu. Le pourcentage maximal massique de la paraffine adsorbée dans la bentonite est de 45,9 %. Ce composite MCP à forme stabilisée a été caractérisé par les techniques d'analyse MEB, FT-IR, et DSC. Les observations au MEBE ont montré que la paraffine a été bien retenue dans la Bentonite, utilisées comme support de stockage. Les résultats FT-IR ont montré l'existence d'une bonne compatibilité chimique entre le MCP et les composants du matériau composite. Les résultats d'analyse par DSC des composites MCP/Be, dont la température de début de fusion est de 49 °C avec une chaleur latente de 90 J/g, est appropriée pour des applications de stockage d'énergie

**El Bahjaoui (2013) [18]** à présent une étude numérique d'un élément de stockage d'énergie par chaleur latente de fusion d'un matériau à changement de phase MCP, la n-octadécane. L'élément de stockage d'énergie est constitué de deux tubes concentriques. L'espace annulaire de ceux-ci est rempli de MCP. Celui-ci est chauffé par un fluide caloporteur (Eau) en écoulement pulsé dans le tube intérieur.



**Figure 1.11.** Modèle physique étudié.

Ce modèle permis l'importance d'un écoulement pulsé par rapport à un écoulement de Poiseuille, pour favoriser la fusion du matériau à changement de phase pour certaines conditions satisfaites par la fréquence et l'amplitude adimensionnelles de l'écoulement pulsé. Les investigations numériques menées ont permis de dégager les résultats suivants :

- Pour une amplitude adimensionnelle relativement élevée et une fréquence adimensionnelle faible ( $W \rightarrow 0$ ), l'utilisation d'un fluide caloporteur en écoulement pulsé est favorable pour le stockage thermique.
- Un nombre de Reynolds élevé est favorable pour le transfert de chaleur et contribue à la réduction de la durée de fusion du MCP pour les faibles valeurs de la fréquence adimensionnelle et les valeurs élevées de l'amplitude adimensionnelle.
- Pour une fréquence adimensionnelle très élevée, l'utilisation d'un fluide caloporteur en écoulement pulsé au lieu d'un fluide en écoulement de Poiseuille est sans utilité.

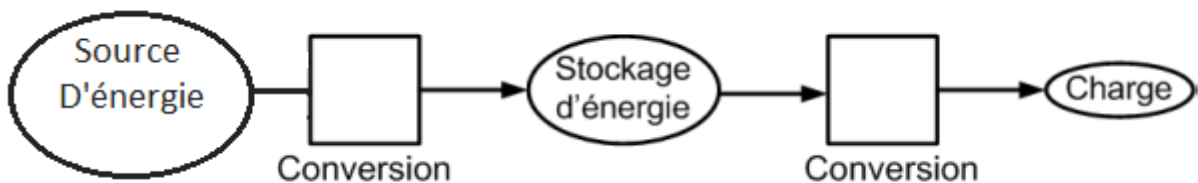
## Introduction :

Dans une société où la demande en énergie devient de plus en plus grande et où les énergies intermittentes, solaire, éolienne, nucléaire, etc. prennent de plus en plus de place, le besoin de stocker l'énergie produite est très présent.

### I. stockage d'énergie :

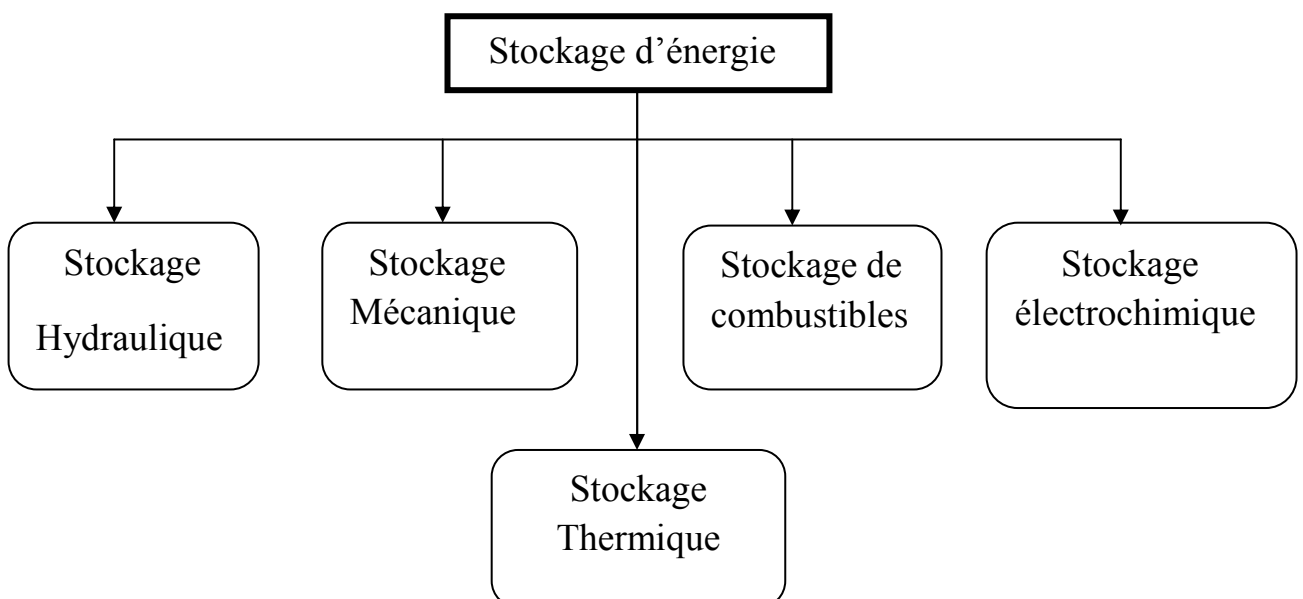
Le concept de « stockage d'énergie » est d'apporter de la flexibilité et de renforcer la fiabilité des systèmes énergétiques. Il s'agit d'équilibrer dans le temps l'offre et la demande en énergie.

Afin de pouvoir stocker l'énergie, il faut d'abord la transformer sous une forme emmagasinable, puis la retransformer afin de pouvoir en disposer selon la charge. La figure 3.1 illustre ce principe.

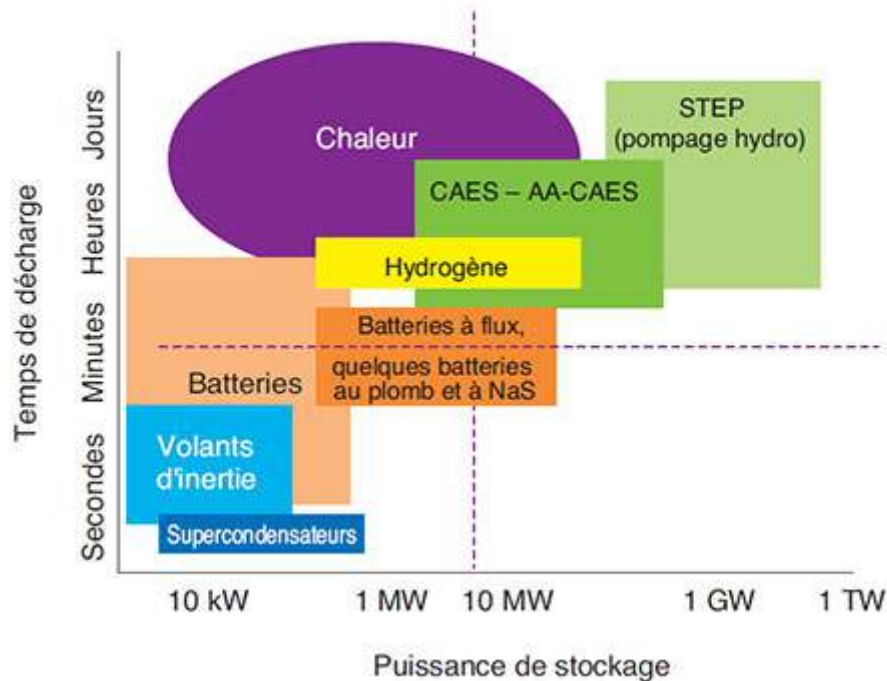


**Figure 2.1.** Chaîne de conversion de l'énergie nécessaire pour le stockage [IBRH 2007]

#### 1. Les grandes formes de stockage :



Les différentes technologies de stockage en fonction de leur puissance et du temps de décharge (autonomie)



Source : IFPEN d'après diverses sources

**Figure 2.2.** Les grandes formes de l'énergie.

## 1.1 Stockage de combustible :

La combustion restant le processus énergétique le plus courant, c'est le stockage le plus développé. Tous les États disposent de stocks stratégiques de pétrole et charbon, mais même en excluant ces éléments fossiles, il faut rappeler l'importance pratique du bois-énergie, dont on fait des stocks pour l'hiver, et le développement des agro carburants.

## 1.2 Stockage mécanique :

C'est un élément pratiquement obligatoire dans tous les moteurs, sous forme de volant d'inertie, pour réguler le mouvement à des échelles de temps très courtes, inférieures à la seconde. Il n'est pratiquement pas utilisé pour le stockage à long terme.

### **1.3. Stockage Hydraulique :**

La remontée d'eau dans des barrages quand il y a surproduction d'électricité est déjà très utilisée pour la régulation et l'équilibrage des réseaux électriques (systèmes dépompage-turbinage). Son utilisation est envisagée par certains experts pour compenser l'irrégularité de la production des énergies éolienne et solaire.

### **1.4. Stockage électrochimique :**

À plus faible échelle, le stockage d'énergie en vue de la production d'électricité (électrochimique dans les piles et les batteries, électrique dans les condensateurs) est bien moindre en termes de quantité d'énergie, mais très important sur le plan pratique. De nouvelles approches et de nouvelles batteries associées à un système "intelligent" de gestion de l'énergie, permettent de doper le stockage d'électricité intermittente (solaire, éolienne), pour stocker et auto consommer jusqu'à plus de 75 % de la production d'électricité photovoltaïque d'une maison équipée de modules photovoltaïques .

### **1.5 Stockage de chaleur :**

Au moment où l'on parle de plus en plus d'environnement et de rationalisation de l'exploitation des ressources énergétiques, le stockage de l'énergie thermique se présente comme une solution particulièrement intéressante puisqu'il permet de dissocier l'utilisation de la production de l'énergie.

Les différents types de stockage ont donc été développés afin d'emmagasiner de l'énergie pendant une période où elle est abondante et/ou moins coûteuse (solaire, tarifs de nuit...) pour l'utiliser pendant une période durant laquelle elle est rare ou plus chère. Les types existants se différencient selon l'application visée (bâtiments, usages industriels, transports) mais aussi par les réactions Physico-chimiques (stabilité chimique, absence de décomposition et corrosion...) et thermodynamiques (température de fusion, capacité calorifique, conductivité thermique...) inhérentes aux capacités des matériaux utilisés à cette



## Généralité sur le stockage et matériaux de changement de phase

---

fin. Les différents types de stockage appliqués aux bâtiments sont présentés dans la sous section suivante afin de sélectionner ensuite le système de stockage à modéliser [14].

Essentiellement trois modes de stockage thermique peuvent être envisagés:

- le stockage par chaleur sensible qui exploite la capacité calorifique d'un matériau.
- le stockage par chaleur latente qui consiste à utiliser la transformation solide – liquide d'un Matériau à Changement de Phase (MCP).
- le stockage thermochimique qui exploite la chaleur de sorption mise en oeuvre dans des processus physico-chimiques renversables d'absorption exothermique et de désorption endothermique d'un gaz sur un milieu absorbant.

### 5.1. Stockage thermochimique :

Le stockage thermochimique s'appuie sur un mécanisme physico-chimique réversible :



Le matériau AB absorbe de la chaleur ce qui engendre l'apparition des deux composants A et B, distincts, pouvant être stockés séparément. Ce phénomène endothermique est appelé la charge, phase de stockage de chaleur. Inversement, la mise en contact des composants A et B provoque la formation d'un composant AB et la libération de chaleur. Ce phénomène exothermique correspond à la décharge, phase de restitution de chaleur. Chaque système faisant appel au stockage thermochimique possède un cycle de fonctionnement s'articulant en ces deux étapes de charge et de décharge. Les matériaux associés à ce type de stockage sont primordiaux car l'efficacité des systèmes en dépend. Ils peuvent être séparés en trois catégories, explicitées dans le tableau (2.5). [14]

| Adsorbants organiques           | Adsorbants minéraux | Autres adsorbants             |
|---------------------------------|---------------------|-------------------------------|
| Charbons actifs                 | Gels de silice      | Polymères synthétiques        |
| Tamis moléculaires carbonés     | Alumines activées   | Heatsorp                      |
| Nanomatériaux carbonés          | Zéolithes           | Sulfure de sodium             |
| Fullerènes et hétéro-fullerènes | Etrangéité          | Matériaux nanoporeux hybrides |
| Micro-perles de méso-carbone    | Oxydes de métal     |                               |

**Tableau 1.** Matériaux Adsorbants. [14]

### 5.2. Stockage chimique :

Le stockage d'énergie par réactions chimiques est un procédé lors duquel les molécules d'adsorbat sont fixées par liaison covalente à la surface de l'adsorbant provoquant l'irréversibilité du mécanisme. Ce type de stockage consiste par exemple à utiliser l'énergie solaire pour initier une réaction chimique endothermique. La chaleur est stockée au sein du système et peut être restituée souvent à l'aide d'un catalyseur. Les réactions précédentes présentent toutes des densités énergétiques intéressantes et peuvent être utilisées pour des applications aux bâtiments. Ce pendant, la partie endothermique est souvent assez complexe et peut nécessiter d'être réalisée dans un environnement industriel.

### 5.3. Stockage par chaleur sensible :

Dans le stockage par chaleur sensible, l'énergie est emmagasinée sous la forme d'une élévation de température du matériau de stockage au sein d'un système fermé au sens thermodynamique, c'est-à-dire sans échange avec le milieu extérieur. L'expression de la chaleur sensible pouvant être stockée découle du premier principe de la thermodynamique équation (2.1) :

$$Q_{stocké} = m C_p \Delta T \quad (2.1)$$

## Généralité sur le stockage et matériaux de changement de phase

---

Avec  $Q$  stockée, la chaleur sensible ( $J$ ),  $m$ , la masse du matériau de stockage ( $kg$ ),  $C_p$ , la chaleur massique du matériau ( $J.kg^{-1}K^{-1}$ ),  $\Delta T$ , la différence entre températures moyennes finale et initiale ( $K$ ). La quantité d'énergie stockée est donc proportionnelle à la masse, à la capacité calorifique et à la différence de températures entre l'entrée et la sortie du matériau de stockage.

Les matériaux de stockage par chaleur sensible se divisent en deux catégories : les liquides, comme l'eau, l'huile, les sels fondus etc., et les solides, tels que la pierre, la brique, le sable etc. Par exemple, l'eau liquide à pression atmosphérique et à  $20^\circ C$  a une grande capacité calorifique ( $4185 J.kg^{-1} K^{-1}$ ). De plus, son accessibilité, la disponibilité immédiate d'eau chaude, son prix, sa fiabilité et sa non toxicité font du stockage par chaleur sensible de l'eau le plus répandue. Cependant, des inconvénients majeurs interviennent en sa défaveur puisque ce type de stockage est limité par :

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

De nombreuses applications de ce type de stockage existent dans le secteur du bâtiment. Les matériaux entrant en jeu dans le stockage par chaleur sensible sont stockés dans des réservoirs de natures différentes comme des cuves de petites ou grandes tailles (notamment des ballons d'eau chaude), dans des systèmes de stockage souterrain, en aquifère artificiel, ou encore dans des matériaux spéciaux : matériau utilisé pour fabriquer des briques réfractaires à haut pouvoir d'accumulation). [20]

## Généralité sur le stockage et matériaux de changement de phase

Certaines propriétés des substances utilisées comme matériaux de stockage de chaleur sensible sont dans le **tableau 2**.

| <b>Matériaux</b> | <b>Densité<br/>(kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Chaleur<br/>spécifique<br/>(J/kg.K)</b> | <b>Capacité<br/>thermique<br/>volumique<br/>(J/m<sup>3</sup>.K)</b> |
|------------------|---------------------------------------|--|---|
| <b>Argile</b>    | 1458                                  | 879  | 1.28  |
| <b>Briques</b>   | 1800                                  | 837  | 1.51  |
| <b>Grés</b>      | 2200                                  | 712  | 1.57  |
| <b>Bois</b>      | 700                                   | 2390                                       | 1.67  |
| <b>Béton</b>     | 2000                                  | 880  | 1.76  |
| <b>Verre</b>     | 2710                                  | 837  | 2.27  |
| <b>Aluminium</b> | 2710                                  | 896  | 2.43  |
| <b>Ferre</b>     | 7900                                  | 452  | 3.57  |
| <b>Acier</b>     | 7840                                  | 465  | 3.68  |
| <b>Eau</b>       | 988                                   | 4182                                       | 4.17  |

**Tableau 2.** Propriétés des matériaux de stockage de la chaleur sensible à 20°C.

### 5.4. Stockage par chaleur latente :

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

$$Q_{\text{latente}} = m L_s$$

Avec  $m$ , la masse du matériau de stockage ( $kg$ ) et  $L_s$  la chaleur massique de changement d'état du matériau ( $J.kg^{-1}$ ). [20]

## Généralité sur le stockage et matériaux de changement de phase

---

### L'évolution de la température au cours d'un processus de stockage-déstockage de l'énergie :

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

$$\Delta H = \int_{T_1}^{T_f} m C_s (T) dT + mL + \int_{T_f}^{T_2} m C_l (T) dT$$

Avec :  $L$  : chaleur latente de changement de phase

$C_s(T)$  : chaleur spécifique du corps à l'état solide

$C_l(T)$  : chaleur spécifique du corps à l'état liquide

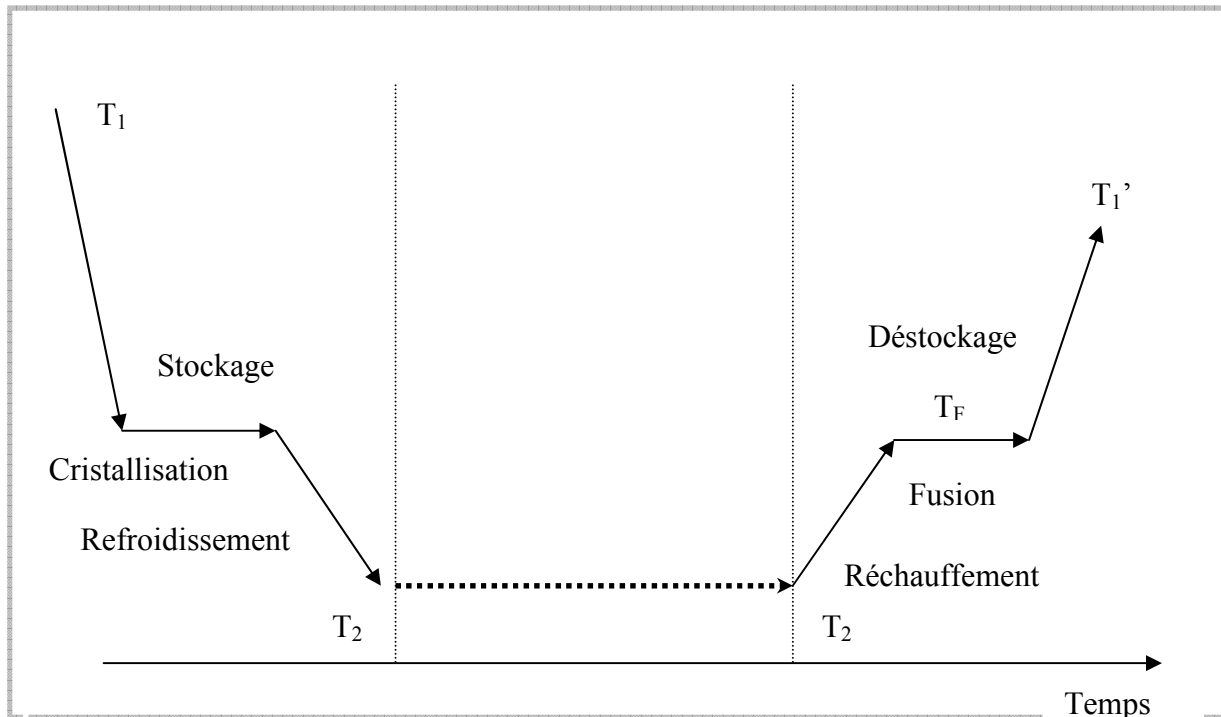
On retrouve dans l'équation (1.3) des termes de chaleur sensible en plus du terme  $mL$  représentant la chaleur latente due à la masse  $m$ . Il faut surtout remarquer que le terme due à la chaleur latente est beaucoup plus important que les termes de chaleur sensible. Par exemple si on réchauffe 1 kilogramme de glace de  $-1^\circ\text{C}$  à  $+1^\circ\text{C}$ , avec :

$$C_s = 2176 \text{ J/(K.kg)}$$

$$C_l = 4185 \text{ J/(K.kg)}$$

$$L = 334800 \text{ J/kg}$$

On stocke une quantité d'énergie égale à 341161J. Pour stocker la même énergie en réchauffant à partir de  $0^\circ\text{C}$  la même quantité d'eau. Il faudrait la porter à  $81,5^\circ\text{C}$ .



**Figure 2.3.** Evolution de la température au cours d'un processus de stockage-déstockage de l'énergie.

L'implantation d'un élément de stockage d'énergie par chaleur latente se fait en trois principales étapes :

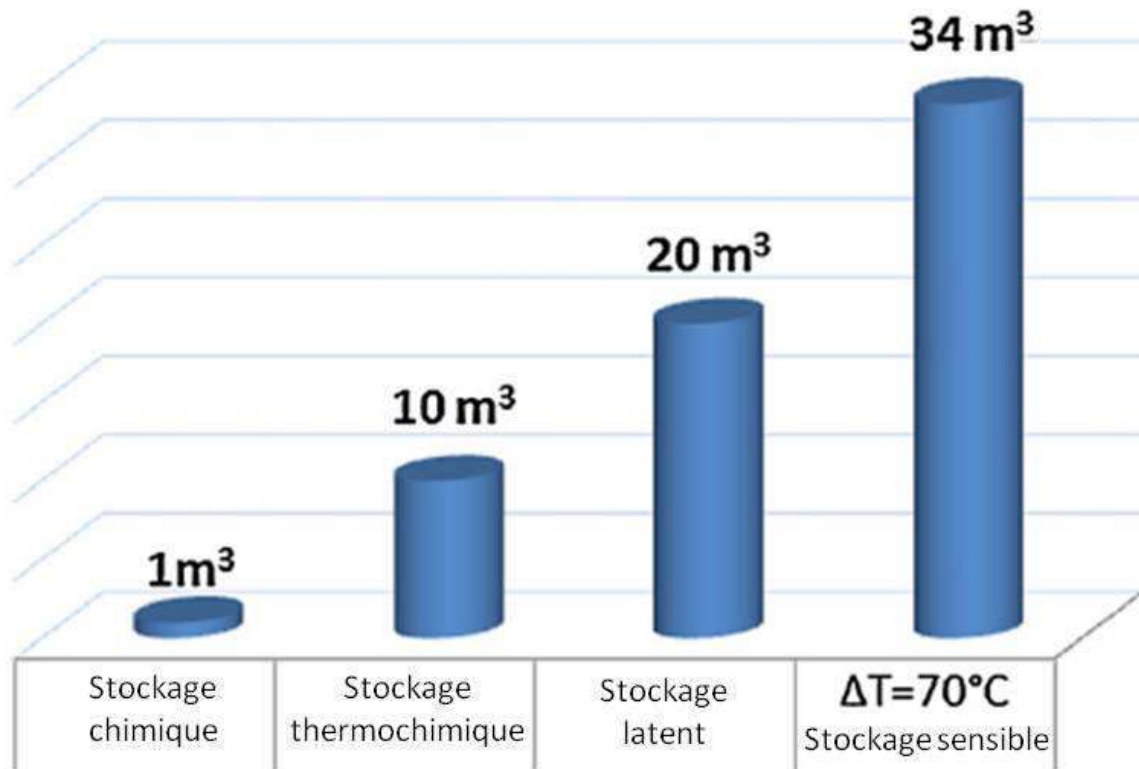
- choix d'un MCP,
- choix d'un contenant
- et choix d'un échangeur thermique

### 2. Comparaison des différents types de stockage :

D'un point de vue économique, l'évaluation nécessite de prendre en compte le coût d'investissement mais aussi les coûts d'exploitation, de maintenance et de recyclage d'un système de stockage. Le volume de ce dernier est souvent la variable prépondérante de cette évaluation car il induit des coûts en termes d'isolation et en raison de la quantité de matériaux mobilisés. Dans, les différents types de stockage ont été comparés grâce au calcul des volumes de stockage nécessaires pour emmagasiner une énergie de 6,7 MJ. La Fig.2.9.

## Généralité sur le stockage et matériaux de changement de phase

Illustre cette comparaison. Les densités entrant en jeu dans le stockage par chaleur sensible sont faibles. Les volumes sont donc grands comme le montre la Fig.2.9. Ceci est un inconvénient pour l'application visée.



**Figure 2.4.** Volume requis pour le stockage de 6,7 MJ

Comparativement au stockage par chaleur sensible, la capacité de stockage de l'énergie thermique des MCP est plus grande donc nécessite moins de volume. Le stockage thermique par changement de phase est efficace pour des différences de températures faibles et si les périodes de charge et de décharge se succèdent à température constante. Par contre, il présente un coût d'investissement plus élevé. Par ailleurs, la faible conductivité thermique des matériaux implique des phases lentes de charge et de décharge, en particulier pour les MCP organiques. Ils présentent également un risque de perte de stabilité de la solution. La Fig. 2.10 présente la densité énergétique en fonction de la température pour les différents types de stockage existants. Ce graphe permet de corroborer nos propos précédents. En effet, les stockages par chaleur

## Généralité sur le stockage et matériaux de changement de phase

---

sensible et latente sont réversibles mais leurs densités de stockage sont inférieures à celles des stockages thermo-chimique et chimique.

### II. Matériaux à changement de phase (MCP) :

L'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) pour le stockage d'énergie thermique a suscité un regain d'intérêt ces dernières années. Cela est dû au fait que les MCP ont de fortes densités de stockage (quantité d'énergie stockée par unité de masse). En outre, ces matériaux peuvent être appliqués dans plusieurs domaines. [21]

#### 1. Les différents types de changement de phase :

Les MCP peuvent subir quatre types de changement de phase :

- solide-solide (peu utilisé pour le stockage d'énergie), ce changement de phase se traduit par une transformation structurelle liée à une variation du volume molaire donc à une variation des distances inter atomiques du matériau,
- liquide-gaz (grande chaleur de transformation mais associée à un changement de volume conséquent donc peu utilisé),
- liquide-solide (faible volume associé à une petite plage de températures et grande capacité de stockage donc le plus utilisé),
- solide-gaz (généralement développé dans le cas des systèmes d'air conditionné et de réfrigération). [20]



| Caractéristique       | Solide-solide               | Solide-liquide | Liquide-gaz   |
|-----------------------|-----------------------------|----------------|---------------|
| Température de fusion | Hors application            | Grande plage   | Élevée        |
| Changement de volume  | Négligeable                 | Léger          | Très élevée   |
| Matériaux disponibles | Peu de matériaux identifiés | Oui            | Oui           |
| Technologie à point   | Non                         | Oui            | Plus ou moins |

**Tableau 3.** Résumé des trois types de MCP.

### 2. Types des matériaux à changement de phase (MCP) :

Parmi les MCP subissant cette transformation, nous avons trois groupes de matériaux : les inorganiques, les organiques et les eutectiques. [22]

#### 2.1. Les MCP inorganiques:

Les matériaux ou les substances inorganiques ont une température ou une plage de températures de fusion comprise entre  $-100\text{ °C}$  et  $+1000\text{ °C}$ . Les plus utilisés sont : l'eau (température de fusion  $0\text{ °C}$ ), les solutions aqueuses de sel (température de fusion inférieure à  $0\text{ °C}$ ), des sels hydratés (température de fusion comprise entre  $5\text{ °C}$  et  $130\text{ °C}$ ), des mélanges de sels, des mélanges de métaux (température de fusion supérieur à  $150\text{ °C}$ ). Ils ont plusieurs avantages : ils ont une chaleur latente importante et une haute conductivité thermique. Ils ont une fusion nette (c'est-à-dire une plage de fusion étroite). Ils sont non-inflammables et ils ont un coût d'investissement abordable. Ils sont en général facilement disponibles. Les problèmes majeurs rencontrés lors de leurs utilisations sont en rapport avec la ségrégation, la corrosion et la surfusion nécessitant ainsi l'utilisation d'agent de nucléation afin d'être fiables. [22]

## Généralité sur le stockage et matériaux de changement de phase

| <b>Composant</b>  | <b>Point de fusion (°C)</b> | <b>Chaleur de fusion (kJ/kg)</b> | <b>Conductivité thermique (W/m.K)</b> | <b>Densité (kg/m<sup>3</sup>)</b>                |
|---|-----------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|--|
| H <sub>2</sub> O  | 0                           | 333                              | 0.612                                 | 988(liquide,20°C)<br>996(30°)<br>917(solide,0°C) |
| LiClO <sub>3</sub> -3H <sub>2</sub> O                             | 8.1                         | 253                              | n.d                                   | 1720   |
| KF-4 H <sub>2</sub> O   | 18.5                        | 231                              | n.d                                   | 1447(liquide,20°C)<br>1455(solide,18°C)          |
| Mn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> -6H <sub>2</sub> O              | 25.8                        | 125.9                            | n.d                                   | 1728(liquide,40°C)<br>1795(solide,5°C)           |
|   | 29                          | 190.8                            | 0.540(liquide,38.7°C)                 | 1562(liquide,32°C)                               |
| CaCl <sub>2</sub> -6 H <sub>2</sub> O                             | 30                          | 296                              | n.d                                   | n.d  |
| LiNO <sub>3</sub> -33 H <sub>2</sub> O                            | 32.4                        | 254                              | 0.544                                 | 1458(solide)                                     |
| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -10 H <sub>2</sub> O              | 33                          | 247                              | n.d                                   | 1442   |
| H <sub>2</sub> O  | 34                          | 115.5                            | n.d                                   | 1956(liquide,35°C)                               |
| Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -10H <sub>2</sub> O               | 35.5                        | 265                              | n.d                                   | 2194(solide,24°C)<br>1522                        |
| CaBr <sub>2</sub> -6 H <sub>2</sub> O                             | 36                          | 146.9                            | 0.464(liquide,39.9°C)                 | 1828(liquide,36°C)                               |
|   | 48                          | 201                              | n.d                                   | 1600(solide)                                     |
| Na <sub>2</sub> HPO <sub>2</sub> -12H <sub>2</sub> O              | 58                          | 264                              | n.d                                   | 1450   |
| Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> -6 H <sub>2</sub> O             | 64.3                        | 227.6                            | n.d                                   | 1690   |
| H <sub>2</sub> O  | 70                          | 184                              | n.d                                   | n.d  |
| Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -5 H <sub>2</sub> O | 78                          | 265.7                            | 0.653(liquide,85.7°C)                 | 1937(liquide,84°C)                               |
| H <sub>2</sub> O  | 89                          | 162.8                            | 0.490(liquide,95°C)                   | 1550(liquide,94°C)                               |
| Na(CH <sub>3</sub> COO)-  | 95                          | 269                              | n.d                                   | n.d  |

## Généralité sur le stockage et matériaux de changement de phase

|   |     |       |                      |                     |
|---|-----|-------|----------------------|---------------------|
| 3 H <sub>2</sub> O                      |     |       |                      |                     |
| NaOH                                    | 117 | 168.6 | 0.570(liquide,120°C) | 1450(liquide,120°C) |
| NaP <sub>2</sub> O <sub>7</sub> -10     | 307 | 172   | 0.5                  | 2260                |
| H <sub>2</sub> O                        | 333 | 266   | 0.5                  | 2110                |
| Ba(OH) <sub>2</sub> -8                  | 380 | 149.7 | 0.5                  | 2044                |
| H <sub>2</sub> O                        | 714 | 452   | n.d                  | 2140                |
| Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> -6    | 800 | 792   | 5                    | 2160                |
| H <sub>2</sub> O                        | 854 | 275.7 | 2                    | 2.533               |
| (NH <sub>2</sub> )Al(SO <sub>4</sub> )- | 857 | 452   | n.d                  | 2370                |
| 6 H <sub>2</sub> O                      | 897 | 235.8 | 2                    | 2.290               |
| MgCl <sub>2</sub> -6 H <sub>2</sub> O   |     |       |                      |                     |
| NaNO <sub>3</sub>                       |     |       |                      |                     |
| KNO <sub>3</sub>                        |     |       |                      |                     |
| KOH                                     |     |       |                      |                     |
| MgCl <sub>2</sub>                       |     |       |                      |                     |
| NaCl                                    |     |       |                      |                     |
| Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>         |     |       |                      |                     |
| KF                                      |     |       |                      |                     |
| K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>          |     |       |                      |                     |

**n.d** : non disponible

**Tableau 4.** Les matériaux minéraux potentiellement candidats pour le stockage thermique.

### 2.2. Les MCP Organiques:

Les matériaux ou les substances organiques ont une température ou une plage de température comprise entre 0° C et 150°. Les plus utilisés sont essentiellement à base de paraffine, des acides gras et des alcools de sucre. Ils comportent certains inconvénients, comparés aux avantages des MCP

## Généralité sur le stockage et matériaux de changement de phase

inorganiques : ils ont une plus faible conductivité à l'état solide et à l'état liquide, ils ont une chaleur latente de fusion plus faible, ils sont inflammables. Par contre, ils ont des avantages majeurs ; ils sont disponibles dans une large gamme de températures et sont compatibles avec les matériaux conventionnels de construction, ils sont chimiquement stables et ne nécessitent pas l'utilisation d'agents de nucléation. Ils sont non réactifs la plus part du temps et ils sont recyclables. [22]

| <b>Composant</b>       | <b>Point de fusion (°C)</b> | <b>Chaleur de fusion (kJ/kg)</b> | <b>Conductivité thermique (W/m.K)</b> | <b>Densité (kg/m<sup>3</sup>)</b> |
|------------------------|-----------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| Paraffine C14          | 4.5                         | 165                              | n.d                                   | n.d                               |
| Paraffine C15-C16      | 8                           | 153                              | n.d                                   | n.d                               |
| Poly glycol E400       | 8                           | 99.6                             | 0.182(liquide,38.6°C)                 | 1125(liquide,25°C)                |
|                        | 16.5                        | 85.7                             | n.d                                   | 1009(liquide,solide)              |
| Dimethyl-sulfide (DMS) | 20-22                       | 152                              | n.d                                   | n.d                               |
| Paraffine C16-C18      | 22                          | 127.2                            | 0.189(liquide,38.6°C)                 | 1126(liquide,25°C)                |
|                        | 22-24                       | 189                              | 0.21 (solide)                         | 0.760(liquide,70°C)               |
| Poly glycol E600       | 26                          | 200                              | n.d                                   | n.d                               |
| Paraffine C13-C24      | 28                          | 244                              | 0.148(liquide,40°C)                   | 0.774(liquide,70°C)               |
|                        |                             |                                  | 0.358(solide)                         | 0.814(solide,20°C)                |
| Dodecanol              | 38                          | 205                              | n.d                                   | n.d                               |
| Paraffine C18          | 42-44                       | 189                              | 0.21(solide)                          | 0.769(liquide,70°C)               |
|                        |                             |                                  |                                       | 0.912(solide,20°C)                |

## Généralité sur le stockage et matériaux de changement de phase

|              |       |       |                       |                      |
|--------------|-------|-------|-----------------------|----------------------|
| Tetradéconal | 58-60 | 189   | 0.21(solide)          | 0.795(liquide, 70°C) |
| Paraffine    |       |       |                       | 0.920(solide, 20°C)  |
| C20-C33      | 66    | 190   | n.d                   | n.d                  |
| Paraffine    | 66-68 | 189   | 0.21(solide)          | 0.830(liquide, 70°C) |
| C22-C45      |       |       |                       | 0.930(solide, 20°C)  |
| Polyglycol   | 71    | 119.2 | n.d                   | 991(liquide, 73°C)   |
| E6000        |       |       |                       | 1166(solide, 24°C)   |
| Paraffine    | 79    | 168.2 | n.d                   | n.d                  |
| C21-C50      | 80    | 147.7 | 0.132(liquide,        | 976(liquide, 84°C)   |
| Biphenyl     |       |       | 83.8°C)               | 1145(solide, 20°C)   |
|              | 118.0 | 339.8 | 0.341(solide, 49.9°C) | 1300(liquide,        |
| Propionamide |       |       | 0.326(liquide, 140°C) | 140°C)               |
| Naphtalène   |       |       | 0.733(solide, 20°C)   | 1480(solide, 20°C)   |
| Erythritol   |       |       |                       |                      |

**n.d** : non disponible

**Tableau5.** Les composés organiques candidats au stockage thermique.

### 2.3. Les MCP Eutectiques:

Les MCP eutectiques sont des substances composées de plusieurs MCP purs. En général, ce sont des mélanges de MCP organiques et inorganiques (organique, organique 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. [22]

## Généralité sur le stockage et matériaux de changement de phase

| Composant   | Point de fusion (°C) | Chaleur de fusion (kJ/kg) | Conductivité thermique (W/m.K) | Densité (kg/m <sup>3</sup> ) |
|---|----------------------|---------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| 66.6% CaCl <sub>2</sub> -6H <sub>2</sub> O +<br>33.3%MgCl <sub>2</sub> -6H <sub>2</sub> O                           | 25                   | 127                       | n.d                            | 1590                         |
| 48%CaCl <sub>2</sub> +4.3%NaCl+<br>0.4%KCl+47.3%H <sub>2</sub> O  | 26.8                 | 188                       | n.d                            | 1640                         |
| 47%Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> -4H <sub>2</sub> O+<br>33%Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> -6H <sub>2</sub> O | 30                   | 200.5                     | n.d                            | n.d                          |
| 60%Na(CH <sub>3</sub> COO)-<br>3H <sub>2</sub> O+40%CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>                               | 31.5                 | 226                       | n.d                            | n.d                          |
| 61.5%Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> -6H <sub>2</sub> O<br>+ 38.5%NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>                 | 59                   | 132.2                     | 0.51 (liquide,<br>65°C)        | 1550(liquide,<br>65°C)       |
| 53%Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> -6H <sub>2</sub> O+<br>47%Al(NO <sub>3</sub> )- 9H <sub>2</sub> O              | 61                   | 148                       | 0.678(solide,<br>38°C)         | 1630(solide,<br>24°C)        |
| 14%LiNO <sub>3</sub> +<br>86%Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> -6H <sub>2</sub> O                                   | 72                   | 180                       | n.d                            | n.d                          |
| 66.6% urea +  | 76                   | 161                       | n.d                            | n.d                          |

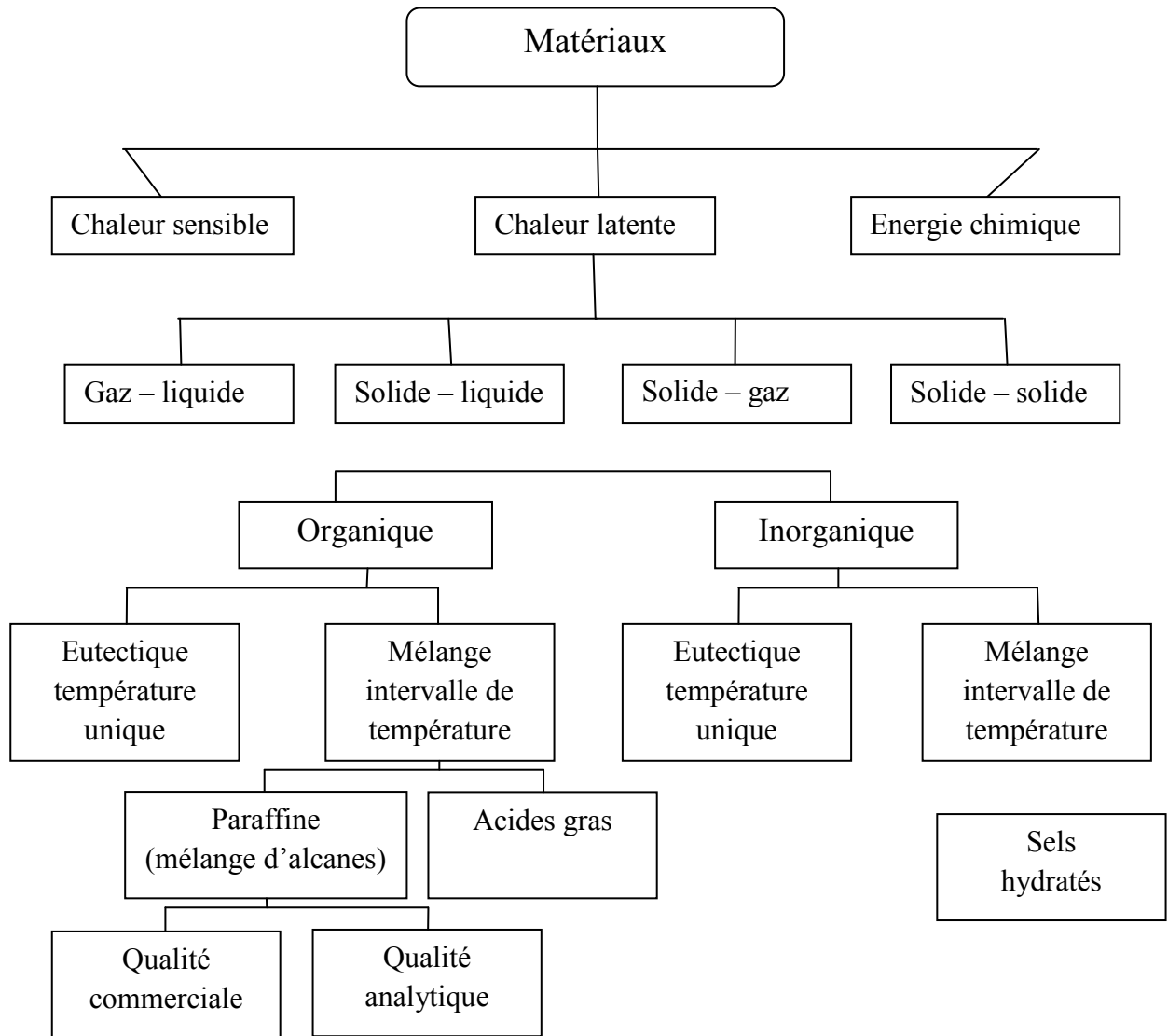
## Généralité sur le stockage et matériaux de changement de phase

|   |    |       |   |  |
|---|----|-------|---|--|
| 33.4%NH <sub>4</sub> Br                   |    |       |   |  |
| 37.5%urea+63.5%<br>acetamide              | 53 | n.d   | 0.331(liquide,<br>79°C)<br>0.649(solide,<br>39°C) | 1440(liquide,<br>85°C)<br>0.515(solide,<br>24°C) |
| 67.1%Naphtalène +<br>32.9% acide benzoide | 53 | 123.4 | n.d   | n.d  |
|   |    |       | 0.136(liquide,<br>78°C)<br>0.282(solide,<br>38°C) | n.d  |

**Tableau 6.** Les eutectiques candidats au stockage thermique.

### 3. Classification des matériaux à changement de phase :

De nombreuses substances ont été étudiées comme des MCP potentiels, mais seuls quelques-uns sont commercialisés en tant que tels. La Fig. 2.1 représente une classification des PCM parmi les matériaux de stockage d'énergie thermique.



**Figure 2.5.** Classification des MCP.

#### **4. 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 2.2).



|                     | <b>Avantages</b>   | <b>Inconvénients</b>  |
|---------------------|--|---|
| <b>Organiques</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas de ségrégation de phase.</li> <li>- Sont chimiquement stables.</li> <li>- La surfusion est négligeable.</li> <li>- Facilement incorporés aux systèmes de stockage de chaleur.</li> <li>- Sobriété écologiques.</li> <li>- 100% recyclables.</li> <li>- Peu sensible aux cycles de fusion/solidification.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible conductivité thermique (0,18-0,25 W/m.K).</li> <li>- Dilatation volumique élevée.</li> <li>- Inflammables.</li> <li>- Coût élevé par rapport aux sels hydratés.</li> </ul>                            |
| <b>Inorganiques</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Disponibilité.</li> <li>- Grande chaleur de fusion.</li> <li>- Conductivité thermique élevée.</li> <li>- Faible dilatation volumique.</li> <li>- Bon marché.</li> <li>- Ininflammables.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- La ségrégation.</li> <li>- Perte d'efficacité liée aux cycles de fusion/solidification.</li> <li>- La surfusion.</li> <li>- La corrosivité.</li> <li>- Déshydratation liée aux cycles thermiques.</li> </ul> |

**Tableau7.** Avantages et inconvénients des MCP. [21]

### 5. Base théorique des matériaux à changement de phase:

#### 5.1. Température de fusion :

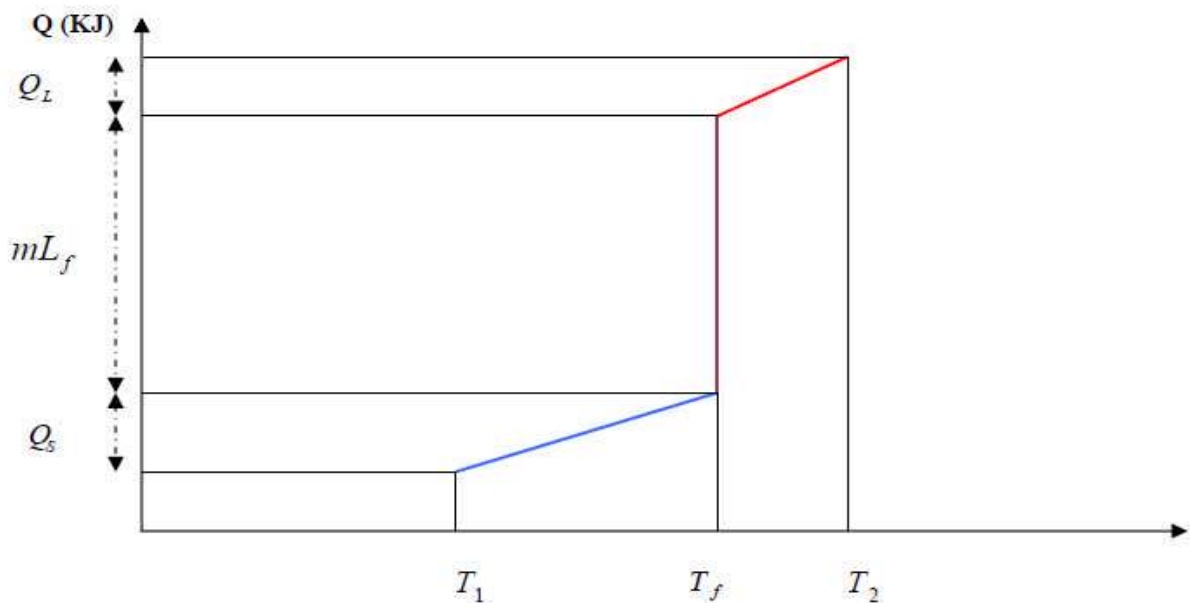
La température de fusion est l'une des caractéristiques essentielles du matériau, elle représente la limite à laquelle se déclenche le stockage ou le déstockage de chaleur latente. Le schéma ci après en est une représentation :



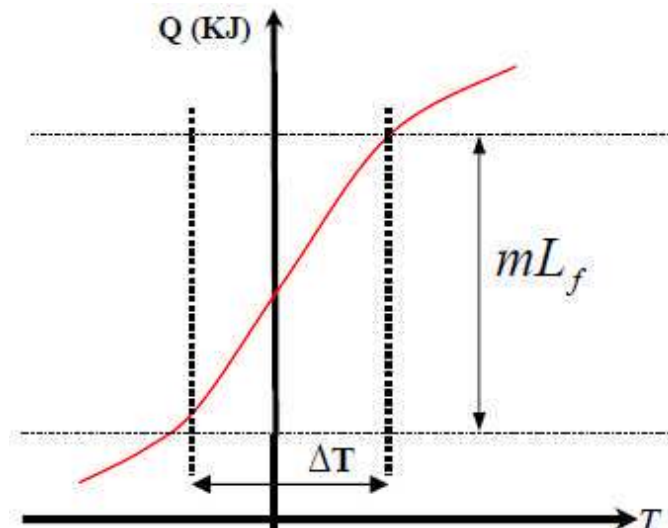
**Figure 2.6.** Schéma des températures de stockage-déstockage.

Les échanges entre le matériau et le milieu extérieur à température 'Te' s'effectuent par des cycles de charge et décharge. Ainsi la quantité de chaleur stockée par un MCP qui passe de l'état solide à l'état liquide est composée de trois termes qui sont :

Dans le cas des corps purs, la quantité de chaleur stockée en fonction de la température est illustrée par la figure suivante. [21]



**Figure 2.7.** Evolution de  $Q$  en fonction de  $T$  pour un corps pur. [21]



**Figure 2.8.** Evolution de  $Q$  en fonction de  $T$  pour un mélange. [21]

Ces schémas Fig. (2.7) et (2.8) symbolisent respectivement le stockage mixte (sensible/latent) d'un corps pur Fig. (2.7) et d'un corps composé Fig. (2.8) observé pendant le changement d'état. Le changement de phase est isotherme dans le cas du corps pur, pour les corps composés la transition de phase se s'effectue sur une gamme de température. L'effet prédominant (liquide et solide) dépend du facteur. [21]

### 5.2 La cristallisation :

Le changement de phase liquide/solide permet d'obtenir un solide cristallisé à partir de solutions aqueuses : c'est la cristallisation. L'état cristallin ainsi obtenu est caractérisé par un arrangement régulier des atomes, des molécules ou des ions suivant un modèle rigide appelé réseau. C'est cet arrangement moléculaire qui fait la différence entre un solide cristallin et un solide amorphe (solide sans structure régulière) ; La cristallisation est le résultat de deux processus successifs : la nucléation puis la formation d'un cristal macroscopique. La cristallisation est un processus qui s'accompagne d'un transfert de masse et de chaleur, elle résulte de deux transformations successives :

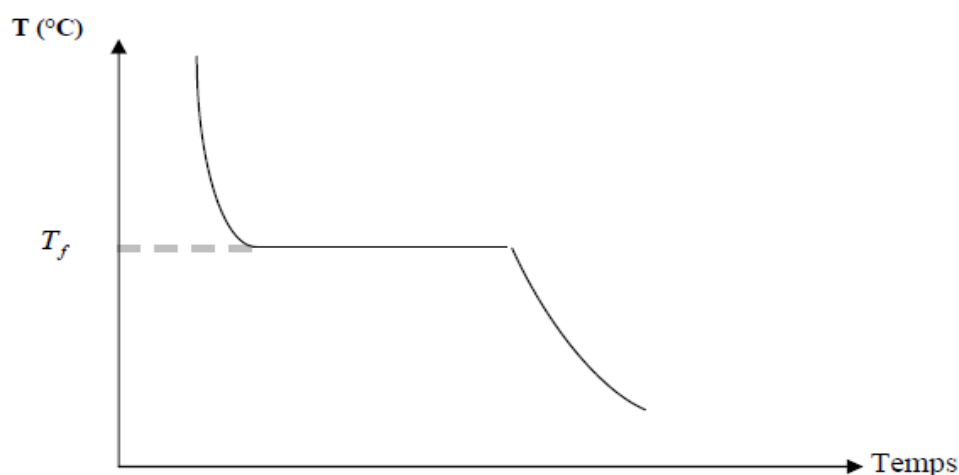
- La nucléation : genèse de noyaux solides.
- La croissance des noyaux et formation du cristal macroscopique. [21]

### 6. Les problèmes liés au changement de phase :

**6.1. 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. [21]

**6.2. La surfusion :** Le graphe ci-après illustre l'évolution théorique de la température pendant le changement d'état lors de la décharge thermique.



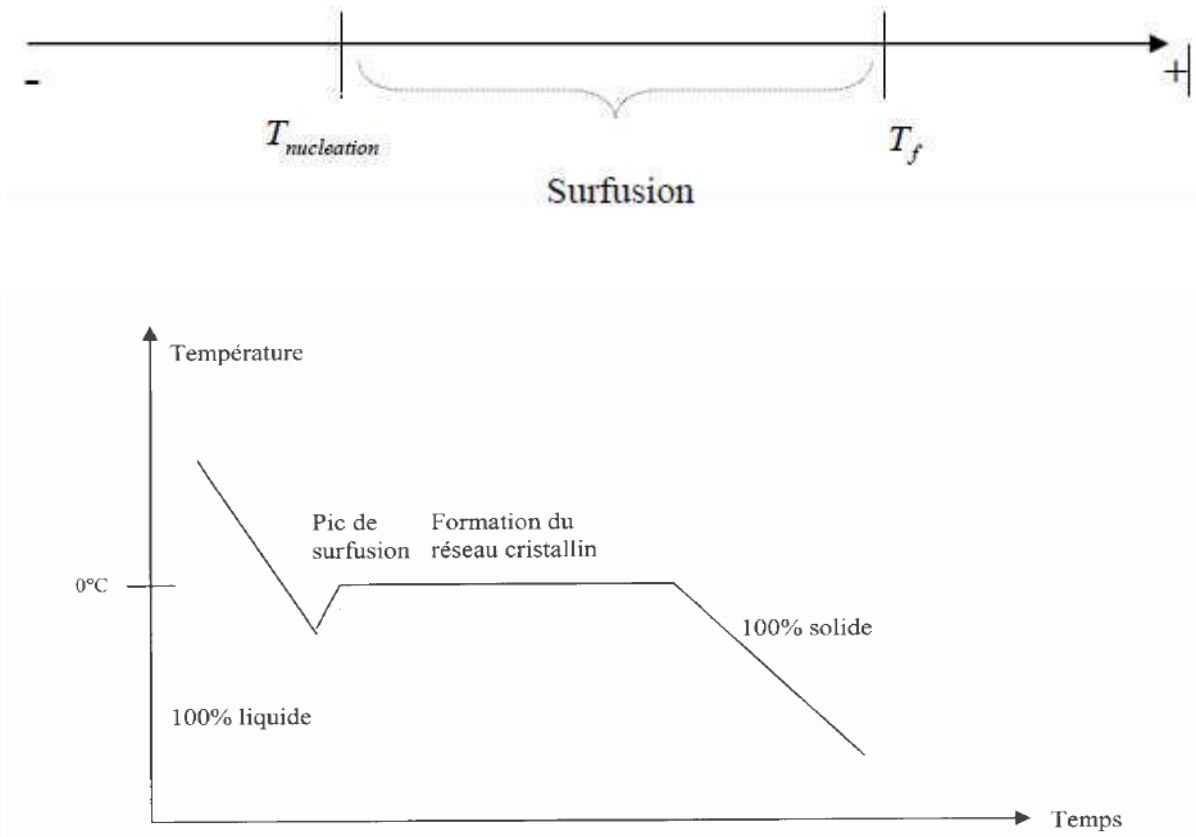
**Figure 2.9.** Evolution théorique de  $T$  en fonction du temps. [21]

## Généralité sur le stockage et matériaux de changement de phase

---

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<sub>f</sub>' (T très proche de T<sub>f</sub>), c'est le cas de certains matériaux comme les sels purs à fusion congruente. Dans ce cas, pour cristalliser sous une pression atmosphérique (pression constante), la température d'un matériau à changement de phase doit être abaissée jusqu'à une température inférieure à la température de solidification théorique 'T<sub>f</sub>'. 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. [21]



**Figure 2.10.** Evolution de  $T$  en fonction du temps. [21]

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. [21]

**6.3. 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. [23]

### **7. Amélioration de la conductivité des MCP :**

Actuellement, les MCP ont une conductivité thermique assez faible de l'ordre de 0,2 w/m.K en moyenne ce qui ne permet pas d'avoir un bon transfert thermique.

Ce phénomène est alors amplifié par l'épaisseur de la phase (solide ou liquide) à traverser car, lors du changement de phase du MCP, l'échange thermique a lieu à l'interface solide/liquide du MCP. Lorsque le front de solidification ou de fusion se déplace, il laisse derrière lui une nouvelle phase (solide ou liquide) que le flux thermique doit traverser avant d'atteindre le front en question. Plus l'épaisseur de cette phase est importante et plus la résistance thermique qu'elle engendre est grande.

Pour palier ce problème, deux solutions sont utilisées en général : faire en sorte que l'épaisseur à traverser soit la plus petite possible. Pour cela, on utilise souvent des microcapsules sphériques qui permettent aux MCP de changer facilement de phase sur l'ensemble de leur volume. L'autre solution consiste à mélanger ou à mettre au cœur du MCP un matériau ayant une bonne conductivité (graphite, maille de fer, fil de fer, etc.). Nous avons expérimenté la deuxième solution à partir de deux concepts. Dans le premier concept, nous avons mélangé le graphite et le MCP (avant remplissage des contenants MCP). Dans le deuxième concept, nous avons introduit du fil de fer au milieu des tubes dans les contenants MCP (en remplissage ceux-ci avec du MCP pur). [22]

### **8. Propriétés des matériaux à changement de phase :**

Un grand nombre de matériaux à changement de phase possède une température de fusion dans la gamme de température (0-120°C). Cependant ils ne peuvent être utilisés comme matériaux de stockage que lorsque certains propriétés thermodynamiques cinétiques et chimiques qui sont définies à partir d'un certain nombre de critères. [24]

### 8.1. Critères thermodynamiques :

Le matériau à changement de phase doit avoir :

- Une température de fusion dans la gamme de température souhaitée.
- Une chaleur latente par unité de masse élevée (une petite quantité du matériau doit pouvoir emmagasiner une grande quantité de chaleur) ;
- Une chaleur spécifique élevée de sorte que matériau puisse disposer d'une chaleur sensible significative ;
- Une fusion congruente ;
- Une petite augmentation de volume pendant la phase de transition. [24]

### 8.2. Critères cinétiques :

Le matériau à changement de phase ne doit montrer ou presque pas de phénomène de surfusion. Le matériau fondu doit se cristalliser à la température de solidification indiquée par les tables thermodynamiques. [24]

### 8.3. Critères chimiques :

Le matériau à changement de phase doit montrer :

- Une stabilité chimique.
- Aucune décomposition chimique de sorte qu'un système de stockage par la chaleur latente soit viable ;
- Aucune action corrosive sur les matériaux de construction ou sur leur contenant.
- Aussi le matériau ne doit pas être nocif ; il doit être non inflammable et non explosif. [24]

### 8.4. Critères économiques :

Le matériau à changement de phase doit être :

- Disponible en grande quantité
- A bon marché

A priori aucun matériau à changement de phase ne peut satisfaire tous ces critères, beaucoup de matériaux ont été étudiés comme de potentiels matériaux à changement de phase, mais peu d'entre eux sont commercialisés. [24]



### **9. Contexte industriel et l'intérêt du stockage de l'énergie thermique à haute température :**

La présente étude s'inscrit en effet dans le cadre des applications de stockage d'énergie thermique à haute température (SEHT) qui a un rapport direct avec la production de l'énergie et la demande, ainsi que la nature souvent intermittente des deux, est à la base de l'intérêt qu'a toujours suscité le stockage de l'énergie. Comme nous essaierons de le montrer, que se soit dans le secteur industriel ou dans celui de la production d'électricité, le stockage de l'énergie thermique à haute température ( $>120^{\circ}\text{C}$ ) peut devenir un élément clé pour des objectifs de réduction de la consommation d'énergie primaire, d'efficacité énergétique accrue ou encore de rentabilité économique.

Dans le secteur de production d'électricité, le stockage d'énergie thermique à haute température pourrait être un moyen de stabiliser l'opération des centrales classiques et d'améliorer, par conséquent, leur rentabilité. Concernant les nouvelles filières, notamment la solaire thermodynamique, le stockage à haute température apparaît comme étant un élément clé pouvant rendre ces filières compétitives. Il permettrait de stabiliser la production solaire d'électricité des systèmes connectés au réseau et d'augmenter la disponibilité et le facteur de capacité des systèmes isolés.

La conversion de l'énergie solaire en électricité par voie thermodynamique s'appuie typiquement sur trois familles de technologies à concentration : les capteurs cylindro-paraboliques à foyer mobile. Elles se distinguent par leurs puissances, leurs rendements optiques et thermiques et leurs coûts d'investissement et de production.

On constate dans tous les cas d'excellents rendements thermiques (rendement du capteur plus récepteur), supérieurs à 70%. La conversion en électricité au moyen de cycles thermodynamiques conventionnels conduit à des rendements en puissance compris entre 20 et 30% selon la taille du groupe et le cycle utilisé.

## Généralité sur le stockage et matériaux de changement de phase

En moyenne annuelle, le rendement net de production d'électricité se situe entre 10 et 20% selon la technologie mise en œuvre.

| Nom du MCP | Type de produit | Point de fusion (°C) | Chaleur de fusion (kJ/kg) | Densité (kg/m <sup>3</sup> ) | Source |
|------------|-----------------|----------------------|---------------------------|------------------------------|--------|
| SN33       | Sel             | -33                  | 245                       | 1.24                         | 70     |
| TH-31      | n.d             | -31                  | 131                       | n.d                          | 74     |
| SN29       | Sel             | -29                  | 233                       | 1.15                         | 70     |
| SN26       | Sel             | -26                  | 268                       | 1.21                         | 70     |
| TH-21      | n.d             | -21                  | 222                       | n.d                          |        |
| SN21       | Sel             | -21                  | 240                       | 1.12                         |        |
| STL-21     | Sel             | -21                  | 240                       | 1.12                         |        |
| SN18       | Sel             | -18                  | 268                       | 1.21                         |        |
| TH-16      | n.d             | -16                  | 289                       | n.d                          |        |
| STL-16     | n.d             | -16                  | n.d                       | n.d                          |        |
| SN15       | Sel             | -15                  | 311                       | 1.02                         |        |
| SN12       | Sel             | -12                  | 306                       | 1.06                         |        |
| STLN10     | Sel             | -11                  | 271                       | 1.11                         |        |
| SN10       | Sel             | -10                  | 310                       | n.d                          |        |
| TH-10      | n.d             | -10                  | 283                       | n.d                          |        |
| STL-6      | Sel             | -6                   | 284                       | 1.07                         |        |
| SN06       | Sel             | -6                   | 284                       | 1.07                         |        |
| TH-4       | n.d             | -4                   | 286                       | n.d                          |        |
| STL-3      | Sel             | -3                   | 328                       | 1.01                         |        |
| SN03       | Sel             | -3                   | 328                       | 1.01                         |        |
| ClimSel C  | n.d             | 7                    | 130                       | n.d                          |        |
| 7          | Paraffine       | 9                    | 205                       | n.d                          |        |
| RT5        |                 |                      |                           |                              |        |

**Tableau 8.** Contient des matériaux à changement de phase commercialisés.

# Modélisation Mathématiques du phénomène de changement de phase

---

## **Introduction :**

La fusion et la solidification du matériau conduit à des processus de changement de phase accompagnés par des phénomènes d'absorption ou de dégagement de l'énergie thermique. Une frontière mobile existe, qui sépare les deux phases dans laquelle l'énergie thermique est absorbée ou libérée.

## **I. Les méthodes de discrétisation :**

La mobilité du front de fusion rend complexe l'évolution du champ de température. Cela confère aux problèmes à changement de phase leur non linéarité.

Dés lors, ils ne peuvent être résolus que par des méthodes numériques et parmi ces méthodes, les méthodes de discrétisation. Elles permettent d'approximer un système d'équations différentielles par un système d'équations algébriques.

L'ensemble continu des valeurs prises par les variables dans l'espace et dans le temps est remplacé par des valeurs prises par les grandeurs physiques en un nombre fini de points. Le volume entourant chaque point du réseau est dans un état d'équilibre thermodynamique. Entre deux points du réseau les grandeurs physiques doivent varier de manière régulière et faible. Il existe trois méthodes de discrétisation :

- La méthode des différences finies.
- La méthode des éléments finis.
- Les méthodes des volumes de contrôle finis.

### **1. Méthodes des volumes finis :**

La méthode des volumes finis consiste à intégrer les équations aux dérivées partielles sur des volumes entourant chaque point du maillage. Cette méthode, même si elle ne fournit qu'une précision du premier ordre, possède des qualités qui en font l'une des plus adaptées à l'étude des écoulements turbulents. En effet, celle-ci est très robuste et permet de traiter des équations

## Modélisation Mathématiques du phénomène de changement de phase

---

comportant des termes sources complexes et non-linéaires. De plus, elle a l'avantage de satisfaire la conservation de la masse sur chaque volume de contrôle. Enfin, elle peut être utilisée avec des maillages relativement grossiers, ce qui permet la mise en œuvre de code pour un coût raisonnable.

### **2. Méthodes des différences finies :**

La variable inconnue  $\phi$  est décrite par plusieurs valeurs dans les points d'un maillage. Le développement de l'inconnue en séries Taylor tronquées est utilisé pour approximer les dérivées de l'inconnue, dans chaque point du maillage, par différences finies en utilisant les inconnues voisines. En remplaçant les dérivées dans les équations différentielles par différences finies on obtient un système d'équations algébriques pour les valeurs de l'inconnue dans chaque point du maillage.

### **3. Méthodes des éléments finis**

Dans la méthode des éléments finis on utilise des fonctions linéaires ou quadratiques, sur chaque élément, pour décrire la variation locale de l'inconnue  $\phi$ . Les équations différentielles sont exactement vérifiées par la solution exacte. En remplaçant l'approximation de  $\phi$  dans les équations différentielles, on constate que celles-ci ne vérifient pas exactement, et un résidu est défini dans ce cas pour mesurer l'erreur. Le résidu est minimisé en le multipliant par une fonction de pondération et en l'intégrant. Le résultat de l'intégration est un set d'équations algébriques pour les coefficients des fonctions d'approximation.

## **II. Modélisation thermique de la théorie de la Solidification (Problème de Stefan) :**

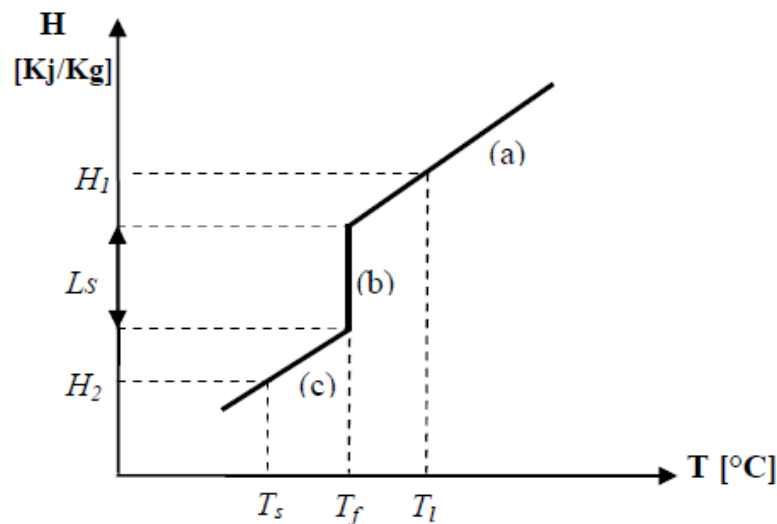
La solidification est considérée largement dans la littérature comme un problème de Stefan. Cette appellation a été attribuée suite aux travaux du fameux

## Modélisation Mathématiques du phénomène de changement de phase

chercheur Stefan qui a étudié le problème de fusion et de congélation d'eau en 1890.

C'était le premier travail de modélisation du phénomène de changement de phase liquide/solide. Généralement, il existe deux approches pour l'analyse des problèmes des changements de phase: Les méthodes à maillage mobile dans le temps, et la méthode à maillage fixe.

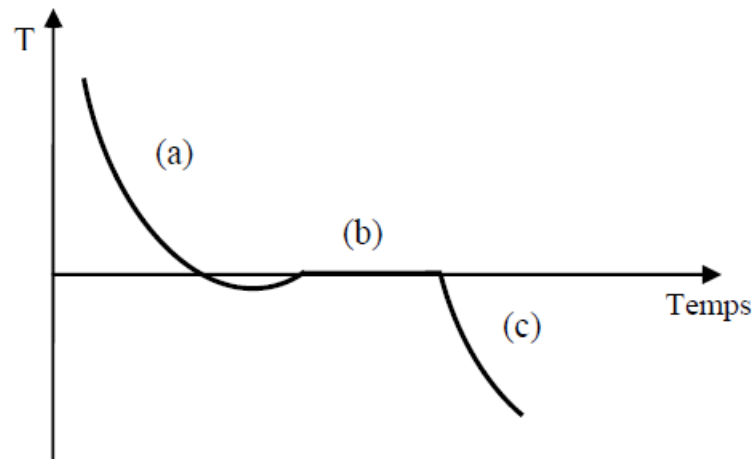
Soit un métal pur en état de fusion à une température  $T_1$  supérieure à la température de fusion. Pendant la solidification, la température descend progressivement suivant le palier (a), puis se stabilise durant le changement de phase à la température  $T_f$  suivant le palier (b), dans lequel le métal est partiellement solidifié. Le métal continue à se refroidir et passe de la température  $T_f$  à la température  $T_s$  suivant le palier (c), où il sera complètement solidifié. Ici les changements de phase liquide solide (solidification) et solide liquide (fusion) à une température donnée sont considérés, voir la représentation sur la figure 3.1. (a) et (b)



**Figure 3.1.** Représentation de l'enthalpie en fonction de la température.

## Modélisation Mathématique du phénomène de changement de phase

---



**Figure 3.2.** Courbe de refroidissement lent d'un métal pur en fonction du temps.

Chaque palier représente un état spécifique du métal et la variation d'enthalpie dans chaque palier est donnée comme suit:[21]

$$\begin{aligned}
 \text{Palier (a) : } dH &= C_{pl} dT && \text{pour } T > T_f \\
 \text{Palier (b) : } dH &= L_s && \text{pour } T = T_f \quad (1.3) \\
 \text{Palier (c) : } dH &= C_{ps} dT && \text{pour } T < T_f
 \end{aligned}$$

$H$  est une fonction discontinue à  $T = T_f$ . Cette discontinuité marque la séparation entre le liquide et le solide et est appelée interface diphasique. Pour que le métal soit complètement solidifié il faut lui enlever la quantité d'énergie  $\Delta H$  suivante :

$$\Delta H = C_{pl}(T_l - T_f) + L_s + C_{ps}(T_l - T_s)$$

Avec :

$T_l$  : Désigne la température du métal à l'état liquide.

$T_s$  : Désigne la température du métal à l'état solide.

$T_f$  : Désigne la température de solidification (fusion).

$C_{pl}$  et  $C_{ps}$  : sont les capacités thermiques du liquide et du solide, représentées par les pentes des paliers (a) et (c) sur le graphe.

## Modélisation Mathématiques du phénomène de changement de phase

---

Dans sa forme liquide, le métal possède la chaleur latente  $L_s$  par unité de masse plus la chaleur sensible représentée par la relation :

$$C_{pl}(T_l - T_f) + L_s$$

Pour un métal pur, l'enthalpie est reliée à la température par [21]

$$\Delta H = \begin{cases} C_{pl} \Delta T & \text{pour } T > T_f \\ C_{ps} \Delta T & \text{pour } T < T_f \end{cases} \quad (3.3)$$

Pour un alliage, où la solidification prend place à travers un intervalle de solidification ( $T_l - T_s$ ), l'enthalpie est reliée à la température par

$$\Delta H = \begin{cases} C_{pl} \Delta T + L_s & \text{pour } T \geq T_f \\ C_p \Delta T + f_l L_s & \text{pour } T_s < T < T_l \\ C_{ps} \Delta T & \text{pour } T \leq T_s \end{cases}$$

Avec :  $T_f$  désigne la fraction liquide.

Dans le procédé de solidification ou de fusion, la température évolue dans chacune des phases et les interfaces diphasiques se déplacent. Le fait de parler ici de plusieurs interfaces diphasiques, car l'imagination qu'il y ait plusieurs fronts de solidification et/ou de fusion. Par la suite, la présence d'un seul front, bien que plusieurs fronts puissent être présents. Le déplacement de l'interface diphasique ne peut pas être suivi en ne considérant que l'évolution de la température pour certains points du domaine, la transmission de la chaleur étant dépendante du déplacement de l'interface et inversement.

➤ Généralement, il existe deux approches pour l'analyse des problèmes des changements de phase : les méthodes à **maillage mobile** dans le temps, et la méthode à **maillage fixe**.

### 1. Méthode à maillage mobile:

Dans cette méthode, les équations de conservation sont écrites en termes de température dans chaque phase, elles sont résolues séparément dans la région liquide et dans la région solide, la position de l'interface est obtenue par la

## Modélisation Mathématiques du phénomène de changement de phase

---

résolution de l'équation du bilan à l'interface (condition de Stefan). Les équations gouvernantes le transfert de chaleur sont :

Région liquide :

$$c_{pl} \rho_l \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda_l \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3.4)$$

Région solide :

$$c_{ps} \rho_s \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda_s \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3.5)$$

A l'interface liquide-Solide, les deux équations (3.4) et (3.5) sont couplées par la condition de Stefan : [22]

$$\left\{ \begin{array}{l} T_l = T_s = T_f \\ -\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial n} + \lambda_l \frac{\partial T_l}{\partial n} = \rho_s L_s \frac{\partial \varepsilon}{\partial n} \end{array} \right\} \quad (3.6)$$

$\underline{n}$  désigne la normale au front et  $\varepsilon$  la position de front de solidification. La condition de Stefan (3.6) traduit la chute de l'enthalpie du système (dégagement de la chaleur latente  $L_s$ ) à la température de fusion  $T_f$ . Cette approche est adaptée dans le cas d'un métal pur ou le changement de phase s'effectue à une température constante.

Généralement, les solutions analytiques pour les modèles de Stefan restent très limitées pour des cas 1D avec des conditions aux limites et des propriétés thermo-physiques constantes. Dans les situations pratiques les conditions aux limites et les propriétés thermo-physiques sont variables et multiples ainsi que les géométries sont multidimensionnelles et irrégulières, ce qui nécessite des techniques numériques puissantes pour les étudier.

### 2. Méthode à maillage fixe :

Dans ces méthodes, une seule équation d'énergie devient applicable dans les deux phases et donc il n'est pas nécessaire de considérer les deux phases liquides et solides séparément. Pendant le calcul, le maillage reste fixe et les équations gouvernant le transfert de chaleur dans la région liquide et la région



## Modélisation Mathématiques du phénomène de changement de phase

---

solide est résolue simultanément malgré la discontinuité du gradient de la température à l'interface.

L'avantage de ces méthodes réside dans la simplicité et la facilité de mettre en œuvre même dans le cas tridimensionnel [23]. Dans cette famille de méthodes, les deux méthodes les plus utilisées sont la méthode de la capacité effective (apparente) et la méthode enthalpique.

### 2.1 Méthode de la capacité effective :

La méthode de la capacité effective introduit l'effet de la chaleur latente sur la capacité calorifique du matériau dans un petit intervalle de température au voisinage de la température de fusion (changement de phase). Globalement, cette méthode est assez simple mais la moins précise dans les méthodes à maillage fixe.

L'équation d'énergie est donnée par: [23-24-25-26]

$$\rho C_{eff} \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3.7)$$

Avec :

$$C_{eff} = \begin{cases} C_{ps} & \text{si } T < T_f \\ C_p + \frac{L_s}{T_l - T_s} \delta(T - T_f) & \text{si } T = T_f \\ C_{pl} & \text{si } T > T_f \end{cases} \quad (3.8)$$

Où  $\delta(T - T_f)$  représente la fonction la fonction de Dirac, qui est infinie à  $T = T_f$  est nulle ailleurs. Elle satisfait l'équation suivante :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(T - T_f) dT = 1 \quad (3.9)$$

Afin de faciliter le calcul numérique, on introduire la fonction Delta afin de pouvoir localiser les nœuds où la chaleur latente est incluse dans la chaleur spécifique, ce qui donne : (voir Fig.3.3) [27-28]

$$C_{eff} = \begin{cases} C_{ps} & \text{pour } T < T_f - \Delta T \\ C_p + \frac{L_s}{2\Delta T} & \text{pour } T_f - \Delta T \leq T \leq T_f + \Delta T \\ C_{pl} & \text{pour } T > T_f + \Delta T \end{cases} \quad (3.10)$$

## Modélisation Mathématiques du phénomène de changement de phase

---

Pour les alliages, l'intervalle  $2\Delta T$  vaut  $T_l - T_s$ . Pour les métaux purs, le changement de phase s'achève à une température constante, et l'intervalle doit être le plus petit possible.

### 2.2 Méthode enthalpique :

Les modèles enthalpiques permettent d'éviter le suivi du front. Le maillage de calcul reste fixe et la condition de changement de phase au niveau d'interface n'est pas imposée. Ces modèles introduisent généralement une zone pâteuse entre les deux phases liquide et solide, ce qui élimine la nature de front dans les modèles de Stefan. Le concept de fraction a été introduit dans la zone pâteuse pour prendre en compte la présence d'une mixture des deux phases liquide et solide.

La méthode enthalpique traite l'enthalpie comme variable dépendante de la température, et l'équation de la chaleur est écrite en fonction de l'enthalpie et de la température. Le modèle de transfert thermique que nous adoptons est basé sur une formulation enthalpique qui est la plus adoptée à la résolution numérique des problèmes avec changement de phase.

La forme enthalpique de l'équation de la conduction thermique est formulée mathématiquement dans le cas bidimensionnel comme suit [28-29-30] :

$$\rho \left( \frac{\partial H}{\partial t} + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} \right) = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - s h \quad (3.11)$$

H : l'enthalpie du système prend alors la forme générale suivante :

$$H = CpT + fl Ls \quad (3.12)$$

Avec  $f_l = 1$  dans la région liquide,  $f_l = 0$  dans la région solide et  $0 \leq f_l \leq 1$  dans la région pâteuse où coexistent les deux phases. Dans la littérature, on suppose très souvent que la chaleur latente varie linéairement avec la température comme suit [27-28] :

$$fl = \begin{cases} 1 & T > Tl \\ \frac{T - Ts}{Tl - Ts} & Ts \leq T \leq Tl \\ 0 & T < Ts \end{cases} \quad (3.13)$$

Après réarrangement on obtient :

$$\rho C_p \left[ \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right] = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - s_h \quad (3.14)$$

$S_h$  représentent le terme source dans l'équation est donné par :

$$s_h = \rho L_s \left[ \frac{\partial fl}{\partial t} + u \frac{\partial fl}{\partial x} + v \frac{\partial fl}{\partial y} \right] \quad (3.15)$$

Le modèle enthalpique est considéré comme le plus efficace et le plus précis des méthodes à maillage fixe.

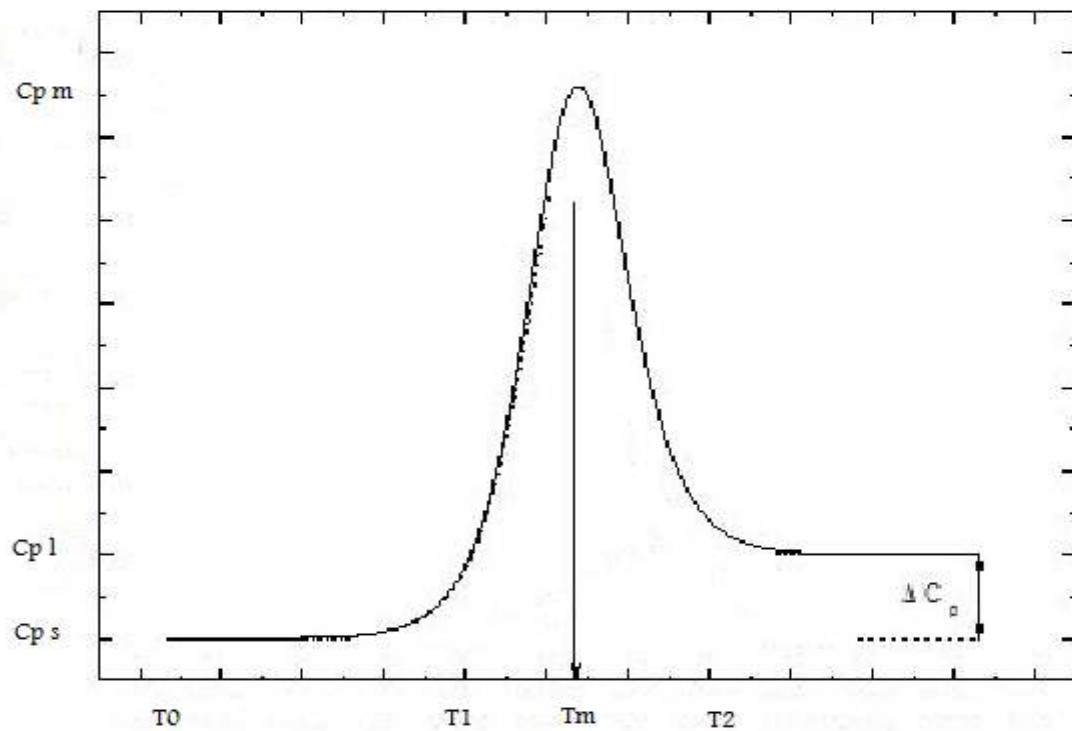
### 2.3 Méthodes des Cp variables :

La méthode des Cp variables consiste à étudier les différents paliers de la courbe de variation de Cp en fonction de température, (figure 3), lors le changement de phase d'un matériau.

La chaleur spécifique dans chaque état du matériau (Cp solide, Cp liquide,..) est déterminée expérimentalement on connaissant l'intervalle de température de fusion de ce matériau, alors d'après ces valeurs on peut avoir la valeur de Cp dans l'interface solide-liquide.

## Modélisation Mathématique du phénomène de changement de phase

---



**Figure 3.** Variation de  $C_p$  en fonction de température.

Par interpolation on peut avoir :

$$C_{pm} = \left\{ \begin{array}{ll} C_{pl} & \text{si } T < T_1 \\ C_{ps} + \frac{C_{pl} - C_{ps}}{T_2 - T_1} (T_m - T_1) & \text{si } T_1 \leq T \leq T_m \\ C_{pl} - \frac{C_{pl} - C_{ps}}{T_2 - T_1} (T_2 - T_m) & \text{si } T_m \leq T \leq T_2 \\ C_{ps} & \text{si } T > T_2 \end{array} \right\} \quad (3.16)$$

## Résultats & discussions

### Introduction :

Nous présentons dans ce chapitre les résultats de la simulation numérique obtenue par le code de calcul utilisé. Le problème étudié est le stockage de l'énergie solaire par chaleur latente avec un matériau de changement de phase et on a étudié l'influence de dimension de la source chaleur et le flux évacué de la source et l'épaisseur de matériaux MCP sur sa fusion.

La géométrie considérée et les conditions aux limites ont été présentées dans le chapitre 04. Ainsi que le maillage et la simulation numérique ont été faite respectivement dans le code de simulation Comsol.

### 1- Effet de dimension de la source de chaleur:

Dans ce cas on a joué sur la hauteur « h » et la largeur « l » de l'échangeur (la hauteur de la source de chaleur).

#### a)- $h=20\text{cm}$ et $l=28\text{cm}$

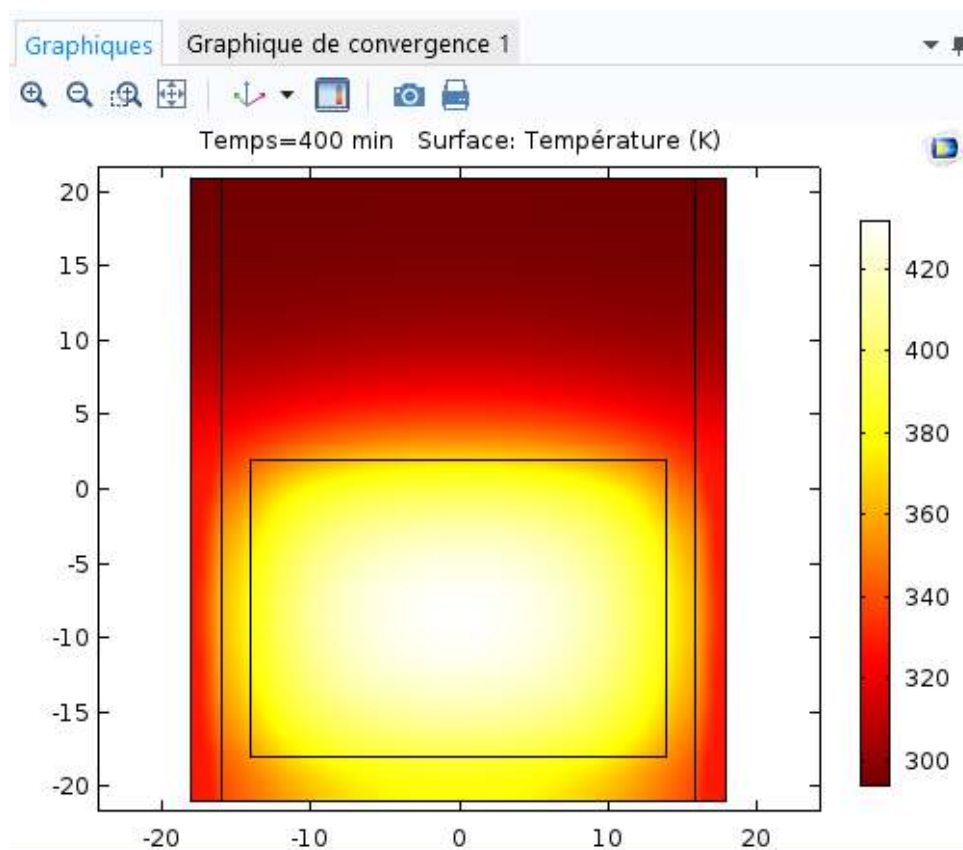


Figure 5.1. Résultat avec  $h= 20\text{cm}$

## Résultats & discussions

b)-  $h=35\text{cm}$  et  $l=28\text{cm}$

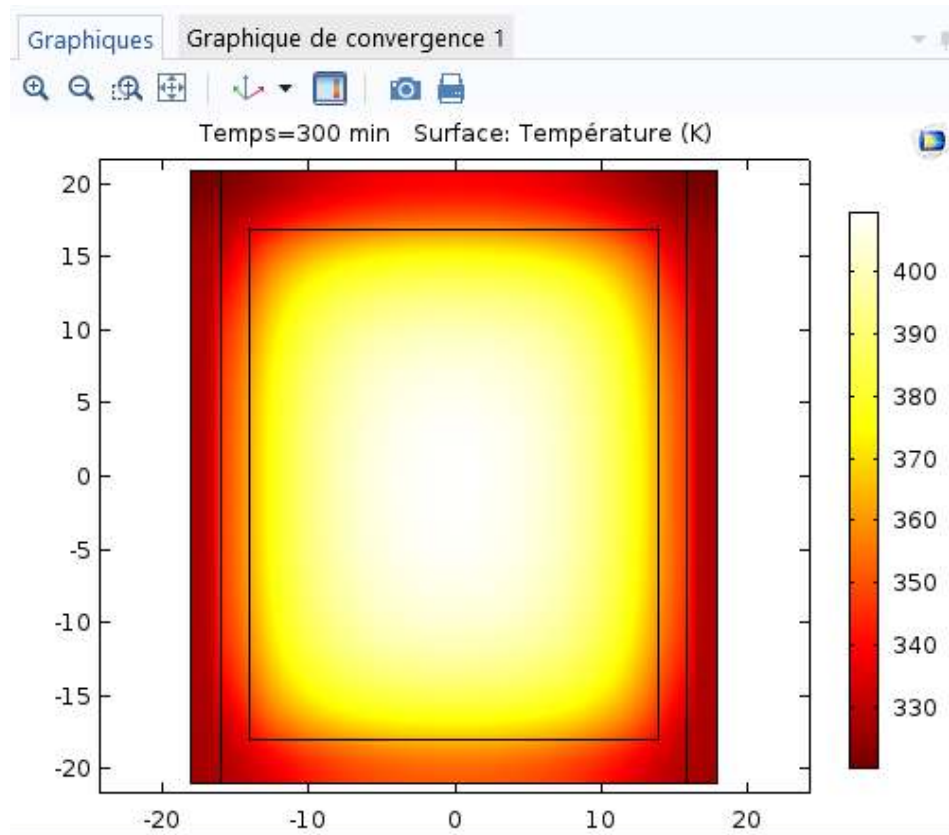
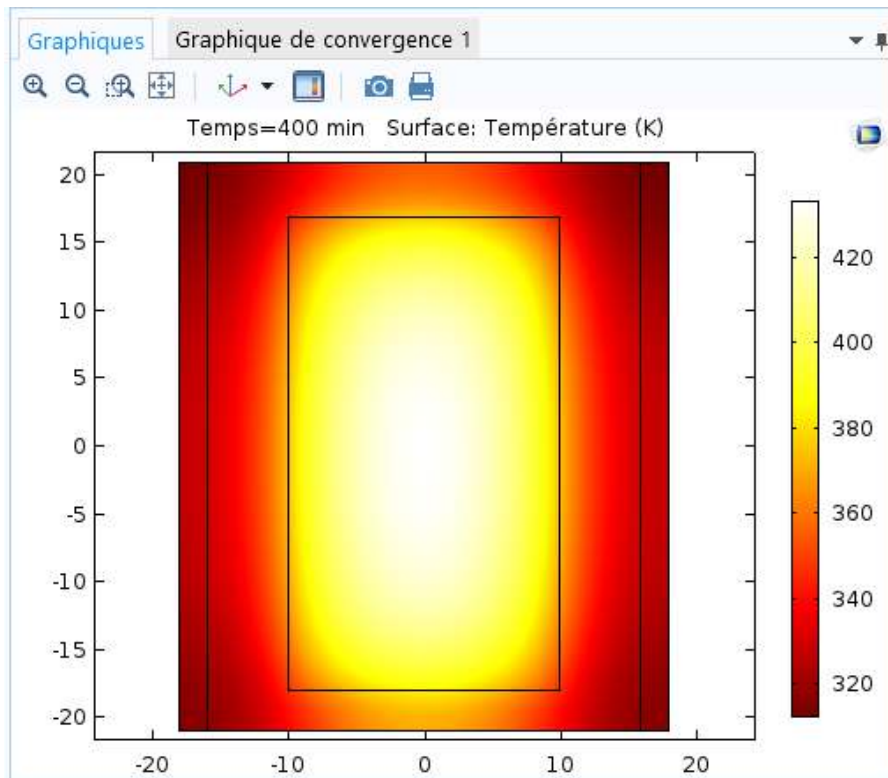


Figure 5.2. Résultat avec  $h=35\text{cm}$

c)-  $h=35\text{cm}$  et  $l=15\text{cm}$

## Résultats & discussions



**Figure 5.3.** Résultat avec  $l=15\text{cm}$

### **Discutions :**

La variation de dimensions de la source de chaleur influe sur l'évolution de la température en fonction du temps durant la phase de stockage , pour les résultat de la figure (5.2) on constate que le changement de phase est atteint plus rapidement par rapport a d'autre résultat.

### **2- Effet de l'épaisseur du MCP :**

Dans ce cas on a joué sur l'épaisseur « e » de paraffine on prenant on considération la dimension de la source de chaleur ( $h= 35\text{cm}$  et  $l=28\text{cm}$ ) qui a donné des bon résultats.

#### **a)- $e=2\text{cm}$ :**

## Résultats & discussions

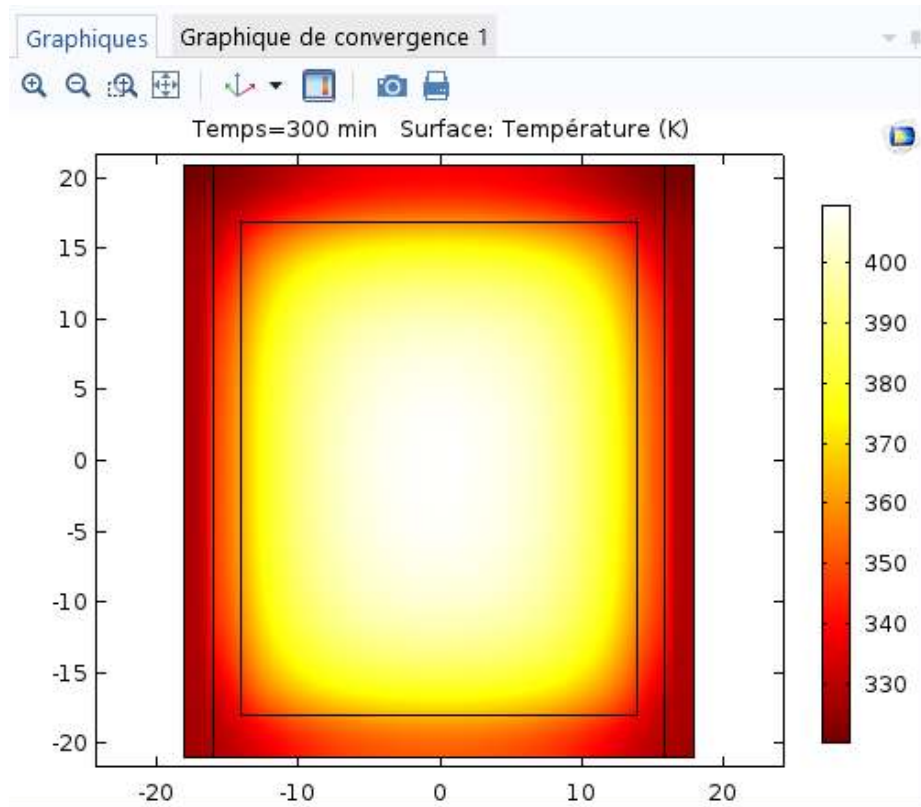


Figure 5.4. Résultat avec  $e=2\text{cm}$

b)-  $e=4\text{cm}$  :

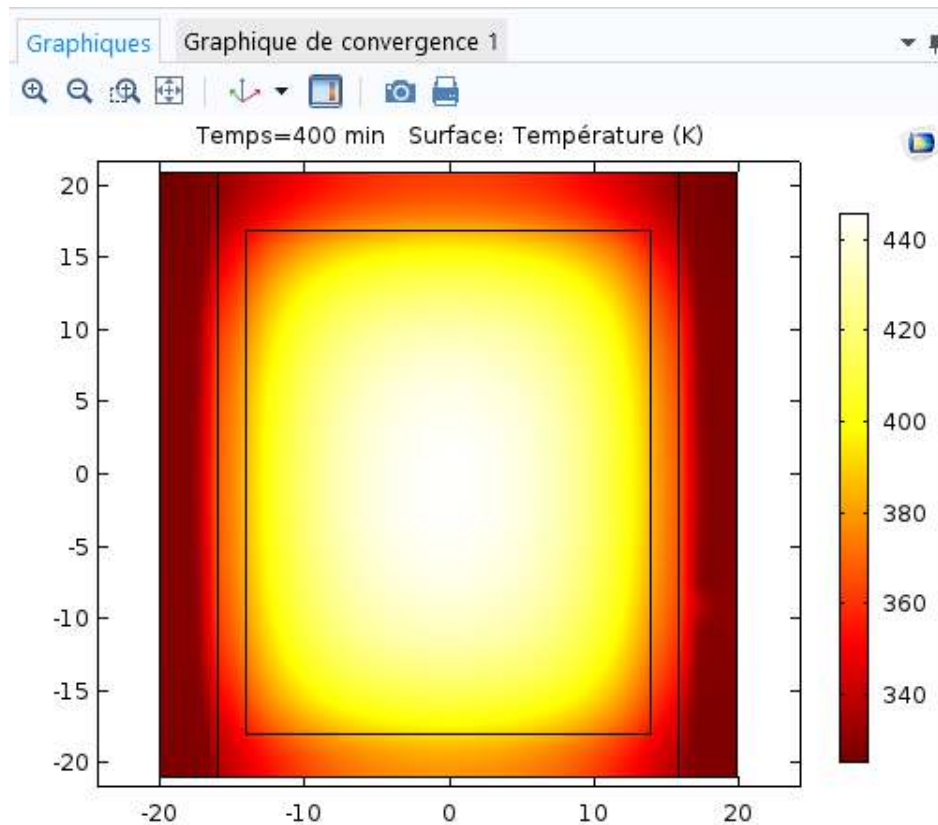


Figure 5.5. Résultat avec  $e=4\text{cm}$ .



## Résultats & discussions

c)-  $e=1\text{cm}$  :

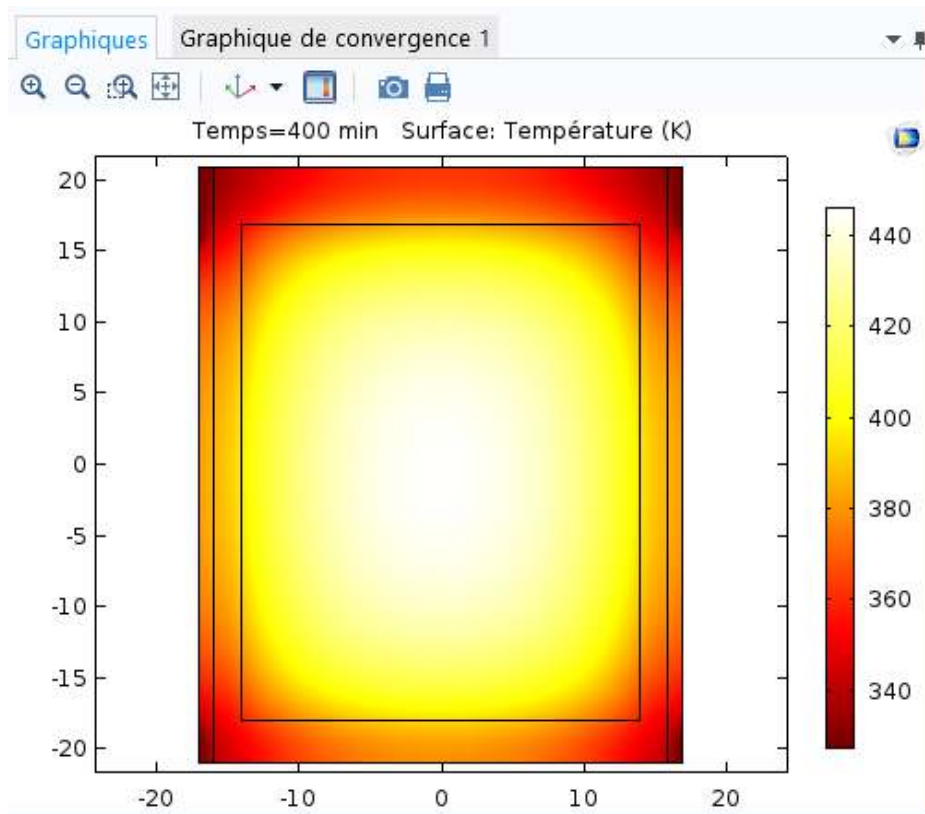


Figure 5.6. Résultat avec  $e=1\text{cm}$

### Discussion :

En tenant compte le meilleur résultat de l'étude de l'effet de dimension de source de chaleur, on a pris le résultat de la figure (5.2), on a varié l'épaisseur de paraffine et comme résultat on trouvé que l'épaisseur du modèle étudié «  $e=2\text{cm}$  » est le meilleur on prenant on considération la quantité de chaleur absorbé par le matériau.

### 3- Le flux de chaleur volumique :

Dans ce cas on a jouée sur le débit de l'eau circule dans l'échangeur ce qui implique la variation de flux volumique de la source de chaleur «  $Q$  ».

a)-  $Q= 289,541 \text{ KW/m}^3$  :

## Résultats & discussions

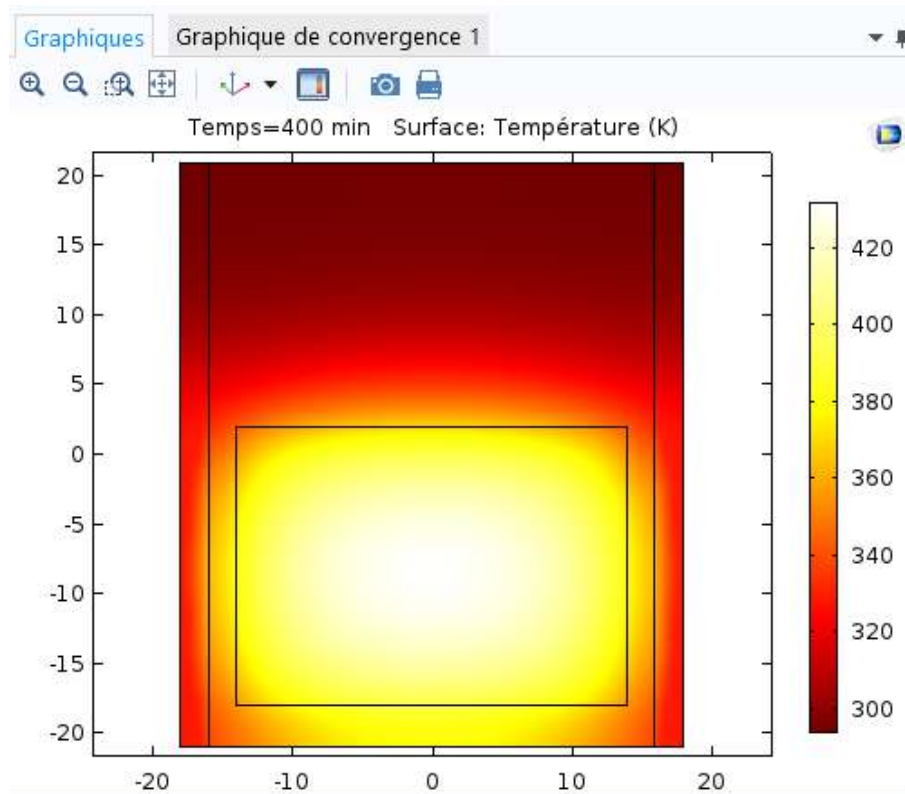


Figure 5.7. Résultat pour  $Q= 289,541 \text{ KW/m}^3$

b)-  $Q= 400 \text{ KW/m}^3$  :

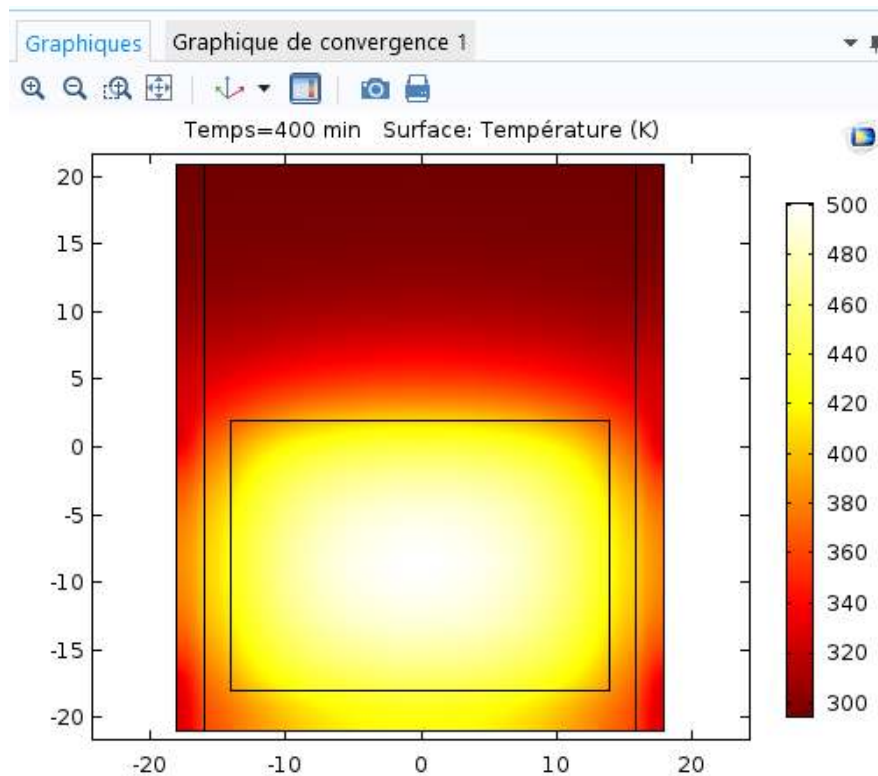
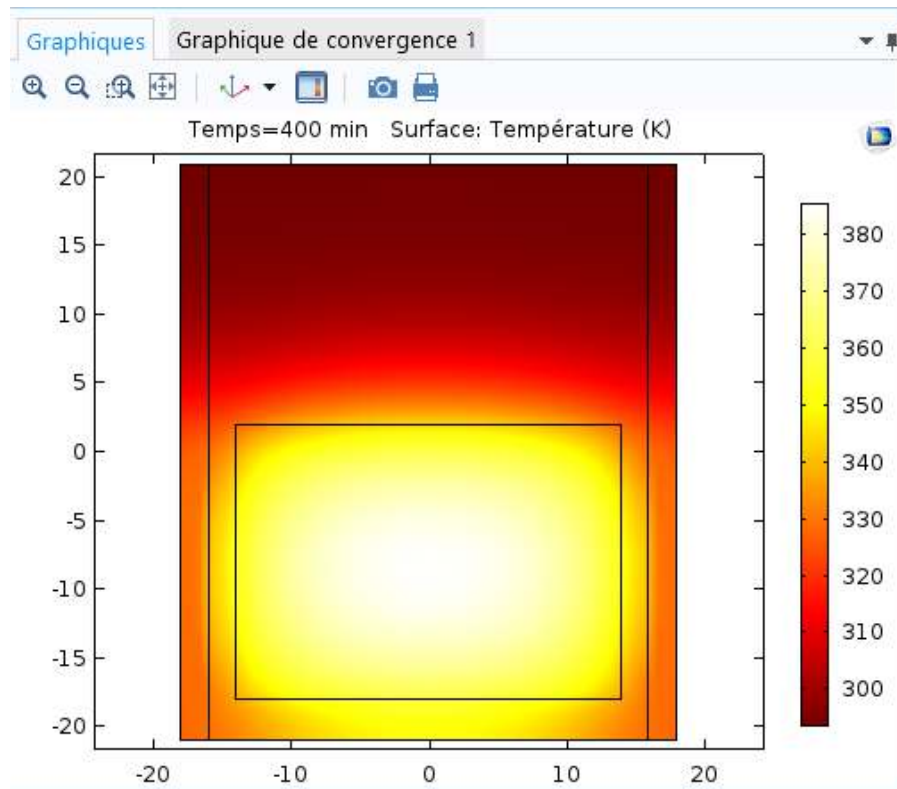


Figure 5.8. Résultat pour  $Q= 400 \text{ KW/m}^3$

c)-  $Q= 180 \text{ KW/m}^3$  :

## Résultats & discussions



**Figure 5.9.** Résultat pour  $Q= 180 \text{ KW/m}^3$ .

### Discussion :

La variation du flux de chaleur impact essentiellement sur la température. Alors l'effet du flux sur l'évolution de la fraction liquide en fonction du temps durant la phase de stockage. la fusion du MCP commence plus rapidement dans la figure ( $400 \text{ KW/m}^3$ ).