



REPULIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère De L'Enseignement supérieur Et De La Recherche Scientifique  
Université Abou Baker Belkaid-TLEMCEN-



Faculté de Technologie

Département de génie mécanique

MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : Génie thermique et énergie renouvelable

Thème



**SIMULATION NUMÉRIQUE DU STOCKAGE DE  
L'ÉNERGIE SOLAIRE PAR CHALEUR LATENTE**

Présenté par :

Mr. BOURGUEBA Djaoued

Mr. BEKKOUCHE Ismail

Encadreur:

Mr. KORTI A.N.

MC-A-, U. de TLEMCEN

Co-Encadreur:

Mme. SAIB H.

MA-B-, U. de TLEMCEN

Soutenu devant le jury :

Mr. AZZI A.

Président

MC-A-, U. de TLEMCEN

Mr. SAIM R.

Examineurs

MC-A-, U. de TLEMCEN

Mr. SELKA G.

Examineurs

MC-A-, U. de TLEMCEN

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2013-2014

# Remerciement

*Nous remercions vivement et chaleureusement Monsieur **KORTI Nabil Abdelillah** encadreur et Madame **SAIB Hind** Co-encadreur de ce mémoire, pour nos avoir soutenus et guidé tout au long de ce mémoire. Nous le remercions particulièrement pour la confiance qu'ils nous a accordés, pour sa rigueur scientifique, pour sa patience et pour ses conseils judicieux qui ont contribué à la réalisation et à l'accomplissement de ce travail.*

*Nous tient à exprimer nos remerciements à Monsieur **AZZI . Sid Ahmed** qui nous a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury. Qu'il trouve ici l'expression de nos profondes gratitude.*

*Nous exprimons nos vifs remerciements à Messieurs **SAIM Rachid** et **SELKA Ghouti** pour avoir accepté de faire partie du jury, montrant ainsi l'intérêt qu'ils portent au sujet de ce travail.*

*A tous, nous tient à exprimer nos sincères remerciements*

## *Dédicace*

---

### *Dédicace*

*Nous avons le grand plaisir de dédier ce modeste travail à :*

*Nos chers parents, qui nous toujours soutenu dans notre études.*

*Tous nos frères et sœurs chacun avec son nom.*

*Tous nos familles chacun son nom.*

*Touts nos enseignants chacun son nom.*

*Touts nos collègues chacun son nom.*

*RETERI Ahmed et KOUKEB Houssame qui nous aidé.*

*Chaque personne qui nous aidé chacun son nom.*

*Promo GTER &GE 2013/2014*

## *Table des matières*

---

### **Table des matières**

Résumé

Abstract

ملخص

Nomenclature

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale ..... 1

### **Chapitre 01 : Recherche bibliographique**

Recherche bibliographique ..... 3

### **Chapitre 02 : Les matériaux à changement de phase**

1. Introduction..... 15

2. Matériaux à changement de phase (MCP) ..... 16

2.1. Types des matériaux à changement de phase (MCP) ..... 16

2.1.1. Les MCP inorganiques ..... 16

2.1.2. Les MCP inorganiques ..... 16

2.1.2. Les MCP eutectiques ..... 17

2.2. Classification des matériaux à changement de phase ..... 17

2.2.1. Etude comparative des composés organiques et inorganiques ..... 19

2.3. Base théorique des matériaux à changement de phase ..... 20

2.3.1. Température de fusion ..... 20

2.3.2. La cristallisation ..... 21

2.4. Les problèmes liés au changement de phase ..... 22

2.5. Amélioration de la conductivité des MCP ..... 25

2.6. Propriétés des matériaux à changement de phase ..... 26

2.6.1. Critères thermodynamiques ..... 26

## *Table des matières*

---

2.6.2. Critères cinétiques.....	26
2.6.3. Critères chimique .....	26
2.6.4. Critères économiques.....	27
2.7. Applications des MCP .....	27
2.7.1. Le transport de produits alimentaires.....	27
2.7.2. Le stockage de l'énergie thermique .....	27
2.7.3. Applications médicales .....	28
2.8. Classe de MCP .....	28
2.8.1. Matériaux changement de phase SP .....	29
2.8.2. Matériaux changement de phase RT.....	30
3. Le stockage d'énergie .....	31
3.1. Types de stockage d'énergie.....	31
3.1.1. Stockage par chaleur sensible .....	31
3.1.2. Stockage par chaleur latente .....	33
3.1.2.1. Systèmes de stockage d'énergie par chaleur latente.....	33
3.1.2.2. Les différents types de changement de phase.....	34
3.1.3. Stockage thermochimique.....	35
3.1.4. Stockage chimique .....	35
3.2. Comparaison des différents types de stockage .....	37

### **Chapitre 03 : modélisation mathématique du phénomène de changement de phase**

1. Introduction.....	40
2. Les écoulements avec changement de phase .....	40
2.1. Modélisation thermique de la théorie de la Solidification.....	40
3. Les méthodes d'analyse des écoulements avec changement de phase .....	43

## *Table des matières*

---

3.1. Méthode à maillage mobile .....	43
3.2. Méthode à maillage fixe.....	44
3.2.1. Méthode de la capacité effective .....	44
3.2.2. Méthode enthalpique.....	46

### **Chapitre 04 : Position du problème**

1. Introduction.....	49
2. Géométrie étudiée .....	49
3. Formulations mathématique .....	50
4. Les conditions initiales et aux limites.....	52
5. Gambit et Fluent .....	53
5.1. Préprocesseur Gambit .....	53
5.1.1. Interface de Gambit.....	54
5.2. Code Fluent.....	55
5.2.1. Interface du code Fluent.....	56
5.2.2. Importation de la géométrie (msh) .....	58

### **Chapitre 05 : résultats et les discussions**

1. Introduction.....	61
2. Phase stockage.....	61
2.1. Effet de l'épaisseur du MCP .....	61
2.2. Effet du nombre de passe .....	64
2.3. Effet de débit.....	68
4. Phase déstockage .....	70
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>76</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>78</b>

## *Nomenclature*

---

### Nomenclature

#### Symboles Latins :

	Not	Unités
$c_p$	chaleur spécifique	$J. Kg^{-1}.K^{-1}$
$f_\ell$	fraction liquide	
$L_s$	chaleur latente de fusion	$J. Kg^{-1}$
$T$	Température	K
$t$	variable du temps	S
$u$	vitesse suivant $x$	$m.s^{-1}$
$v$	vitesse suivant $y$	$m.s^{-1}$
$Q$	Quantité de la chaleur	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
$x, y$	coordonnées cartésiennes	

#### Symboles Grecs :

Symboles	Not	Unités
$\rho$	masse volumique	$Kg.m^{-3}$
$\mu$	viscosité dynamique	$Kg.m^{-1}.s^{-1}$
$\lambda$	conductivité thermique	$W.m^{-1}.K^{-1}$
$h$	Coefficient d'échange	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$\tau_{xx}, \tau_{yy}$	contraintes visqueuses normales	$N.m^{-2}$
$\tau_{yx}, \tau_{xy}$	contraintes visqueuses tangentielles	$N.m^{-2}$
$\Delta t$	Pas de temps	S
$\beta$	Coefficient de dilatation thermique	$K^{-1}$

#### Indice :

s : solide

$\ell$  : Liquide

**Liste des figures**

Fig.1.1. schéma du problème.....	3
Fig.1.2. schéma du lit de stockage.....	4
Fig.1.3. Lit de stockage multicouche .....	5
Fig.1.4. Modèle physique.....	5
Fig.1.5. Le modèle physique étudié.....	6
Fig.1.6. Plan de la situation expérimentale.....	7
Fig.1.7. Détaillé vue croix d'un groupe du réservoir de la chaleur cylindrique s'associé avec MCP.....	8
Fig.1.8. Système de stockage.....	10
Fig.1.9. Système du stockage d'énergie solaire par chaleur latente.....	11
Fig.1.10. Le vaisseau cylindre-plein (a) et le modèle pour un cylindre (b).....	12
Fig.1.11. Système solaire de changement de phase.....	13
Fig.2.1. Classification des PCM parmi les matériaux de stockage de chaleur.....	17
Fig.2.2. Evolution de Q en fonction de T pour un corps pur.....	20
Fig. 2.3. Evolution de Q en fonction de T pour un mélange.....	21
Fig. 2.4. Evolution théorique de T en fonction du temps.....	23
Fig. 2.5. Evolution de T en fonction du temps.....	24
Fig. 2.6. Récipients transporter sang et organes qui contiennent MCP.....	28
Fig. 2.7. MCP classe SP.....	29
Fig. 2.8. MCP classe RT.....	30
Fig. 2.9. Volume requis pour le stockage de 6,7 MJ.....	36
Fig. 2.10. Densités d'énergie et gamme de températures pour chaque type de stockage.....	38
Fig. 3.1. Représentation de l'enthalpie en fonction de la température.....	41
Fig. 3.2. Courbe de refroidissement lent d'un métal pur en fonction du temps.....	41
Fig. 3.3. Capacité calorifique incluant l'effet de la chaleur latente dans un petit intervalle $2\Delta T$ au voisinage de $T_f$ .....	46



## *Liste des figures*

---

Fig. 4.1. Modèle physique étudié (a).....	49
Fig.4.2. Vue globale.....	54
Fig. 4.3. Création de la géométrie.....	54
Fig. 4.4. Les conditions aux limites numérique .....	55
Fig. 4.5. Fenêtre d'exportation de maillage .....	55
Fig. 4.6. Type de résolution.....	56
Fig. 4.7. Vue globale de Fluent.....	57
Fig.4.8. Importation de la géométrie.....	58
Fig. 4.9. Choix de pas de temps le nombre itérations.....	58
Fig. 4.10. Résiduel.....	59
Fig. 5.1. model(b).....	61
Fig. 5.2. Effet de l'épaisseur du MCP sur l'évolution de la fraction liquide en fonction du temps durant la phase de stockage.....	62
Fig. 5.3. Effet de l'épaisseur du MCP sur l'évolution de la température en fonction du temps durant la phase de stockage.....	63
Fig. 5.4. modél double passe (c).....	65
Fig. 5.5. Effet du nombre de passes de conduit sur l'évolution de la fraction liquide en fonction du temps durant la phase de stockage.....	66
Fig. 5.6. Effet du nombre de passes de conduit sur l'évolution de température en fonction du temps durant la phase de stockage.....	67
Fig. 5.7. Effet du débit d'eau sur l'évolution de la fraction liquide en fonction du temps durant la phase de stockage.....	68
Fig. 5.8. Effet du débit d'eau sur l'évolution de température en fonction du temps durant la phase de stockage.....	69
Fig. 5.9. L'évolution de la solidification en fonction du temps durant la phase de déstockage model (a).....	71
Fig. 5.10. L'évolution de température en fonction du temps durant la phase de déstockage model (a).....	72

## *Liste des figures*

---

Fig. 5.11. L'évolution de la solidification en fonction du temps durant la phase de déstockage model (b).....	73
Fig. 5.12. L'évolution de température en fonction du temps durant la phase de déstockage model (b).....	74

Liste des tableaux

Tableau 2.1. Propriétés thermiques de certains.....	17
Tableau 2.2. Caractéristiques de quelques MCP inorganiques .....	18
Tableau 2.3. Caractéristiques de quelques MCP organiques .....	19
Tableau 2.4. Avantages et inconvénients des MCP.....	19
Tableau 2.5. Matériaux Adsorbants.....	35
Tableau 4.1. Les propriétés du matériau à changement de phase SP22A17.....	50
Tableau 4.2. Propriétés de l'eau.....	50

### **Introduction général :**

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.

Dans le cadre de ce travail, on s'intéressé à l'étude numérique de stockage de l'énergie solaire par chaleur latent à l'aide d'un échangeur de chaleur. Le présent mémoire comporte cinq chapitres :

## *Introduction général*

---

Le première chapitre est une synthèse bibliographique sur les différents utilisations de Matériaux a Changement de phase et les techniques de stockage 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 les écoulements thermo-convectifs est présentée dans le troisième chapitre.

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

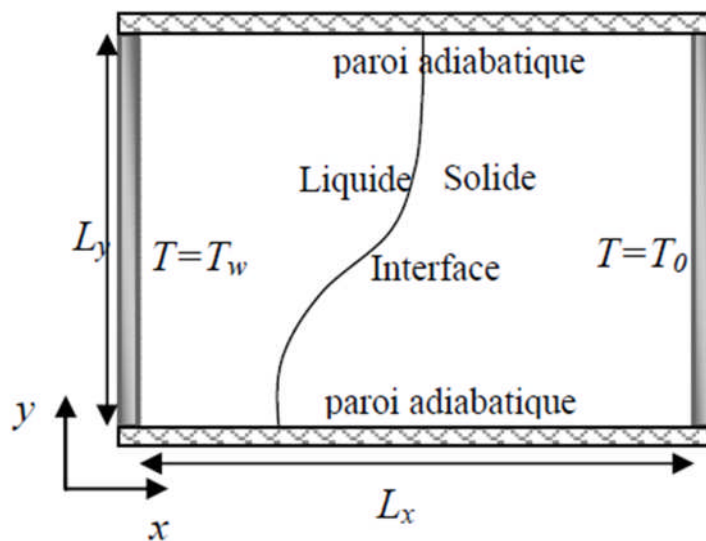
Les résultats obtenus par une simulation numérique par le logiciel fluent sont présentés dans le chapitre cinq.

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

# *Chapitre 01*

## *Recherche bibliographié*

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. **YOUNSI** [1] 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.

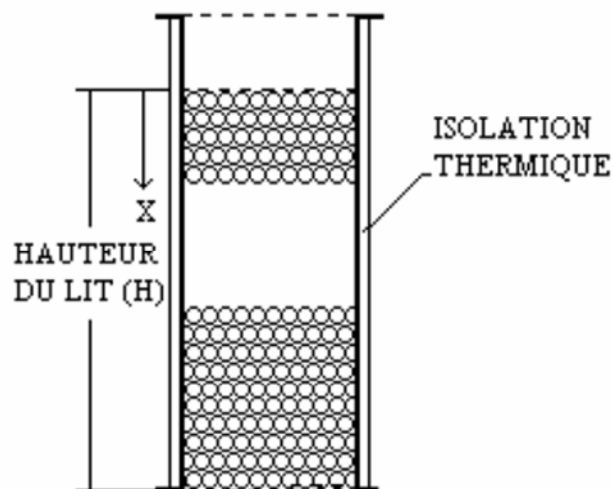


**Fig.1.1.** schéma du problème

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.

**Benmansour** [2] 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.



**Fig.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.

**Kuznik**[3] 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** [4] 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.

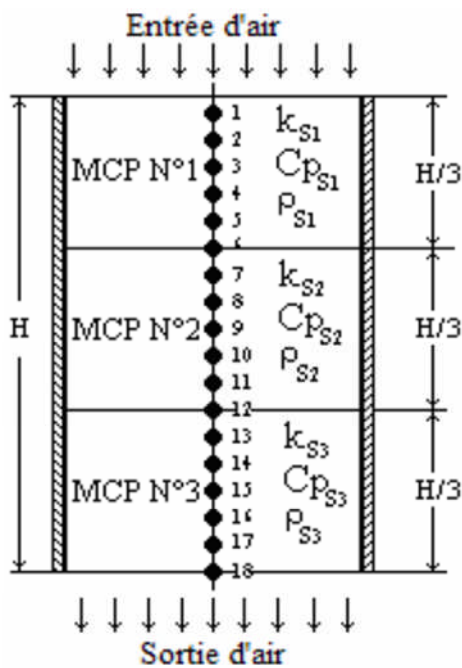


Fig.1. 3. Lit de stockage multicouche

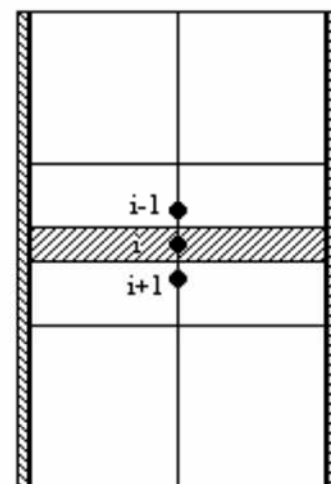


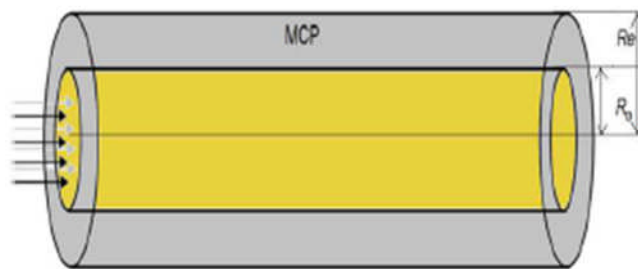
Fig.1. 4. Modèle physique

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.

**MAKHLOUF** [5] 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[6]** 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.

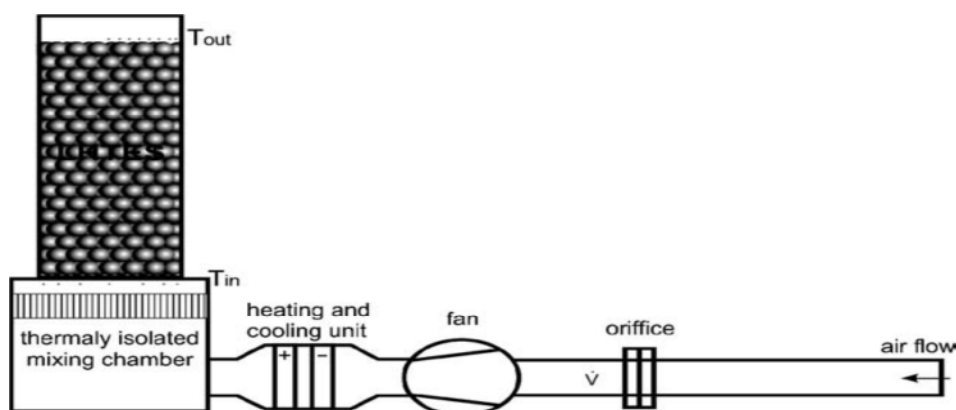


**Fig.1. 5. Le modèle physique étudié**

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.

**Arkar [7]** 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 déterminé par une utilisation d'une analyse différentielle calorimètre (ADC) à chauffage différent et taux refroidissants.

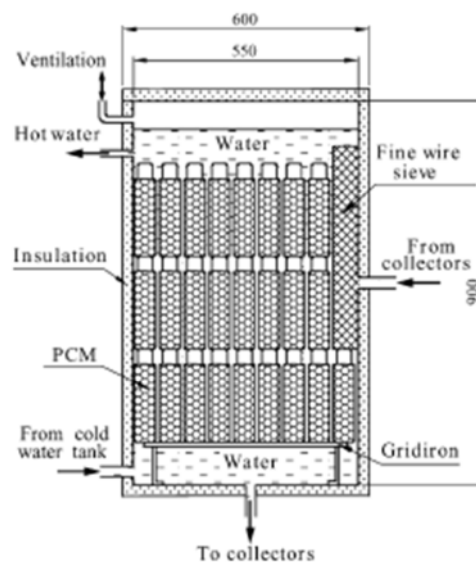


**Fig.1.6. Plan de la situation expérimentale**

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 à influent supplémentaire qui chauffe ou taux refroidissant ( $\theta$ ). 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.

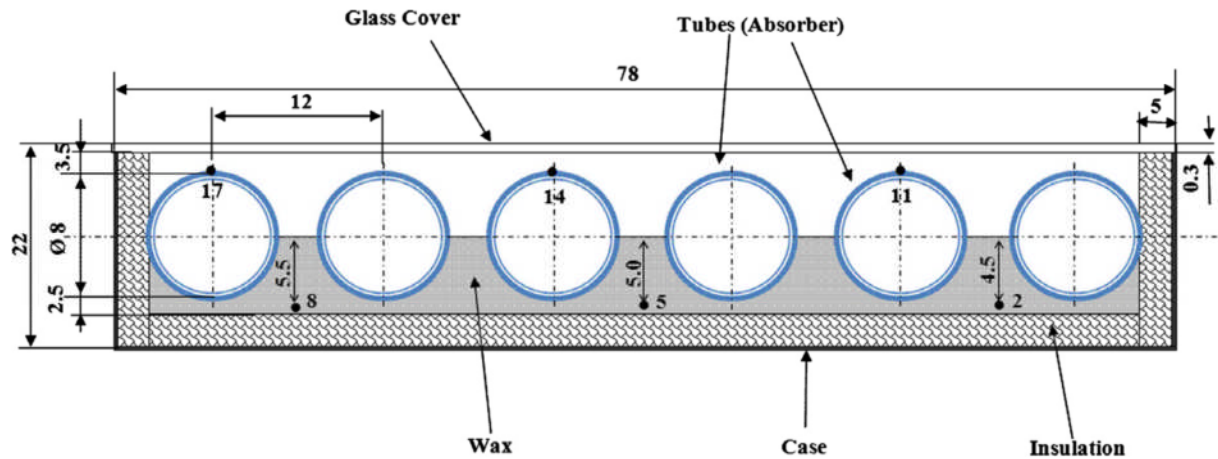
Suat Canbazog̃lu [8] a présenté les variations temporelles des températures d'eau au milieu d'un réservoir de stockage de la chaleur avec un système eau-chauffant de solaire passif combiné avec matière du changement de phase hydrate du sodium MCP pour amélioration de performance du stockage de l'énergie 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.



**Fig.1.7. Détaillé vue croix d'un groupe du réservoir de la chaleur cylindrique s'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.

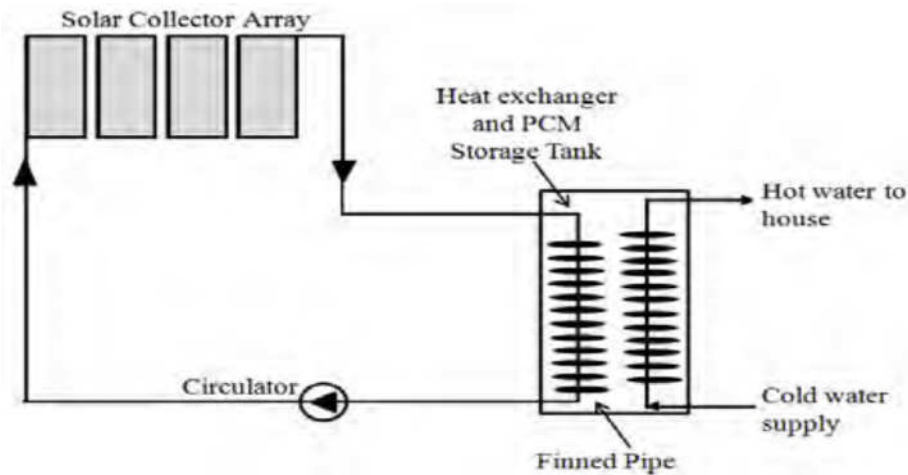
**Abdul Jabbar N [9]** a étudié un stockage d'un collecteur solaire qui consiste en pipes du cuivre relié en série est intégré avec un arrière récipient de paraffine solide comme un MCP moyens du stockage thermiques. Pour montrer la possibilité du stockage l'énergie solaire pour un chauffage d'eau.



**Fig.1. 8 un 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.

**Murray [10]** 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 chauffent l'eau domestique. Cependant, une des barrières les plus considérables à déploiement supplémentaire d'applications thermiques solaires est l'espace et le poids a 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 du stockage et opération isotherme pendant transitions de la phase, et contournerait ces problèmes.



**Fig.1. 9. Un système du stockage d'énergie 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.

**ESEN [11]** 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.

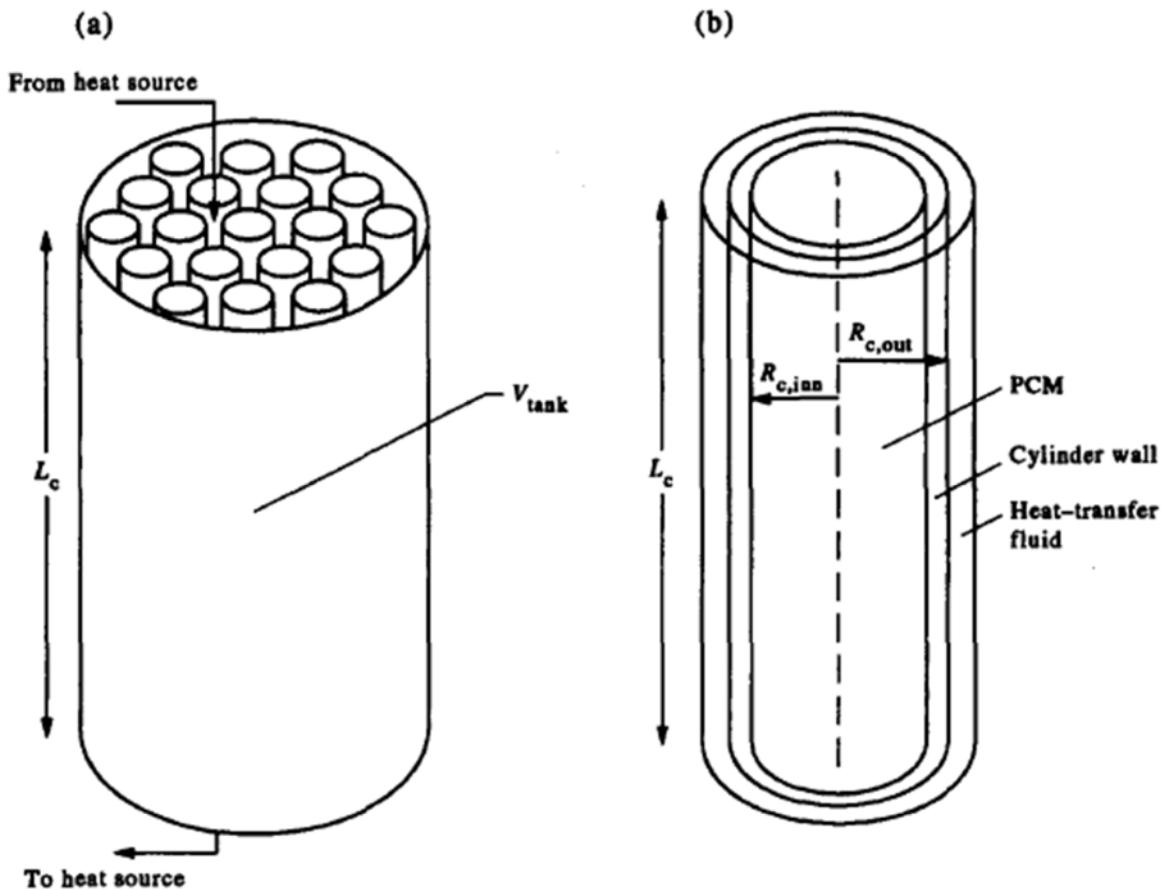
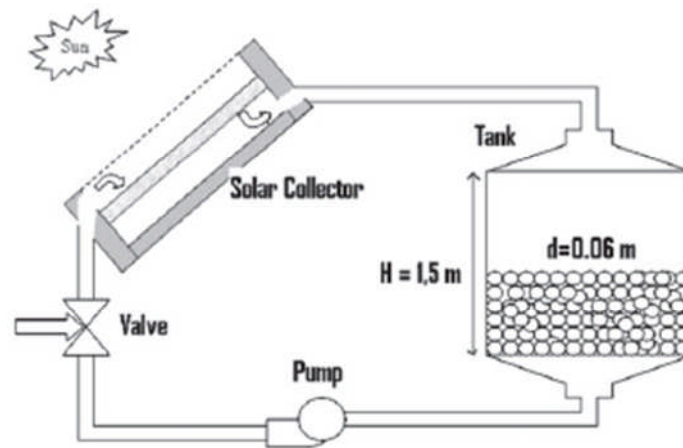


Fig.1.10. Le vaisseau cylindre-plein (a) et le modèle pour un cylindre (b).

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.

**Kouskso[12]** 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.





**Fig.1.11. Système solaire de changement de phase**

Ce modèle numérique a montré que l'efficacité thermique du système peut être considérablement améliorée pour sélectionner adéquatement 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.

## *Chapitre 02*

### *Les matériaux à changement de phase*

**1. Introduction :**

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.

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.

Le stockage d'énergie est une solution très adaptée aux systèmes de froid industriel et de climatisation. Mais dans ce secteur, le stockage par chaleur sensible est souvent inopérant du fait de la nécessité de forts écarts en températures et le stockage thermochimique est encore peu développé.

Actuellement, le stockage d'énergie par chaleur latente apporte une solution efficace aux investisseurs soucieux d'optimiser leur équipement : il permet une réelle gestion de l'énergie et donc d'utiliser des énergies au moment où elles sont les moins coûteuses (énergie solaire, tarifs de nuits pour l'électricité. . .).

Dans le cas particulier du stockage du froid, il offre de plus la possibilité de diminuer de façon sensible la quantité de fluides frigorigènes utilisés en accord avec les nouvelles législations très restrictives pour la protection de l'environnement. [13]

**2. 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. [15]

**2.1. 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. [16]

**2.1.1. 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 supérieure 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. [16]

**2.1.2. Les MCP Organiques :**

Les matériaux ou les substances organiques ont une température ou une plage de température comprise entre  $0\text{ °C}$  et  $150\text{ °C}$ . Les plus utilisés sont essentiellement à base de paraffine, des acides gras et des alcools de sucre. Ils comportent certains inconvénients, comparés aux avantages des MCP inorganiques : ils ont une plus faible conductivité à l'état solide et à l'état liquide, ils ont une chaleur latente de

fusion plus faible, ils sont inflammables. Par contre, ils ont des avantages majeurs ; ils sont disponibles dans une large gamme de températures et sont compatibles avec les matériaux conventionnels de construction, ils sont chimiquement stables et ne nécessitent pas l'utilisation d'agents de nucléation. Ils sont non réactifs la plus part du temps et ils sont recyclables. [16]

**2.1.3. Les MCP eutectiques :**

Les MCP eutectiques sont des substances composées de plusieurs MCP purs. En général, ce sont des mélanges de MCP organiques et inorganiques (organique-organique, organique inorganique, inorganique-inorganique). Ils ont deux principaux avantages ; ils ont un point de fusion net similaire à une substance pure et leurs chaleurs latentes volumétriques sont légèrement supérieures à celle des composés organiques purs. Leurs deux principaux inconvénients sont que l'on a peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux et ils sont peu utilisés au niveau des systèmes industriels. [16]

**Tableau 2.1. Propriétés thermiques de certains MCP. [16]**

Matériaux		Température de fusion (°C)	Enthalpie de fusion (kj/kg)
PCMs Organiques	Eau	0	333.6
	Stéarate de butyle	19	140
	L'acide caprique-laurique	21	143
PCMs Inorganiques	KF.4H <sub>2</sub> O	18.5	231
	Mn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	25.8	125.9
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .10H <sub>2</sub> O	32	251
PCMs Eutectiques	66,6%CaCL <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O+33,3%Mgcl <sub>2</sub> .0.6H <sub>2</sub> O	25	127
	48%CaCL <sub>2</sub> +4,3% NaCl+47,3%H <sub>2</sub> O	26,8	188
	47%Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O+53%Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	30	136

**2.2. 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.

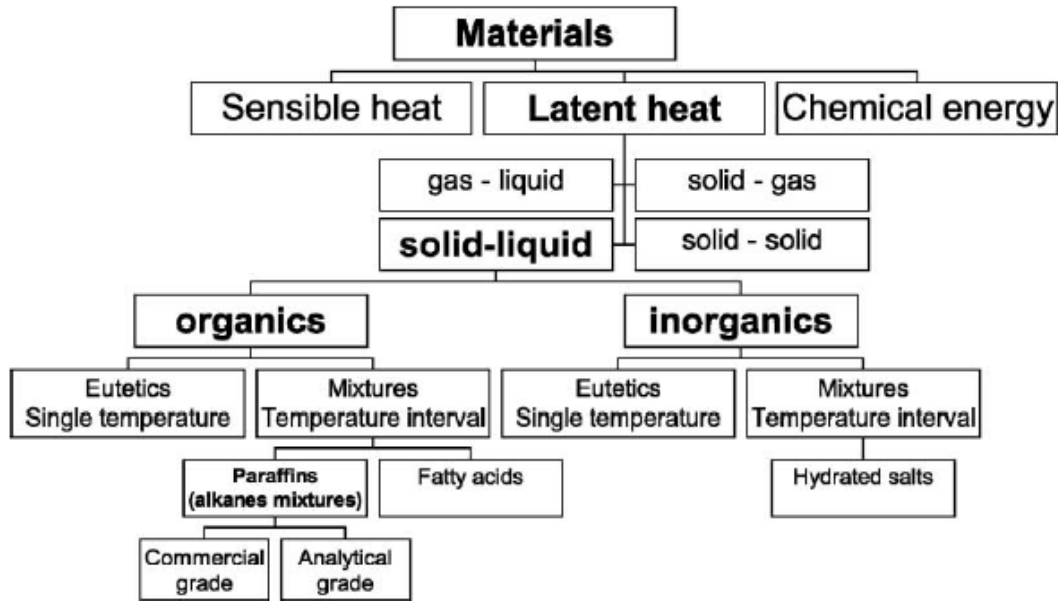


Fig.2.1. Classification des PCM parmi les matériaux de stockage de chaleur. [17]

Les caractéristiques de quelques MCP sont rassemblées dans le Tableau (2.2) et le Tableau (2.3).

Tableau 2.2. Caractéristiques de quelques MCP inorganiques. [17]

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

**Tableau 2.3 : Caractéristiques de quelques MCP organiques.** [17]

Type de substance	Composé	Température de fusion (°C)	$\Delta H_{fusion}$ (kJ/kg)	Conductivité thermique ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )	Densité ( $kg.m^{-3}$ )
Substances organiques	Paraffine C <sub>21</sub> -C <sub>50</sub>	66-68	189	0.21 sol	0.830 liq, 70°C 0.930 sol, 20°C
	Naphtalène	80	147.7	0.132 liq, 83.8°C 0.341 sol, 49.9°C	976 liq, 84°C 1145 sol, 20°C
Eutectique organique	67.1% Naphtalène + 32.9% Acide benzoïque	67	123.4	0.130 liq, 100°C 0.282 sol, 38°C	n.d.
Acides gras	Acide caprique	32	152.7	0.153 liq, 38.5°C	878 liq, 45°C 1004 sol, 24°C
	Acide stéarique	69	202.5	0.172 liq, 70°C	848 liq, 100°C 965 sol, 24°C

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

**2.2.1. 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).

**Tableau 2.4. Avantages et inconvénients des MCP.** [15]

	Avantages	Inconvénients
<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>

2.3. Base théorique des matériaux à changement de phase:

2.3.1. Température de fusion :

C'est une des caractéristiques essentielle 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 :



Les échanges entre le matériau et le milieu extérieur à température  $T_e$  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. [15]

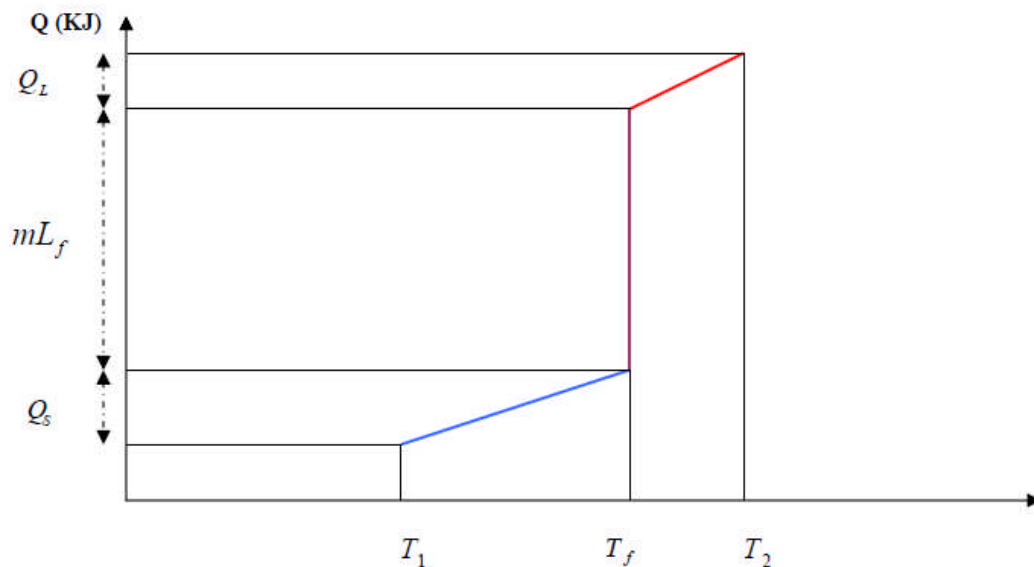
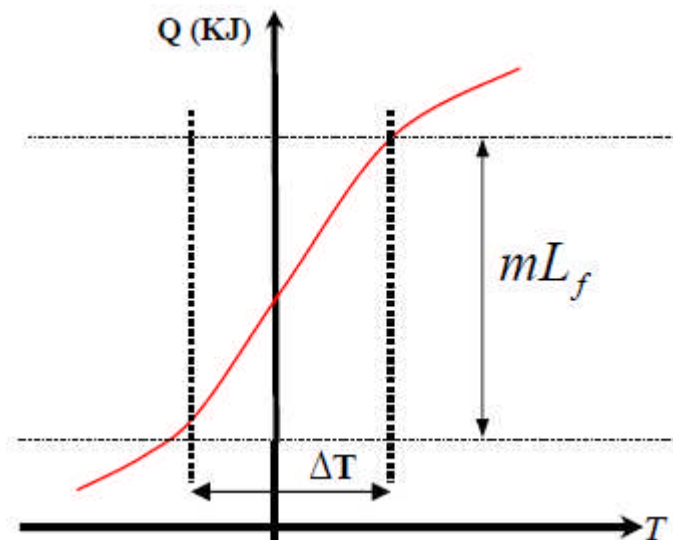


Fig.2.2 Evolution de Q en fonction de T pour un corps pur. [15]





**Fig. 2.3** Evolution de Q en fonction de T pour un mélange. [15]

Ces schémas Fig. (2.2) et (2.3) symbolisent respectivement le stockage mixte (sensible/latent) d'un corps pur Fig. (2.2) et d'un corps composé Fig. (2.3) 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. [15]

### 2.3.1. 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. [15]

## **2.4. Les problèmes liés au changement de phase :**

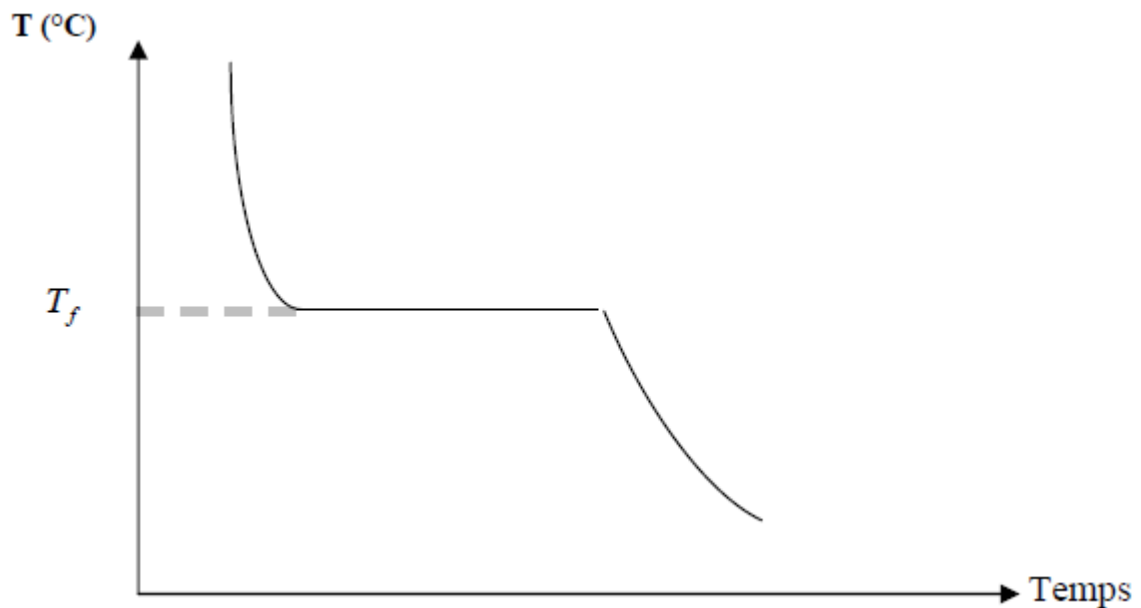
### **La ségrégation :**

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. [15]

### **La surfusion :**

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



**Fig. 2.4 :** Evolution théorique de  $T$  en fonction du temps. [15]

Dans la réalité, les courbes de solidification des corps ont souvent des allures plus ou moins différentes de cette courbe théorique du fait de la surfusion des composés utilisés.

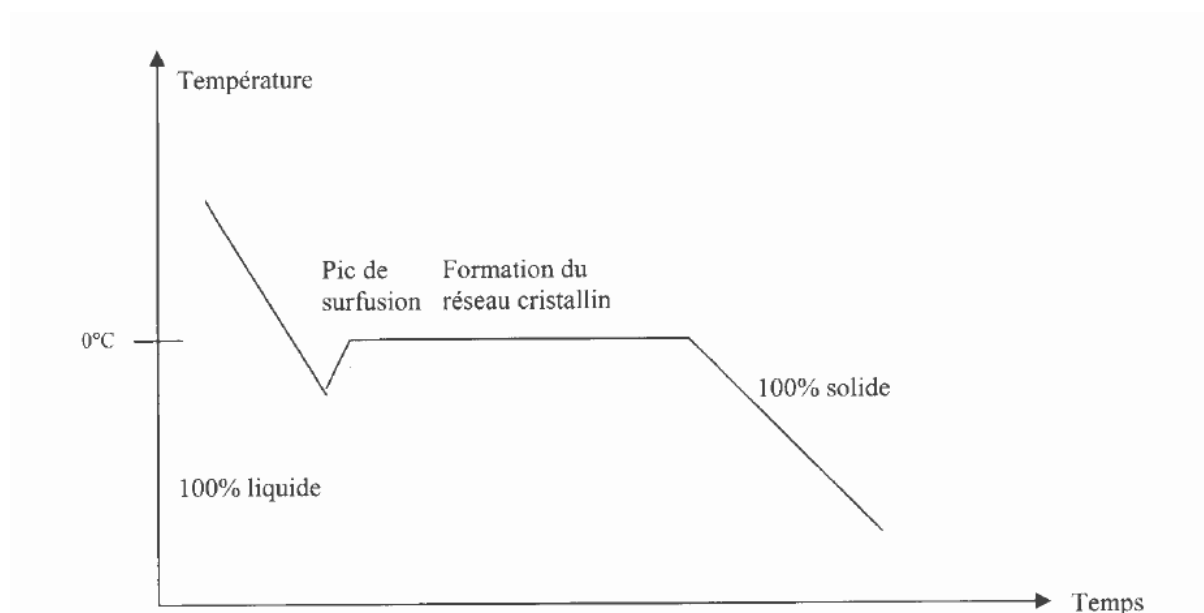
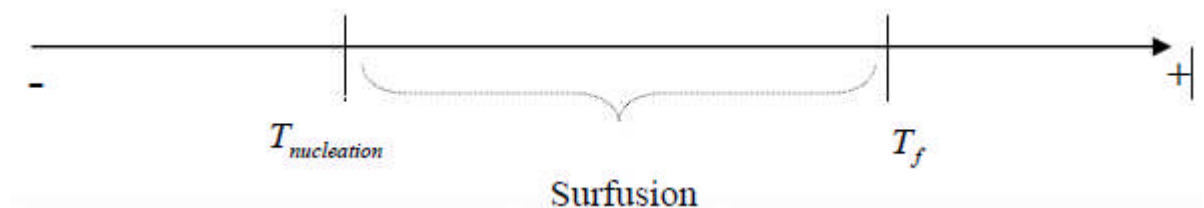
Ce phénomène de surfusion est intimement lié à la cristallisation, c'est l'une des difficultés majeures affectant le stockage à chaleur latente.

Physiquement, comprendre la surfusion revient à comprendre les mécanismes qui font que lors du refroidissement d'un liquide, la solidification se fait en général en dessous de la température de changement de phase : le matériau peut rester liquide jusqu'à plusieurs dizaines de degrés en dessous de la température de fusion dans certains cas. Par contre, on n'observe jamais un solide pur au delà de la température de fusion. Il peut même arriver pour certains matériaux que la fusion se déclenche à une température  $T$  inférieure à  $T_f$  ( $T$  très proche de  $T_f$ ); c'est le cas de certains matériaux comme les sels purs à fusion congruente.

Dans ce cas, pour cristalliser sous une pression atmosphérique (pression constante), la température d'un matériau à changement de phase doit être abaissée jusqu'à une température inférieure à la température de solidification théorique  $T_f$ . Cette température est appelée température de nucléation

( $T_{\text{nucléation}}$ ). 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. [15]



**Fig. 2.5** Evolution de  $T$  en fonction du temps. [15]

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. [15]

### **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. [17]

### **2.5. 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). [16]

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

Un grand nombre de matériaux à changement de phase possède une température de fusion dans la gamme de température (0-120°C). Cependant, ils ne peuvent être utilisés comme matériaux de stockage que lorsqu'ils possèdent certaines propriétés thermodynamiques, cinétiques et chimiques qui sont définies à partir d'un certain nombre de critères. [18]

### **2.6.1 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 de matériau doit pouvoir emmagasiner une grande quantité de chaleur) ;
- Une chaleur spécifique élevée de sorte que le matériau puisse disposer d'une chaleur sensible significative ;
- Une fusion congruente ;
- Une petite augmentation de volume pendant la phase de transition. [18]

### **2.6.2 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. [18]

### **2.6.3 Critères chimique :**

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. [18]

#### **2.6.4 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. [18]

### **2.7. Applications des MCP :**

#### **2.7.1 Le transport de produits alimentaires :**

Les MCP sont utilisés dans l'industrie agroalimentaire, pharmaceutique et médicale pour limiter au maximum les variations de température que subissent les aliments, les médicaments ou les composants sensibles par exemple le cas du transport du sang. Ils se présentent principalement sous la forme de « petits sacs » plastiques contenant le matériau choisi disposé au plus près du produit à conserver. [20]

#### **2.7.2. Le stockage de l'énergie thermique :**

Les MCP stockent l'énergie en changeant de phase solide-liquide (fusion) puis ils restituent la chaleur par le changement de phase liquide-solide (solidification). Le choix de MCP le plus approprié est fondé sur un certain nombre de facteurs : le prix, la chaleur latente et la conductivité thermique (phases liquide et solide), etc. Un MCP connu pour cette application est l'acétate de sodium tri-hydraté ayant un point de fusion vers 58 °C. Ce matériau a été mis en oeuvre dans des

conteneurs déplaçables par camions pour stocker la chaleur évacuée d'incinérateurs d'ordures ménagères. La restitution de l'énergie se fait alors à distance sur des stations équipées, à une température d'environ 50 °C.[20]



### 2.7.3. Applications médicales :

Dans le secteur médical, une des applications principales est le transport de sang Fig. 2.9 et organes. Récipients usagés pour ce travail des buts semblables à ceux expliqués avant. D'autres applications médicales peuvent être des coussinets chauds ou froids pour traiter la douleur locale dans le corps[19].



**Fig.2.6.** Récipients transporter sang et organes qui contiennent MCP

### 2.8. Classe de MCP :

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

#### 2.8.1 Matériaux changement de phase SP :

La création de la chaleur latente mêlée SP a conduit à une nouvelle et innovante classe des MCP non inflammables. SP consiste en une composition unique



d'hydrates de sel et de composés organiques qui rend vraiment le cycle stable sans détérioration au fil du temps.



**Fig.2.7.** MCP Class SP

- **Application :**

SP est largement utilisé emballés dans nos CSM-panneaux propriétaires pour les systèmes de refroidissement actif et passif et de chauffage, comme par exemple des climatiseurs et des éléments de plafond et le mur. Dans cette forme SP devient rapidement le MCP préféré pour une utilisation dans l'industrie de la construction.

L'utilisation de différents additifs ses propriétés peut être adaptées aux besoins particuliers des clients. Il peut également être transformé en substance ou de la structure d'absorption.

- **Avantage :**

- ✓ Une performance stable tout au long des cycles de changement de phase.
- ✓ Grande capacité de stockage thermique.
- ✓ surfusion limitée.
- ✓ SP-21 à SP26E pas inflammabilité.
- ✓ non toxique.
- ✓ Les températures de fusion différentes entre  $-21^{\circ}\text{C}$  et  $90^{\circ}\text{C}$  sont disponibles. [30]

**2.8.2. Matériaux changement de phase RT :**

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



**Fig.2.8.** MCP Class RT

- **Caractéristiques :**

RT est disponible dans une large gamme de températures de fonctionnement de -10 ° C à environ 82 ° C. Si vous ne trouvez pas la température besoins de votre application, s'il vous plaît contactez-nous - la plupart des températures peuvent être fabriqués sur mesure.

En outre, la température des points spécifiques de notre gamme de RT de grande capacité (par exemple RT 5 HC) est disponible. Ceux-ci ont la capacité de stockage de chaleur de 25% à 30 % plus latente que la RT classique - nous contacter pour plus de détails ou d'autres points de température.

- **Avantage :**

- ✓ la capacité de stockage d'énergie thermique élevée.
- ✓ stockage de la chaleur et de la libération ont lieu à température constante.
- ✓ produit de longue durée.

- ✓ performances constantes sur plusieurs dizaines de milliers de cycles.
- ✓ gamme de températures de fusion entre env. -10 ° C et 90 ° C.
- ✓ manipulation facile.
- ✓ écologiquement inoffensif.
- ✓ non toxique.
- ✓ 100% recyclable. [30]

### **3. Le 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.

#### **3.1 Types de stockage d'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 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].

##### **3.1.1. 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) :

$$Q_{\text{stocke}} = m c_p \Delta T \quad (2.1)$$

Avec  $Q_{\text{stocke}}$ , 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°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 son non toxicité font du stockage par chaleur sensible de l'eau le plus répandu.

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). [14]

### 3.1.2. 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 (2.2):

$$Q_{latente} = m L_s \quad (2.2)$$

Avec  $m$ , la masse du matériau de stockage ( $kg$ ) et  $L_s$  la chaleur massique de changement d'état du matériau ( $J.kg^{-1}$ ). [14]

#### 3.1.2.1 Systèmes de stockage d'énergie par chaleur latente :

Il existe différents procédés de stockage d'énergie par chaleur latente. Dans le domaine du froid, on rencontre essentiellement les technologies suivantes. [13]

- ✓ **Bacs à glace** : C'est un système qui est actuellement très répandu à cause de sa simplicité et de la très longue expérience des installateurs. Il s'agit simplement d'une cuve contenant de l'eau en contact direct avec une batterie où circule un liquide froid qui peut être de l'eau glycol ou le fluide frigorigène lui-même. Autour de ce circuit va se former de la glace remplissant complètement ou partiellement la cuve. Le déstockage s'effectue soit par pompage de l'eau à 0 °C mélangée à la glace (fusion externe) soit par circulation d'un liquide chaud (fusion interne) dans la batterie. [13]

- ✓ **MCP encapsulés** : Le principe de ce stockage est d'utiliser un MCP confiné dans des récipients étanches de petites dimensions (quelques cm<sup>3</sup> à quelques litres). Il suffit de les refroidir pour cristalliser leur contenu et de les mettre en contact avec la charge chaude pour le déstockage. Essentiellement, trois formes de capsules sont disponibles : des sphères, des bâtonnets et des plaques. Un fluide caloporteur procède à un échange d'énergie au contact des capsules. Ce type de stockage, permet l'utilisation des différents types de MCP sans exception. En effet, l'utilisation des eutectiques par exemple, s'avère impossible ou très difficile dans les systèmes tels que le bac à glace car dans de gros volumes, nous rencontrons facilement les phénomènes de ségrégation (séparation des composants de la solution). [13]
  
- ✓ **Fluides frigoporteurs diphasiques** : les frigoporteurs diphasiques solide-liquide les plus étudiés ces dernières années sont les coulis de glace formés de cristaux de glace en suspension dans une solution aqueuse. Ces coulis sont généralement produits sur des parois réfrigérées raclées ou brossées permettant leur détachement de la paroi. Les limites de ce procédé résident, pour l'instant, dans le coût élevé du dispositif de production et dans une fiabilité réduite. [13]

### 3.1.2.2 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). [14]

**3.1.3 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]

**Tableau 2.5 Matériaux Adsorbants. [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	Ettringite	Matériaux nanoporeux hybrides
Micro-perles de mésocarbone	Oxydes de métal	

**3.1.4 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.

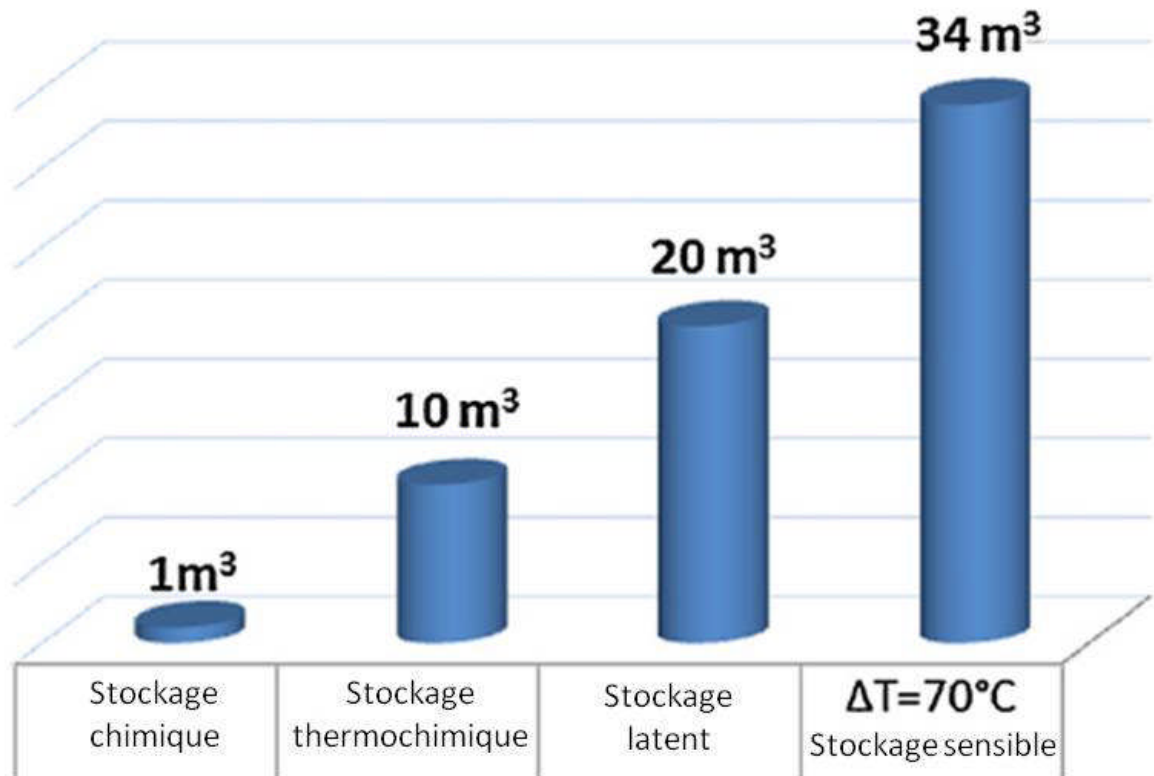
Les réactions précédentes présentent toutes des densités énergétiques intéressantes et peuvent être utilisées pour des applications aux bâtiments. Cependant, la partie endothermique est souvent assez complexe et peut nécessiter d'être réalisée dans un environnement industriel. [14]

### **3.2 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. 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. [14]





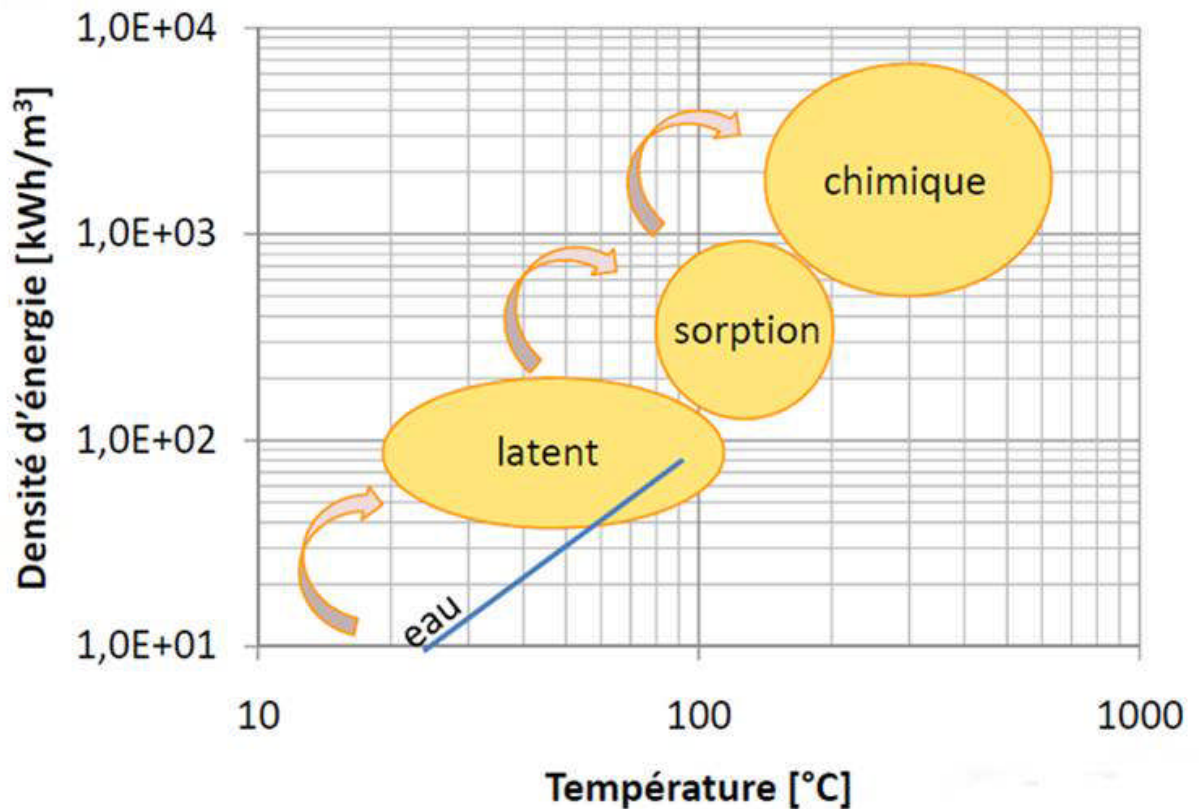
**Fig. 2.9.** Volume requis pour le stockage de 6,7 MJ

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

Théoriquement, le stockage chimique est le plus performant en termes de densité énergétique de stockage. Cependant, il présente des inconvénients rédhibitoires pour une application aux bâtiments :

- les températures auxquelles se produisent les réactions sont trop élevées,
- les réactions sont peu réversibles, voire irréversibles car les liaisons formées entre les molécules sont covalentes,
- les matériaux utilisés sont généralement toxiques. [14]



**Fig. 2.10.** Densités d'énergie et gamme de températures pour chaque type de stockage. [14]

## *Chapitre 03*

### *Modélisation Mathématiques du phénomène de changement de phase*

## **1. 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.

## **2. Les écoulements avec changement de phase :**

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

### **2.1. Modélisation thermique de la théorie de la Solidification :**

Soit un métal pur en état de fusion à une température  $T_f$  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 fig. 3.1. (a) et (b)

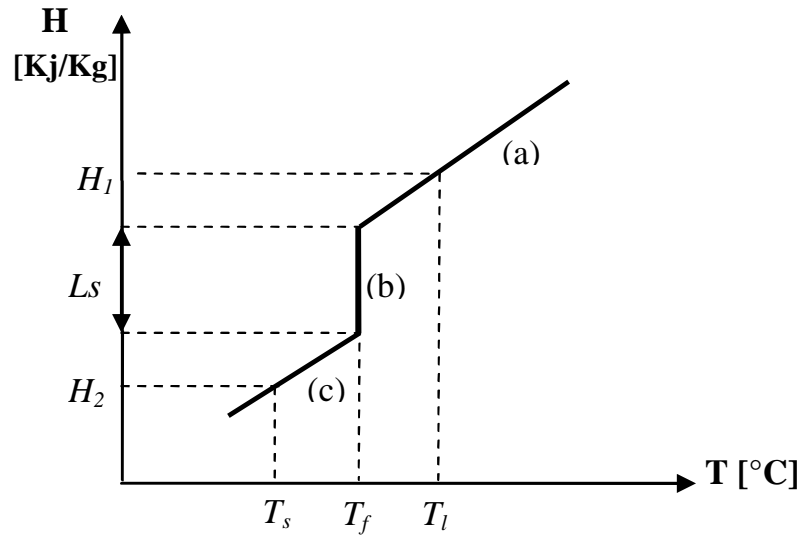


Fig. 3.1. Représentation de l'enthalpie en fonction de la température.

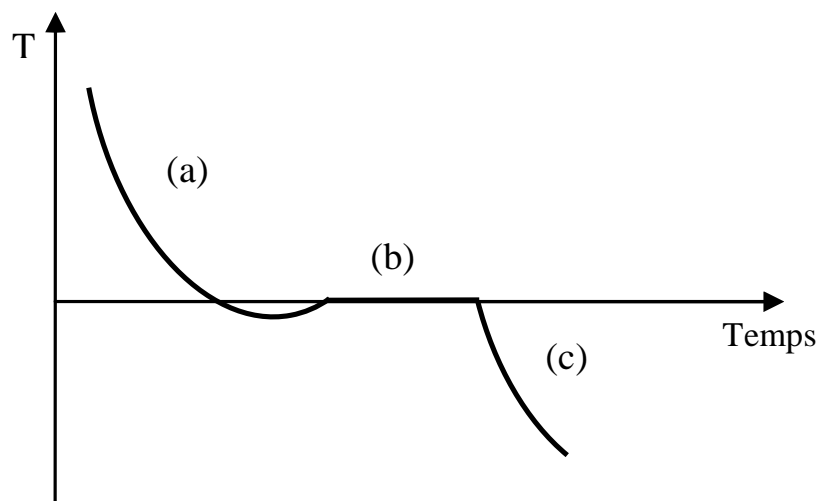


Fig. 3.2. : Courbe de refroidissement lent d'un métal pur en fonction du temps.

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

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

$H$  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 :

$$\Delta H = C_{pl}(T_\ell - T_f) + L_s + C_{ps}(T_\ell - T_s) \quad (3.2)$$

Avec :

$T_\ell$  : 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 (b) sur le graphe.

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

$$C_{pl}(T_\ell - T_f) + L_s \quad (3.3)$$

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

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

Pour un alliage, où la solidification prend place à travers un intervalle de solidification ( $T_\ell - T_s$ ), l'enthalpie est reliée à la température par.  $T_f$  : désigne la fraction liquide.

$$\Delta H = \begin{cases} C_{pl} \Delta T + L_s & \text{pour } T \geq T_f \\ C_p \Delta T + f_\ell L_s & \text{pour } T_s < T < T_\ell \\ C_{ps} \Delta T & \text{pour } T \leq T_f \end{cases} \quad (3.3)$$

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.

### 3. Les méthodes d'analyse des écoulements avec changement de phase :

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**.

#### 3.1 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 résolution de l'équation du bilan à l'interface (condition de Stefan).

Les équations gouvernantes le transfert de chaleur sont :

Région liquide :

$$C_{p\ell} \rho_{\ell} \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda_{\ell} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3.4)$$

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]

$$\begin{cases} T_{\ell} = T_s = T_f \\ -\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial n} + \lambda_{\ell} \frac{\partial T_{\ell}}{\partial n} = \rho_s L_s \frac{\partial \xi}{\partial n} \end{cases} \quad (3.6)$$

$n$  désigne la normale au front et  $\xi$  la position du 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 où 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.

### **3.2. 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 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.

#### **3.2.1. 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 :

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

Où  $\delta(T - T_f)$  représente la fonction de Dirac, qui est infinie à  $T = T_f$  et 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]

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

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

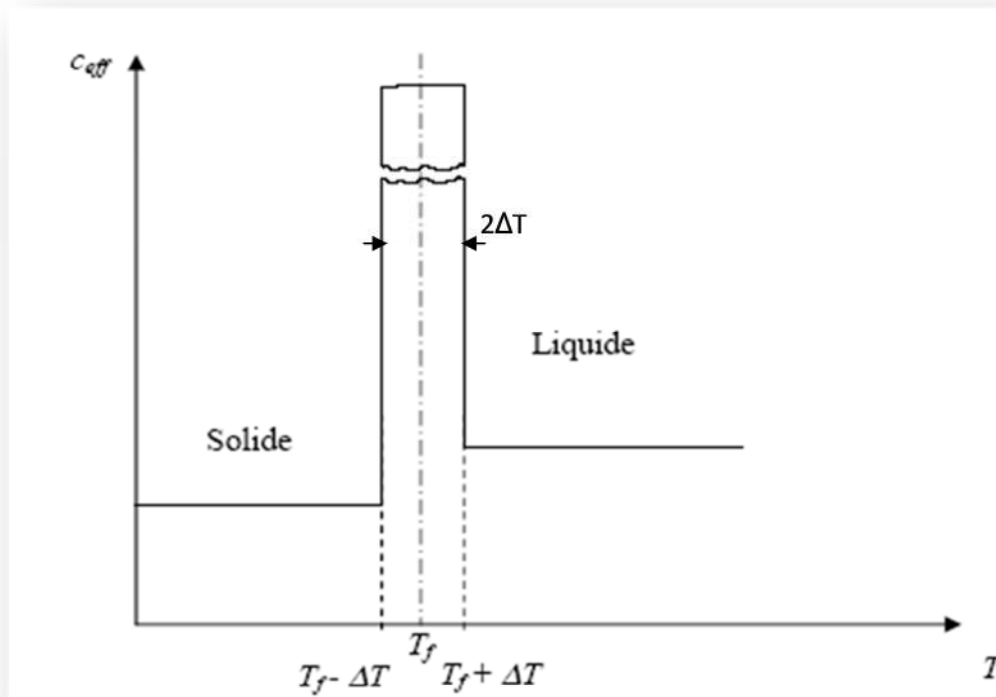


Fig. 3.3: Capacité calorifique incluant l'effet de la chaleur latente dans un petit intervalle  $2\Delta T$  au voisinage de  $T_f$ .

### 3.2.2. 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 :

$$H = C_p T + f_\ell L_s \quad (3.12)$$

Avec  $f_\ell = 1$  dans la région liquide,  $f_\ell = 0$  dans la région solide et  $0 \leq f_\ell \leq 1$  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] :

$$f_\ell = \begin{cases} 1 & T > T_\ell \\ \frac{T-T_s}{T_\ell-T_s} & T_s \leq T \leq T_\ell \\ 0 & T < T_s \end{cases} \quad (3.13)$$

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 donne par :

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

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

## *Chapitre 04*

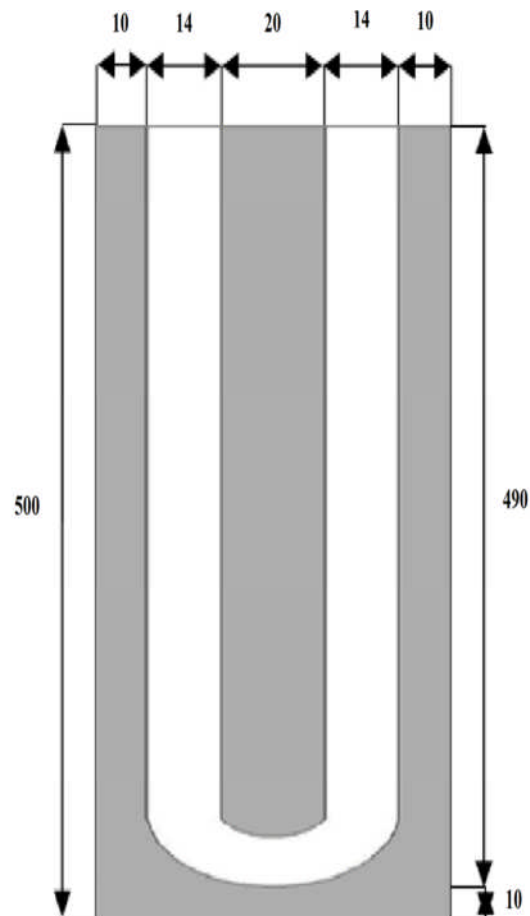
### *Position du problème*

## 1. Introduction :

Dans ce chapitre, on présente une étude de simulation numérique sur le stockage d'énergie solaire par chaleur latente avec un matériau à changement de phase MCP. La simulation numérique est effectuée à l'aide du code commercial **Fluent 6.3.2**.

## 2. Géométrie étudiée :

Le modèle physique étudié est un cylindre rempli par un MCP de type SP22A17, à l'intérieur une canalisation d'eau passe à travers pour stocker la chaleur durant les périodes ensoleillées et la récupérer durant les périodes déficitaires. Les paramètres géométriques du modèle sont représentés dans la Fig.4.1. Les propriétés thermo-physiques sont données dans les tableaux suivants (3.1) et (3.2), respectivement.



**Fig. 4.1.** Modèle physique étudié (a).

**Tableau 4.1.** Les propriétés du matériau à changement de phase SP22A17. [31]

Propriétés	Valeurs
Masse volumique $\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	1400
Chaleur spécifique $c_p$ [J/Kg k]	4000
Conductivité thermique $\lambda$ [W/mK]	0.6
Chaleur latente $L_f$ [J/Kg]	150000
Température du solidus [K]	295
Température du liquidus [K]	297
La viscosité dynamique $\mu$ [Kg/ms]	0.00164428
Coefficient de dilatation thermique [K <sup>-1</sup> ]	0.001

**Tableau 4.2.** Propriétés de l'eau. [32]

Propriétés	Valeurs
Masse volumique $\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	998.2
Chaleur spécifique $c_p$ [J/Kg k]	4182
Conductivité thermique $\lambda$ [W/mK]	0.6
Viscosité dynamique $\mu$ [Kg/ms]	0.001003
Température de référence $T_{fr}$ [K]	298

### 3. Formulations mathématique :

Les équations qui gouvernant l'écoulement d'un fluide bidimensionnel, newtonien, incompressible en écoulement laminaire sont :

➤ **Equation de conservation de masse :**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (4.1)$$

Pour un fluide incompressible la masse volumique demeure constante et on a  $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ , donc :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (4.2)$$

$u$  et  $v$  sont les composantes de la vitesse du fluide dans les directions  $x$  et  $y$ , respectivement.

➤ **Equation de quantité de mouvement :**

Suivant ( $Ox$ ) :

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_x \quad (4.3)$$

Suivant ( $Oy$ ) :

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \left( \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho g \beta (T - T_{ref}) + S_y \quad (4.4)$$

avec les composants du tenseur des contraintes visqueuses sont données par :

$$\tau_{xx} = \mu \left[ 2 \frac{\partial u}{\partial x} \right] \quad (4.5)$$

$$\tau_{yy} = \mu \left[ 2 \frac{\partial v}{\partial y} \right] \quad (4.6)$$

$$\tau_{yx} = \tau_{xy} = \mu \left[ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right] \quad (4.7)$$

$p$  : présente la pression.

$\rho g \beta (T - T_{ref})$  représente de terme de l'approximation de Boussinesq. La masse volumique du fluide varie avec la température et cette variation de la masse volumique est la cause du mouvement du fluide. Si la variation est faible, on peut traiter la masse volumique comme constante dans les termes transitoire et convectif et la traiter comme uniformément variable dans le terme source.

$S_x$  et  $S_y$  représentent les termes sources dans les directions  $x$  et  $y$ , respectivement, utilisées pour modifier les équations de la quantité de mouvement dans la région

pâteuse. Le modèle de Darcy pour les milieux poreux est utilisé pour modifier les vitesses dans les régions solide et pâteuse :

$$S_x = A u \text{ et } S_y = A v \quad (4.8)$$

avec :

$$A = C \frac{(1-f_\ell)^2}{f_\ell^3 + 0,000001} \quad (4.9)$$

C et  $f_\ell$  représentent la constante du darcy et la fraction massique, respectivement

$$f_\ell = \begin{cases} 1 & \text{si } T > T_1 \\ \frac{T-T_s}{T_1-T_s} & \text{si } T_s < T < T_1 \\ 0 & \text{si } T < T_s \end{cases} \quad (4.10)$$

➤ **Equation de conservation d'énergie :**

Fluent utilise la méthode enthalpique pour la modélisation thermique du MCP

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left( \frac{\partial T^2}{\partial x^2} + \frac{\partial T^2}{\partial y^2} \right) + S_T \quad (4.11)$$

Avec

$$S_T = -\rho L_s \left( \frac{\partial f_\ell}{\partial t} + u \frac{\partial f_\ell}{\partial x} + v \frac{\partial f_\ell}{\partial y} \right) \quad (4.12)$$

**4. Les conditions initiales et aux limites :**

Conditions initiales :

Après plusieurs essais de changer les débits dans le calcul numérique on a choisis ce débit :

$$q_m = 0,01 \text{ kg/s} \quad (4.13.a)$$

On à fixe la température moyenne de l'eau qui arrivé d'un capteur solaire a l'entrée de la canalisation de l'échangeur.

$$T_e = T_{in} \quad (4.13.b)$$

Avec  $T_{in}$  est égale à 313 K durant la période de stockage et 285 K durant la période de déstockage.

A la sortie : On suppose un écoulement pleinement développé imposant un gradient nul de toutes les variables :



$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (4.14)$$

A la paroi :

$$u = v = 0 \quad (4.15.a)$$

$$\frac{dT}{dx} = 0 \text{ sur les parois verticales} \quad (4.15.b)$$

$$\frac{dT}{dy} = 0 \text{ sur les parois horizontales} \quad (4.15.c)$$

## 5. Gambit et Fluent :

**FLUENT** est employé pour résoudre les problèmes de flux de fluide dans les phénomènes de la solidification ou de fusion à une température constante (métaux purs) ou dans un intervalle de températures (alliages binaires). **FLUENT** utilise une formulation d'enthalpie-porosité, où la zone pâteuse (liquide-solide) est traitée comme zone poreuse avec la porosité égale à la fraction liquide.

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

### 5.1. Préprocesseur Gambit :

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

Les options de génération de maillage de **GAMBIT** offrent une flexibilité de choix. La géométrie peut être décomposé en plusieurs parties pour générer un maillage structuré, sinon **GAMBIT** génère automatique un maillage non structure adapté au type de géométrie construite. Les défauts sont détectés à l'aide de son interface Comportant plusieurs fenêtres d'outils de création, génération, vérification du maillage du modèle étudié et l'incorporation des conditions aux limites.

5.1.1. Interface de Gambit :

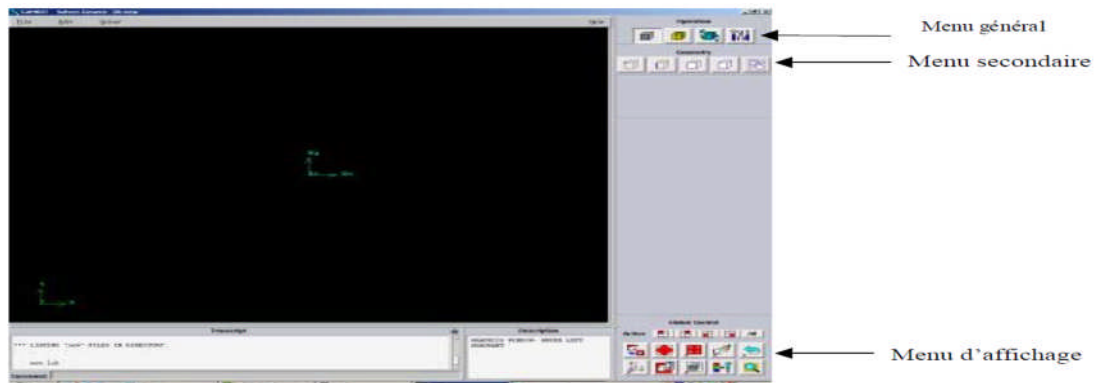


Fig.4.2. Vue globale.

- Création de la géométrie :

On trace la géométrie sur logiciel gambit 2.3.16 comme indique la Fig\*\*\*\*

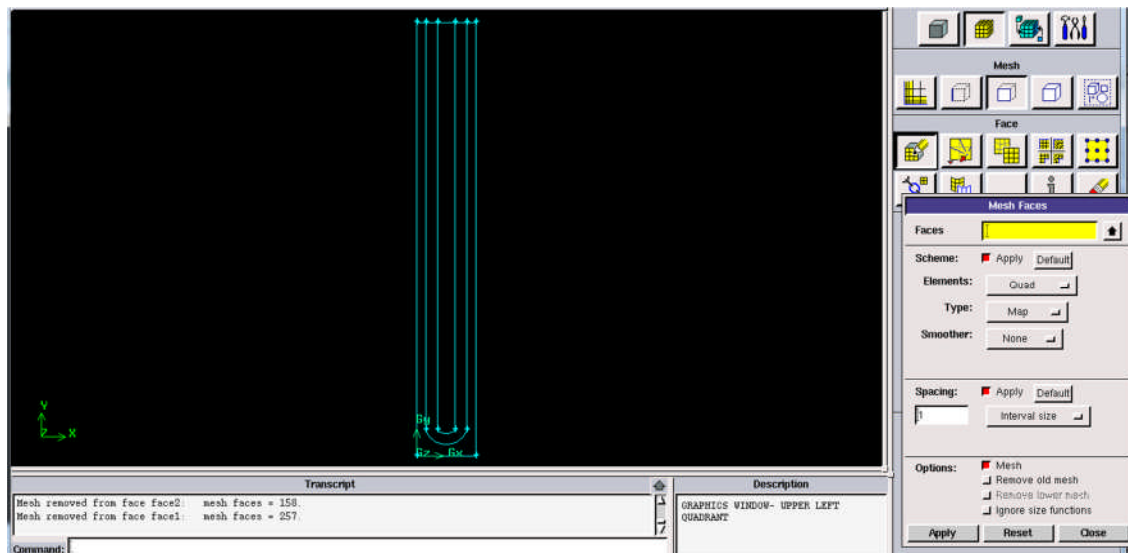


Fig. 4.3. Création de la géométrie.

- Les conditions aux limites numériques :

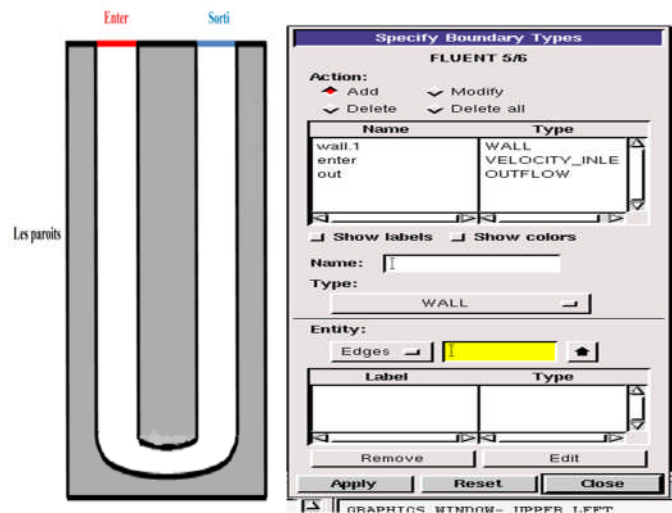


Fig. 4.4. Les conditions aux limites numériques.

- Exporte un fichier qui contient le maillage de notre modèle physique étudié, pourtant le nom `essiU1` :

File → export → msh

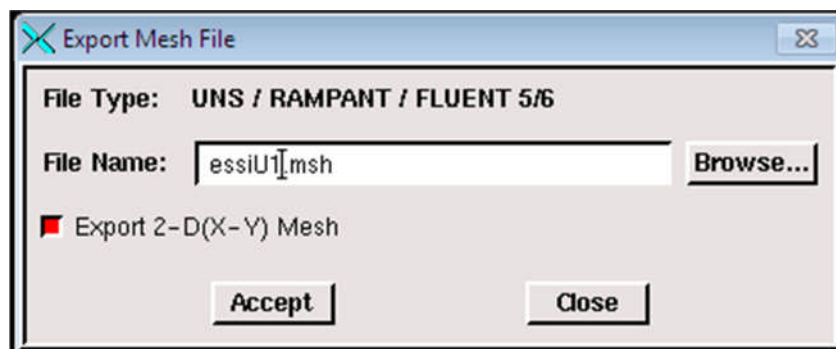


Fig.4.5. fenêtre d'exportation de maillage.

## 5.2. Code Fluent :

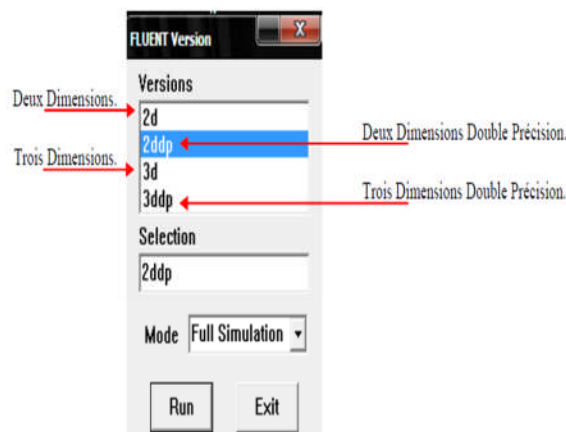
Fluent est un logiciel de calculs numériques en dynamique des fluides CFD

(Computational fluid dynamics) destiné à effectuer de simulation numérique des problèmes d'écoulements fluides. Le package Fluent s'appuie sur la méthode de volume-fini pour résoudre les équations régissant le mouvement d'un fluide en écoulement et comprend des modèles physiques différents tels que :

- Ecoulements 2D ou 3D ;
- Ecoulement stationnaire ou in stationnaire ;
- Ecoulements incompressibles ou compressibles (subsoniques, transsoniques, Supersoniques ou hypersoniques) ;
- Ecoulements non visqueux, laminaires ou turbulents ;
- Fluide Newtonien ou non ;
- Transfert de chaleur forcé, par conduction, par convection ou les deux (conjugue) ou radiatif ;
- Ecoulements avec changements de phases ;
- Ecoulements en milieu poreux.

### 5.2.1. Interface du code Fluent :

La première chose à faire quand vous entrez sous fluent est de choisir le type de résolution que Fluent va avoir à faire : résolution 2D ou 3D, figure (III.6). Puis d'ouvrir ou d'importer un maillage (fichier.msh), et ce en suivant la procédure suivante : File → Import→ case, Fig. 4.6



**Fig. 4.6.** Type de résolution.

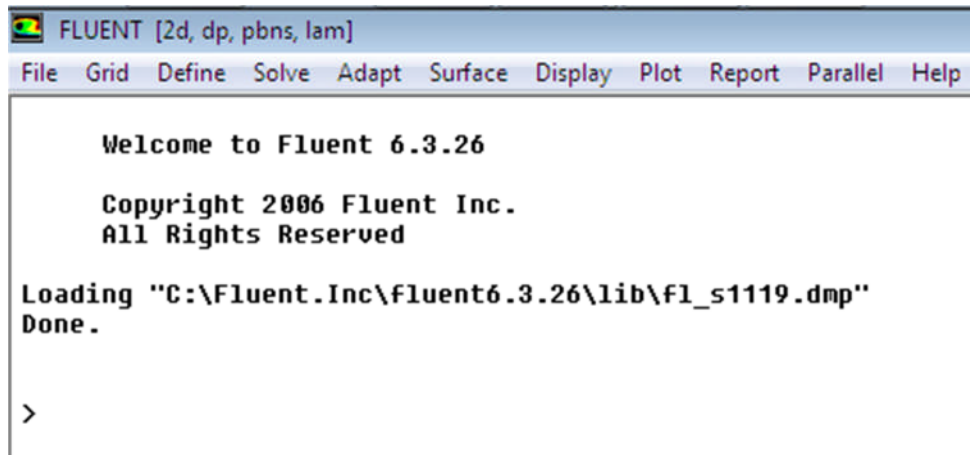


Fig. 4.7. Vue globale de Fluent.

Ensuite l'utilisation de Fluent est simple, il suffit de suivre l'ordre des menus en partant de la gauche pour aller vers la droite :

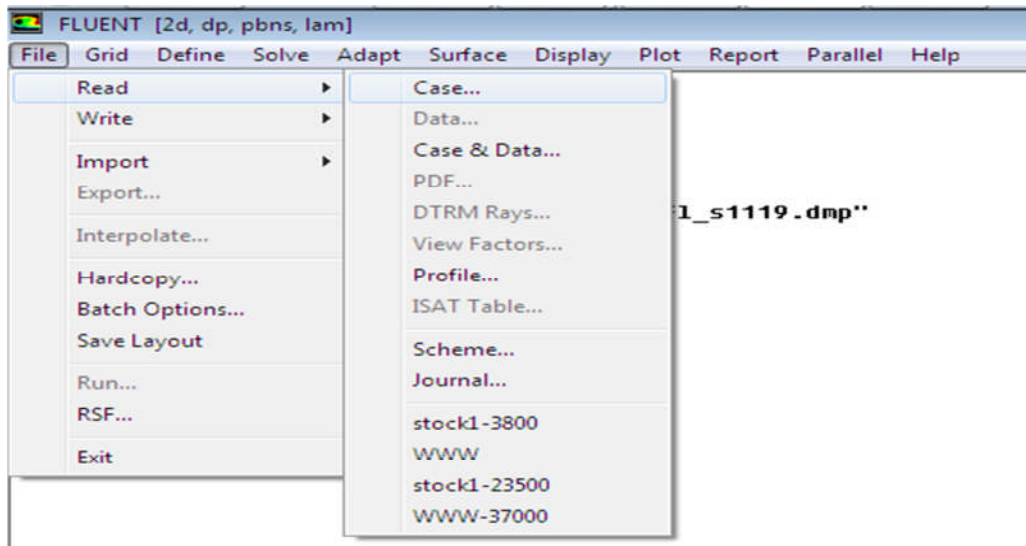
- **File** : pour les opérations concernant les fichiers : lecture, sauvegarde, importation...etc. ;
- **Grid** : pour la vérification et la manipulation du maillage et de la géométrie ;
- **Define** : pour définir les phénomènes physiques, les matériaux et les conditions aux limites ;
- **Solve** : pour choisir les équations à résoudre, les schémas de discrétisations, les facteurs de sous relaxation, les critères de convergence et pour initialiser et procéder au calcul ;
- **Adapt** : pour l'adaptation du maillage selon plusieurs paramètres ;
- **Surface** : pour créer des points, des lignes et des plans nécessaires à l'affichage des résultats ;
- **Display et plot** : pour l'exploitation des résultats ;
- **Report** : pour afficher des rapports contenant les détails du problème traité ;
- **Parallel** : pour le calcul parallèle ;

**Help** : pour l'exploitation du contenu du code.

**5.2.2. Importation de la géométrie (\*. msh) :**

Pour commencer la simulation il faut importer le fichier (\*.msh) généré sous Gambit.

File => Read =>Case...

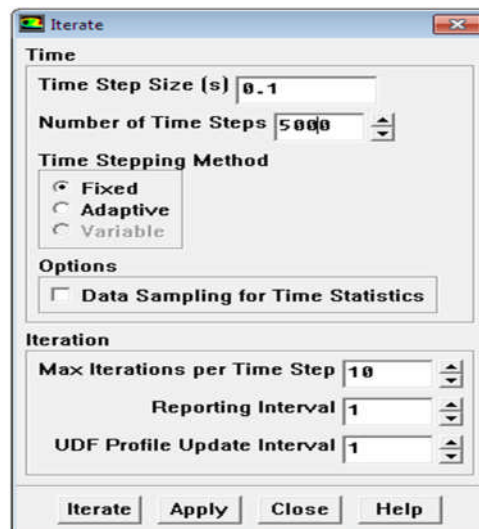


**Fig.4.8.** Importation de la géométrie.

- **Lancement des calculs :**

On commence les calculs après le choix du nombre des itérations, et le pas de temps.

solve —> iterate.



**Fig. 4.9.** Choix de pas de temps le nombre itérations.

- Résiduel :

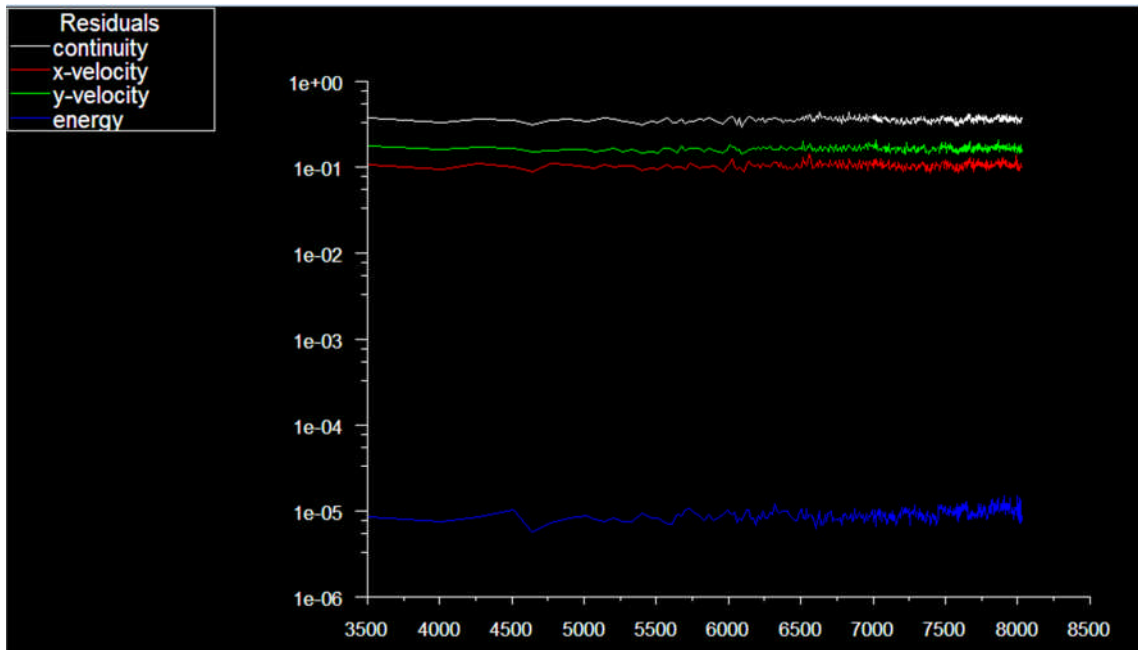


Fig. 4.10 Résiduel.

## *Chapitre 05*

### *Resultats et discussions*



### 1. 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 nombre de passe de la canalisation et le débit de l'eau sur la fusion et la solidification du MCP.

La géométrie considérée et les conditions aux limites ont été présentées dans le chapitre 04. Ainsi que la distribution des points du maillage et la simulation numérique ont été faite respectivement dans un mailler Gambit et le code de simulation Fluent.

### 2. Phase stockage :

#### 2.1. Effet de l'épaisseur du MCP:

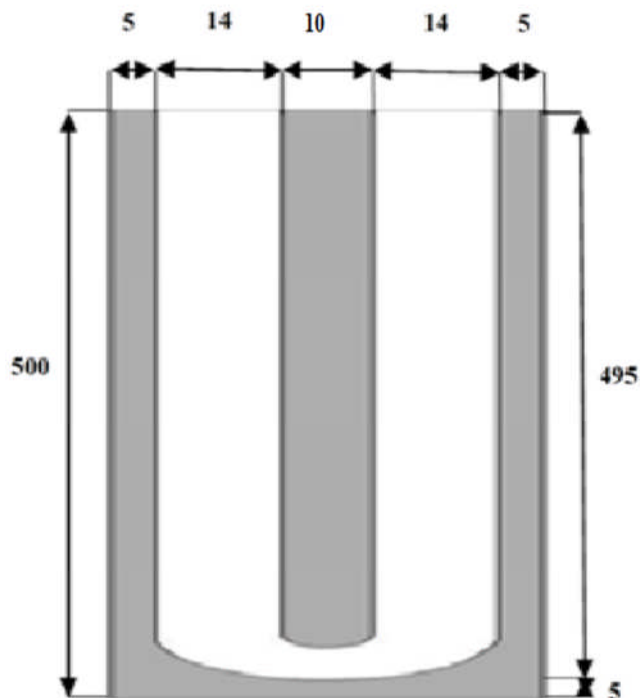
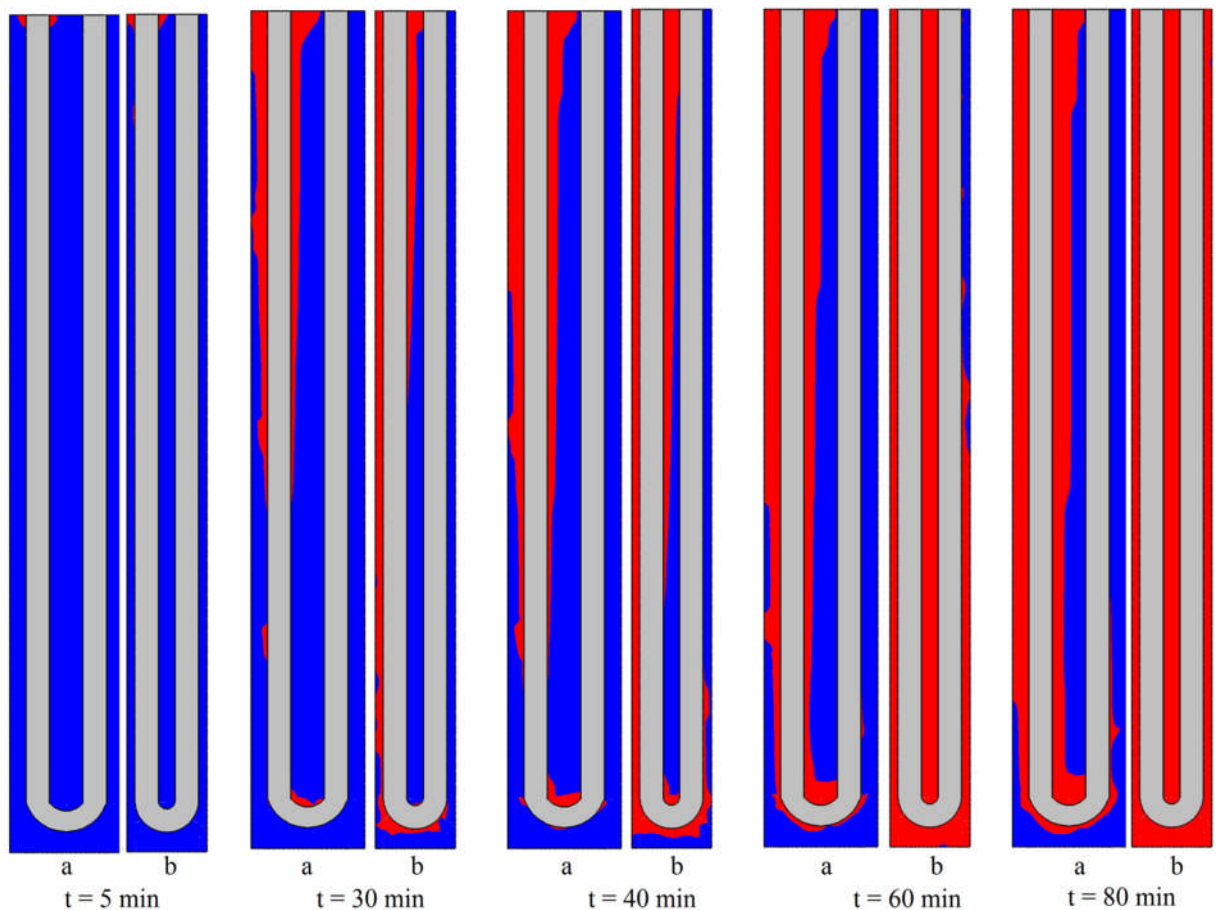


Fig. 5.1. modèle (b).

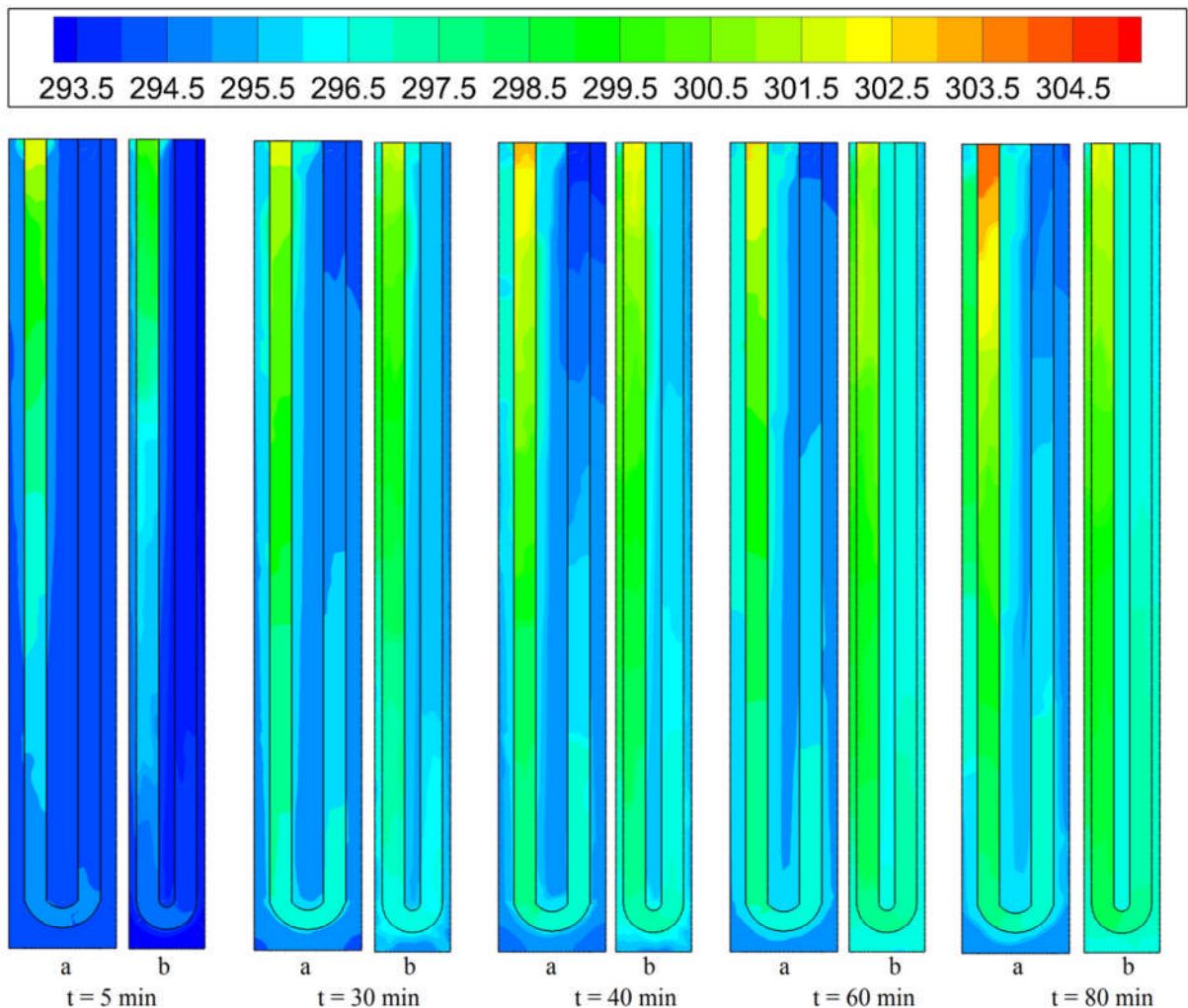


**Fig. 5.2.** Effet de l'épaisseur du MCP sur l'évolution de la fraction liquide en fonction du temps durant la phase de stockage.

On propose d'étudier l'effet de l'épaisseur du MCP (quantité) contenu dans l'échangeur. La Fig. 5.1 montre l'effet de l'épaisseur du MCP sur l'évolution de la fraction liquide en fonction du temps durant la phase de stockage. Le fond bleu indique la région solide ( $f_\ell = 0$ ) et le fond rouge indique la région liquide ( $f_\ell = 1$ ). Durant la phase de stockage, les températures du MCP et de l'eau sont présentes initialement à 293 K. À  $t = 0$ , on impose à l'entrée de la conduite une température de 313 K avec un débit de 0,01 kg/s. À  $t = 5$  min, la fusion du MCP commence au voisinage de l'entrée, qui représente la source thermique de l'échangeur, dans les deux modèles. À  $t = 30$  min, le front de fusion atteint le fond de les canalisations dans le modèle (b) et (a), À  $t = 40$  min, la fusion atteint 56% dans le modèle (b) et 28% dans le modèle (a). Ce pourcentage atteint 80% dans le modèle (b) et 42% dans le modèle (a) après 60 min. À  $t = 80$  min la fusion

est complète dans le modèle (b). Dans le modèle (a), la fusion atteint un pourcentage de 53%.

A  $t = 60$  min, la masse du MCP fondu atteint 12,77 et 12,24 kg dans le modèle (a) et (b), respectivement. En conclusion, on peut dire que l'augmentation de l'épaisseur du MCP (et donc sa quantité dans l'échangeur) n'influe pas sur la vitesse de stockage, c'est à dire la quantité du MCP fondu par seconde.



**Fig. 5.3** Effet de l'épaisseur du MCP sur l'évolution de la température en fonction du temps durant la phase de stockage.

La Fig. 5.3 montre l'effet de l'épaisseur du MCP sur l'évolution de la température en fonction du temps durant la phase de stockage. A  $t = 5$  min, la température de l'eau dans la conduite commence à se refroidir dans les deux modèles. Ces deux derniers se trouvent encore hors service puisque les

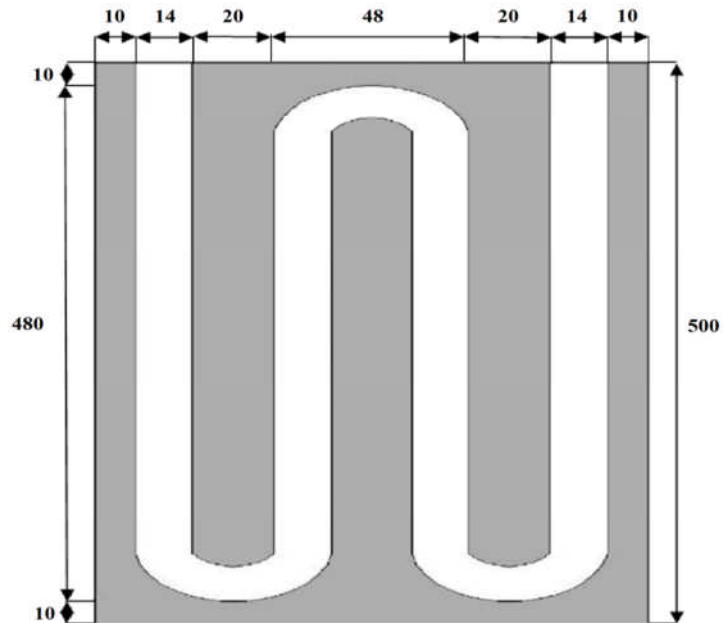
températures à la sortie sont 293,15 K dans le modèle (a) et 293,53 K dans le modèle (b). En avançant dans le temps, l'eau refroidir davantage et le MCP commence à stocker la chaleur. A  $t = 30$  min, la température augment à la sortie de la conduit du modèle (b) et atteint 295,60 K, alors que le modèle (a) se trouve encore hors service avec une température de sortie 293,24 K. Puisque la quantité du MCP utilisée dans le modèle (b) est moins importante que le modèle (a), le MCP soutire plus chaleur de l'eau dans le modèle (a) ce qui diminue se température. Le même phénomène se poursuit dans le temps et à  $t = 80$ , la température à l'axe de la sortie de la conduit du modèle (b) atteint 296,81 K, alors que le modèle (a) 294,50 K.

L'augmentation de la quantité du MCP utilisée influe considérablement sur la température de l'eau à la sortie où la diminution atteint 2,31°C sur une période de 80 min. On enregistre alors une vitesse de diminution de température par 1,73 °C/h.

Finalemt, on peut dire que le modèle (b) est plus dynamique au moment où le modèle (a) stocke plus de chaleur. Alors, le modèle (b) s'adapte plus dans les régions à faible gisement solaire et le modèle (a) dans les régions à forte ensoleillement.

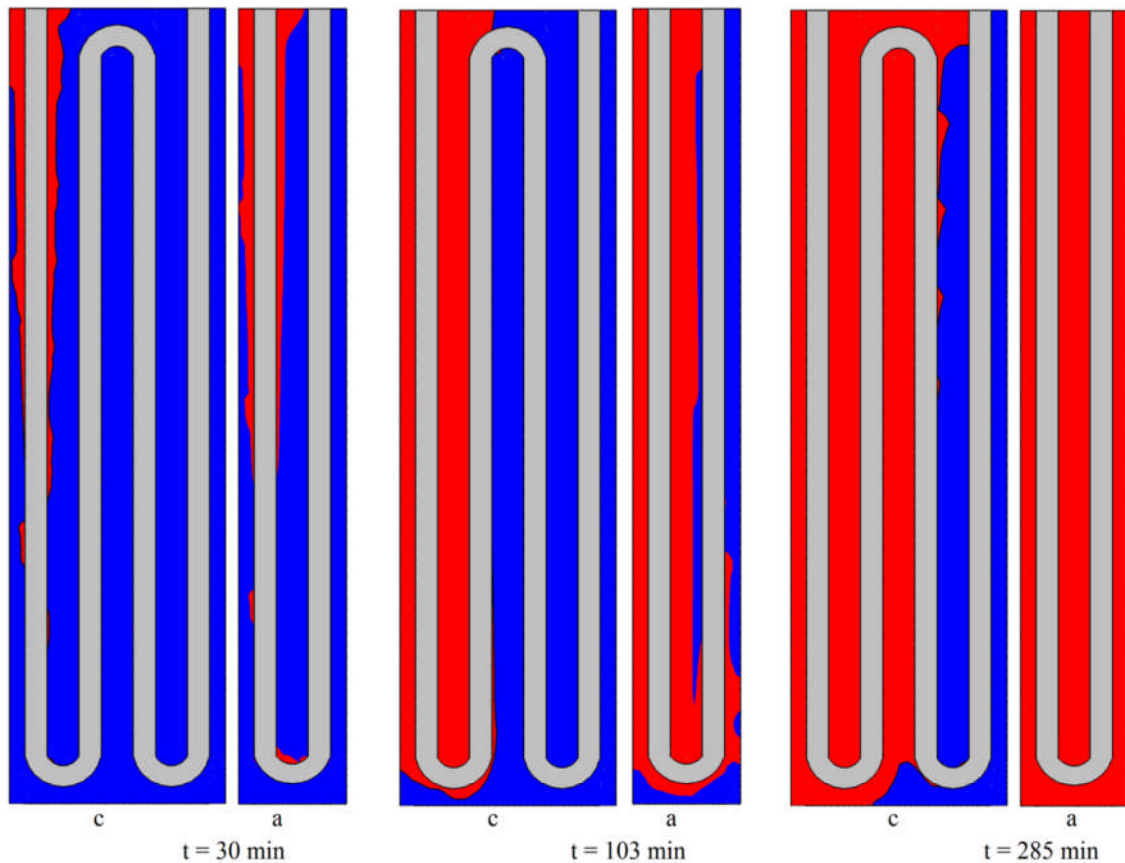
## **2.2. Effet du nombre de passe :**

On propose de doubler le nombre de passe pour voir son influence sur les performances thermique de l'échangeur. La géométrie et les dimensions sont données dans la Fig. 5.3 ( c).



**Fig. 5.4.** modél double passe (c).

La Fig. 5.5 montre l'effet du nombre de passe de la conduite sur l'évolution de la fraction liquide en fonction du temps durant la phase de stockage. A  $t = 30$  min, on assiste à la fusion de 9,81% du MCP dans le modèle (c) correspondant à une masse liquide en MCP de 5,59 kg. Dans le modèle (a), 21% du MCP est fondu offrant 6,32 kg en MCP liquide. Le processus de la fusion est donc plus accéléré dans le modèle (a). A  $t = 103$  min, le MCP existant entre les deux passages du premier passe de la canalisation est complètement fondu dans le modèle (c). Dans le modèle (a), le MCP n'est que partiellement fondu entre les deux passages. Le pourcentage fondu est de 38% et 65% correspondant à une masse liquide en MCP de 21,9 kg et 19,5 kg dans le modèle (c) et (a), respectivement. On enregistre alors une accélération du processus de stockage en chaleur latente dans le modèle (c). A  $t = 285$  min, le pourcentage fondu est de 66% et 100% correspondant à une masse liquide en MCP de 37,8 kg et 28,25 kg dans le modèle (c) et (a), respectivement. On a alors une amélioration de presque 9,5 kg en MCP liquide correspondant à une énergie thermique de 1425 kJ en chaleur latente stockée. Cela correspond à une amélioration de 300 kJ/h.

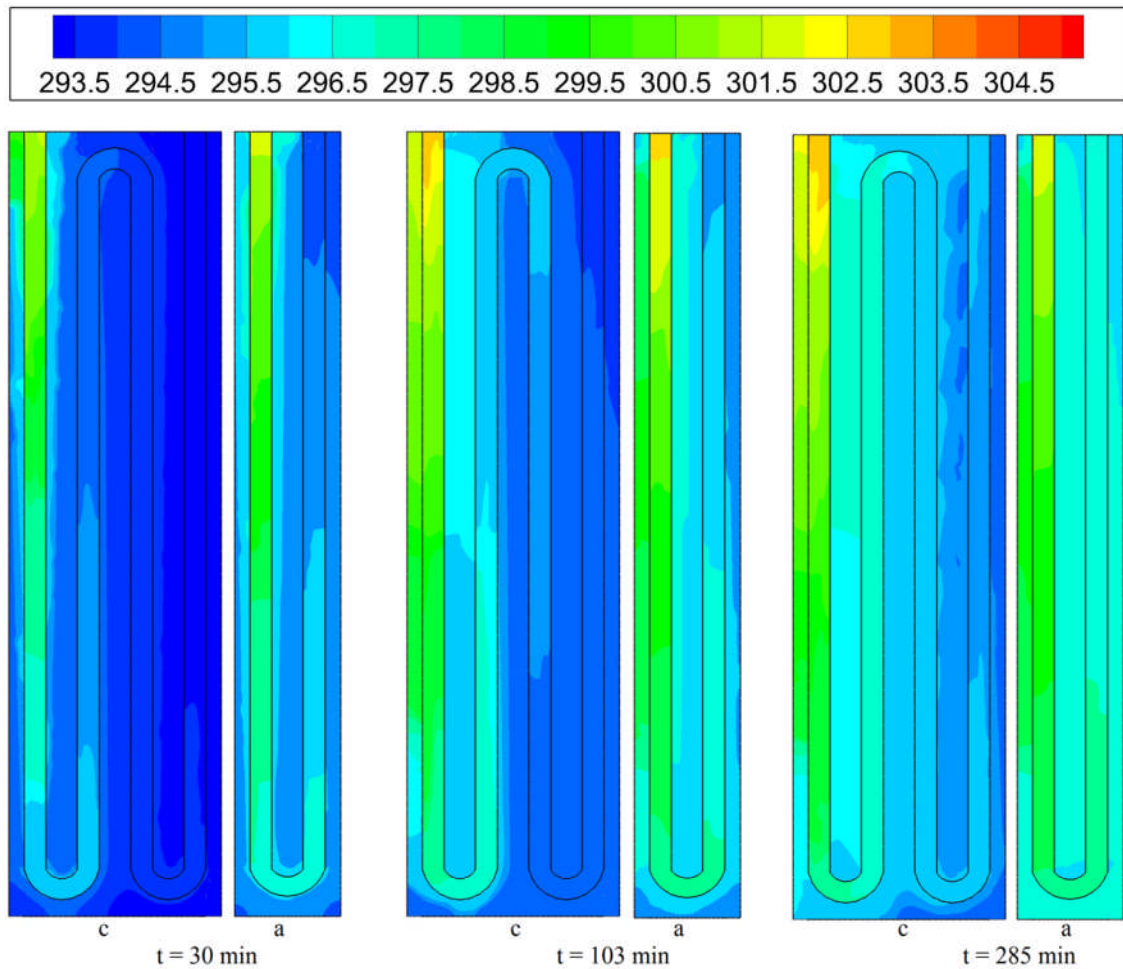


**Fig. 5.5.** Effet du nombre de passes de conduit sur l'évolution de la fraction liquide en fonction du temps durant la phase de stockage.

La Fig. 5.6 montre l'effet du nombre de passes de la conduite sur l'évolution de la température en fonction du temps durant la phase de stockage. A  $t = 30$  min, la température de l'eau résidant initialement dans la conduite commence à refroidir dans les deux modèles. Ces deux derniers se trouvent encore hors service puisque les températures à la sortie sont 293,24 K dans le modèle (a) et 293,34 K dans le modèle (c). En avançant dans le temps, l'eau refroidit davantage et le MCP commence à stocker la chaleur. A  $t = 103$  min, la température à l'axe de la sortie de la conduit du modèle (a) atteint 295,2 K et celle du modèle (c) 294,85 K. A  $t = 285$  min, la température à l'axe de la sortie de la conduit du modèle (a) atteint 297,07 K et celle du modèle (c) 296,25 K.

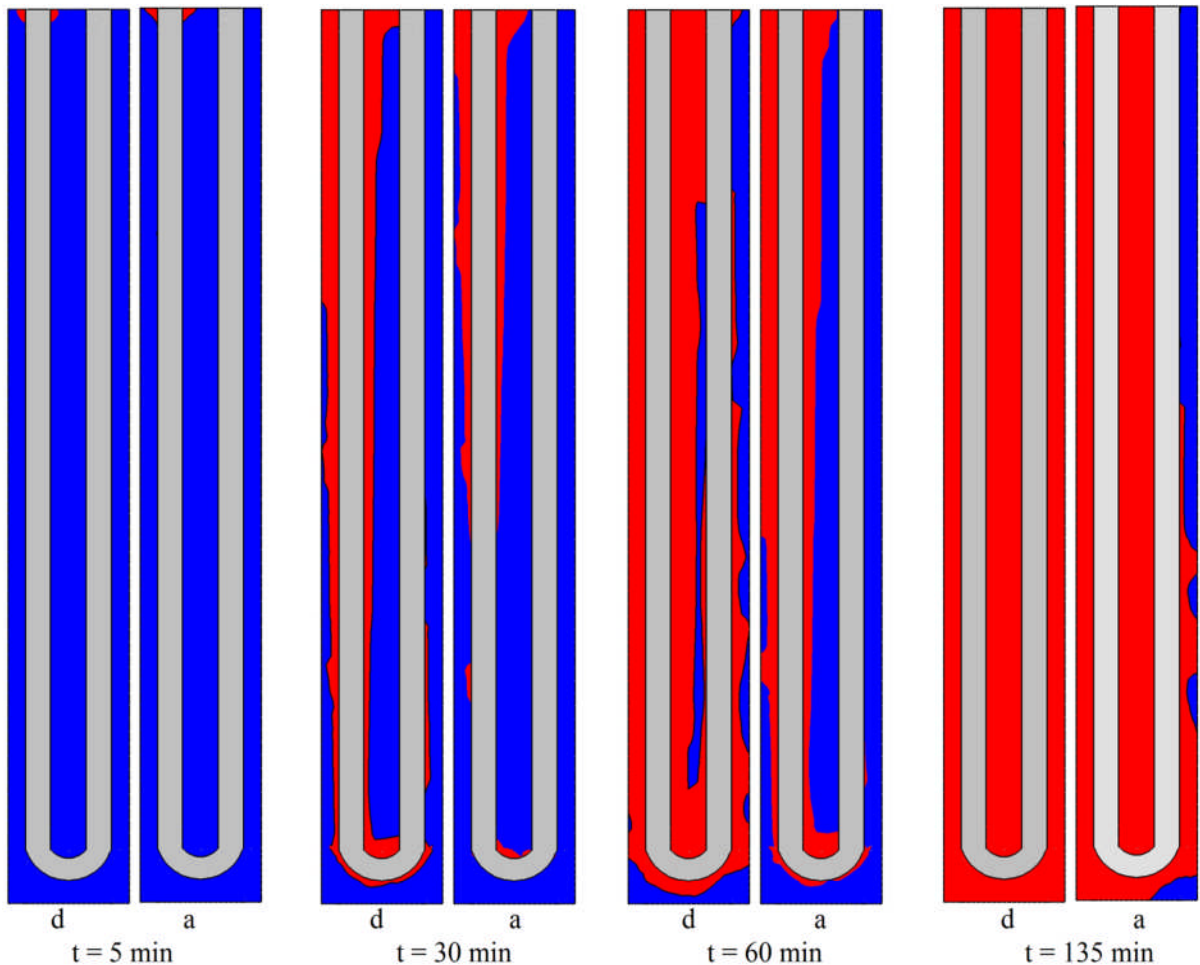
Alors, on peut dire que l'augmentation du nombre de passe augmente considérablement la vitesse de stockage et donc la quantité du MCP fondu par

seconde. Cette amélioration de stockage n'influe pas considérablement sur la température de l'eau à la sortie où la diminution atteint à peine  $0,82^{\circ}\text{C}$  sur une période de 285min. On enregistre alors une vitesse de diminution de température par  $0,17^{\circ}\text{C/h}$ .



**Fig. 5.6.** Effet du nombre de passes de conduit sur l'évolution de température en fonction du temps durant la phase de stockage.

## 2.3. Effet de débit :



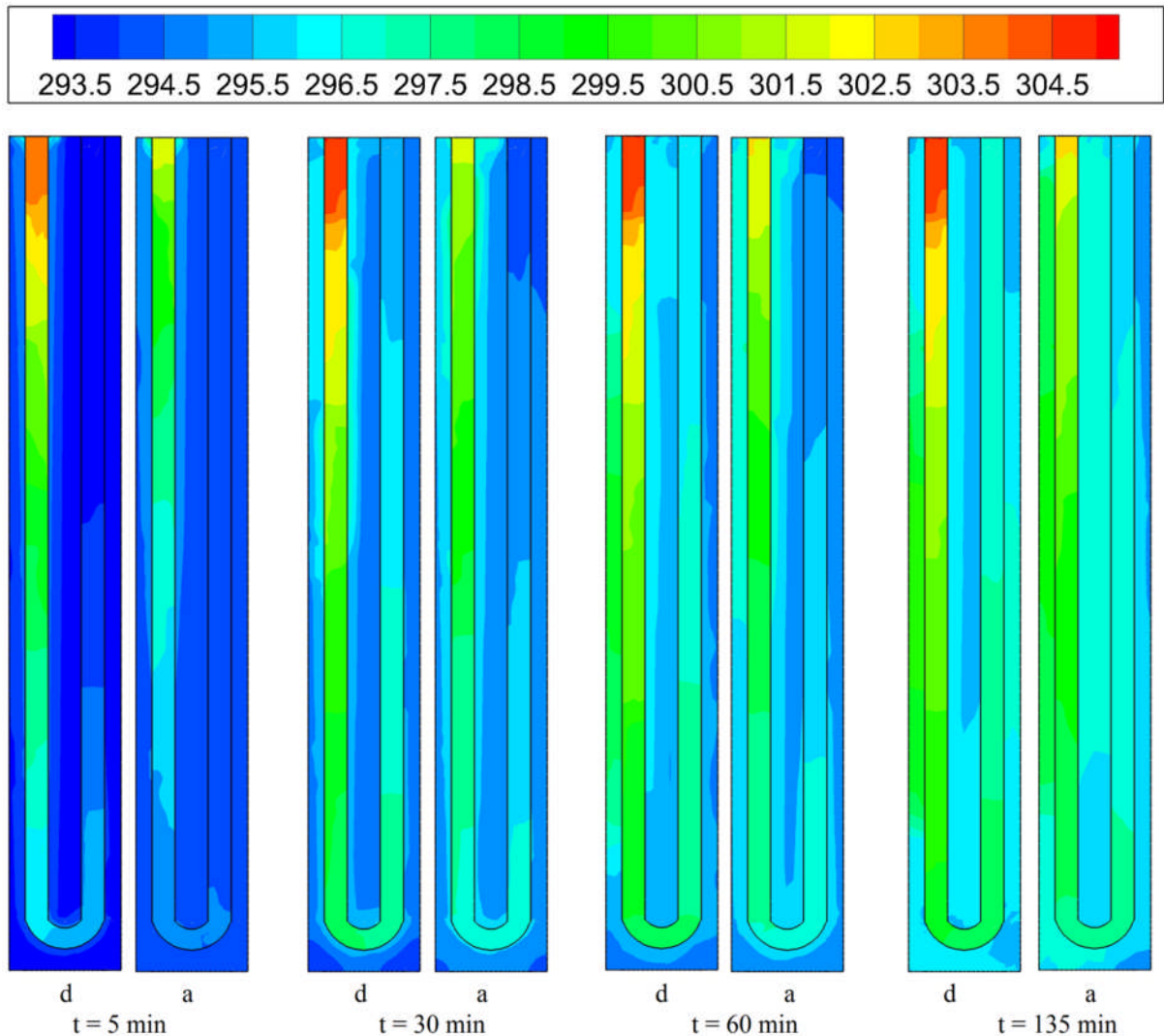
**Fig. 5.7.** Effet du débit d'eau sur l'évolution de la fraction liquide en fonction du temps durant la phase de stockage.

On propose de voir l'influence du débit sur les performances thermique de l'échangeur. La Fig. 5.7 montre l'effet du débit d'eau sur l'évolution de la fraction liquide en fonction du temps durant la phase de stockage. A  $t = 5$  min, la fusion du MCP commence au voisinage de l'entrée, qui représente la source thermique de l'échangeur, dans les deux modèles. A  $t = 30$  min, on assiste à la fusion de 38% du MCP dans le modèle (d) correspondant à une masse liquide en MCP de 11.6 kg. Dans le modèle (a), 21% du MCP est fondu offrant 6,32 kg en MCP liquide. Le processus de la fusion est donc plus accéléré dans le modèle (d). Ce pourcentage atteint 71% dans le model (d) et 42% dans le model (a) après 60



min. A  $t = 135$  min la fusion est complète dans le modèle (d). Dans le modèle (a), la fusion atteint un pourcentage de 79%.

On a alors une amélioration de presque 3,4 kg en MCP liquide correspondant à une énergie thermique de 510 kJ en chaleur latente stockée. Cela correspond à une amélioration de 226,66 kJ/h.



**Fig. 5.8.** Effet du débit d'eau sur l'évolution de température en fonction du temps durant la phase de stockage.

La Fig. 5.8 montre l'effet du débit d'eau sur l'évolution de la température en fonction du temps durant la phase de stockage. A  $t = 5$  min, la température de l'eau dans la conduite commence à refroidir dans les deux modèles. Ces deux derniers se trouvent encore hors service puisque les températures à la sortie sont

293,15 K dans le modèle (a) et 293,24 K dans le modèle (d). En avançant dans le temps, l'eau refroidir davantage et le MCP commence à stocker la chaleur. A  $t = 30$  min, la température augment à la sortie de la conduit du modèle (d) et atteint 296,57 K, alors que le modèle (a) se trouve encore hors service avec une température de sortie 293,24 K. Puisque un faible échange thermique entre l'eau et le MCP dans le modèle (d) par apport le modèle

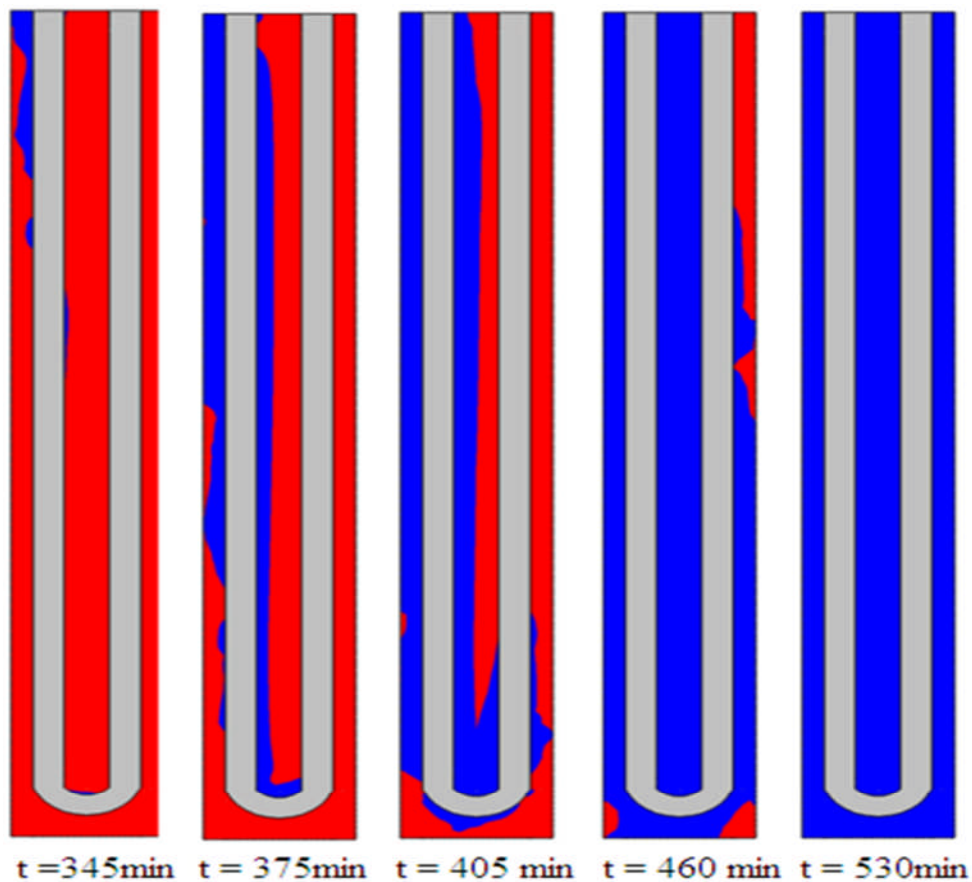
(a) en effet de débit. Le même phénomène se poursuit dans le temps 60 min. A  $t = 135$  min le modèle (d) attient une température de 298.07 K et le modèle (a) 296.59 K.

L'amélioration du stockage influe sur la température de l'eau à la sortie où la diminution atteint 1,48°C sur une période de 135 min. On enregistre alors une vitesse de diminution de température de 0,65°C/h.

### **3. Phase déstockage :**

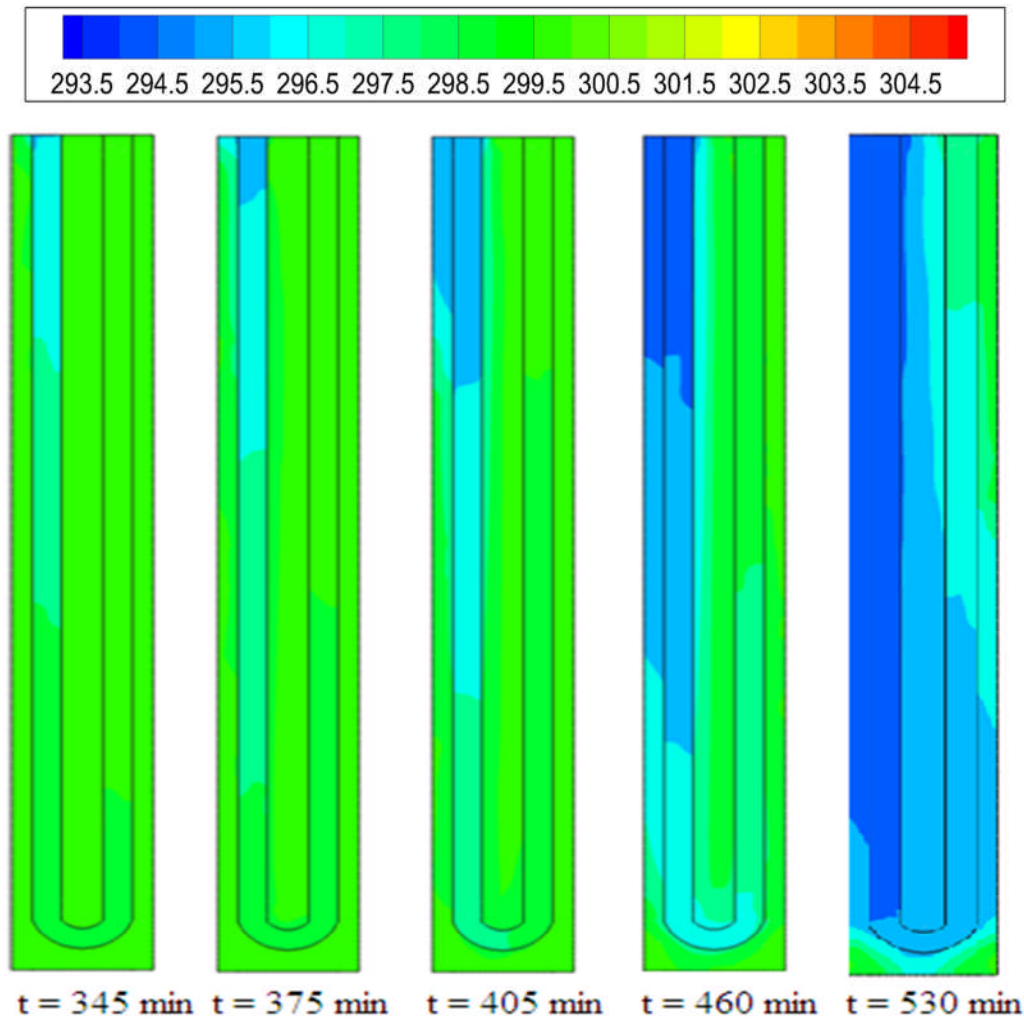
L'étude de la phase de déstockage est entamée à la fin de la phase de stockage. On reprend alors le modèle (a) et (d) et on examine le comportement du déstockage du MCP à  $t = 315$  min et  $t = 157$  min, respectivement

- **Modèle (a) :**



**Fig. 5.9.** L'évolution de la solidification en fonction du temps durant la phase de déstockage model (a).

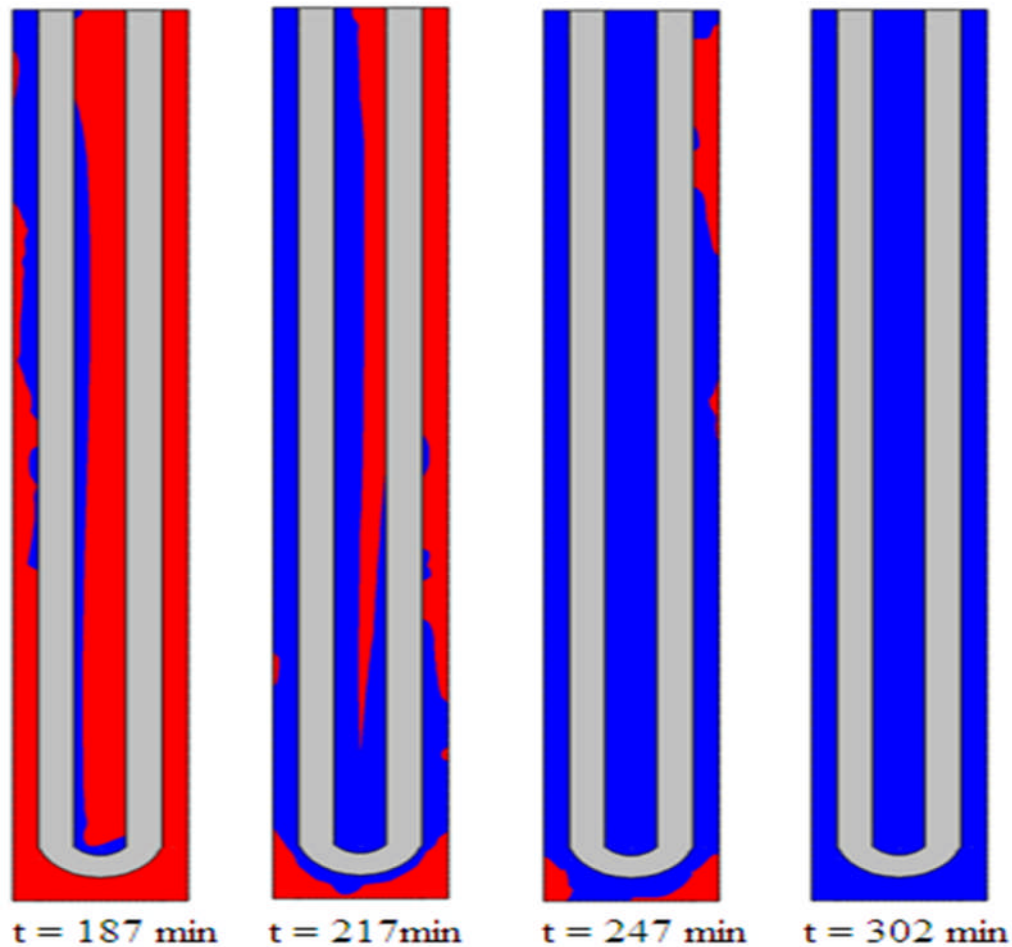
La Fig. 5.9 montre l'évolution de la solidification en fonction du temps durant la phase de déstockage, A  $t = 315 \text{ min}$ , on impose à l'entrée de la conduite une température de 285 K avec un débit de 0,01 kg/s. A  $t = 345 \text{ min}$ , on assiste à la solidification de 22,6% du MCP correspondant à une masse solide en MCP de 5 kg. A  $t = 375 \text{ min}$ , le pourcentage solidifié est de 42,16% correspondant à une masse solide 10,87 kg. A  $t = 405 \text{ min}$ , le pourcentage solidifié est de 59% avec 15,93 kg de solide en MCP. A  $t = 460 \text{ min}$  la solidification atteint un pourcentage de 93,9% avec 26,55Kg. A  $t = 530 \text{ min}$  la solidification est complète.



**Fig. 5.10.** L'évolution de température en fonction du temps durant la phase de déstockage model (a).

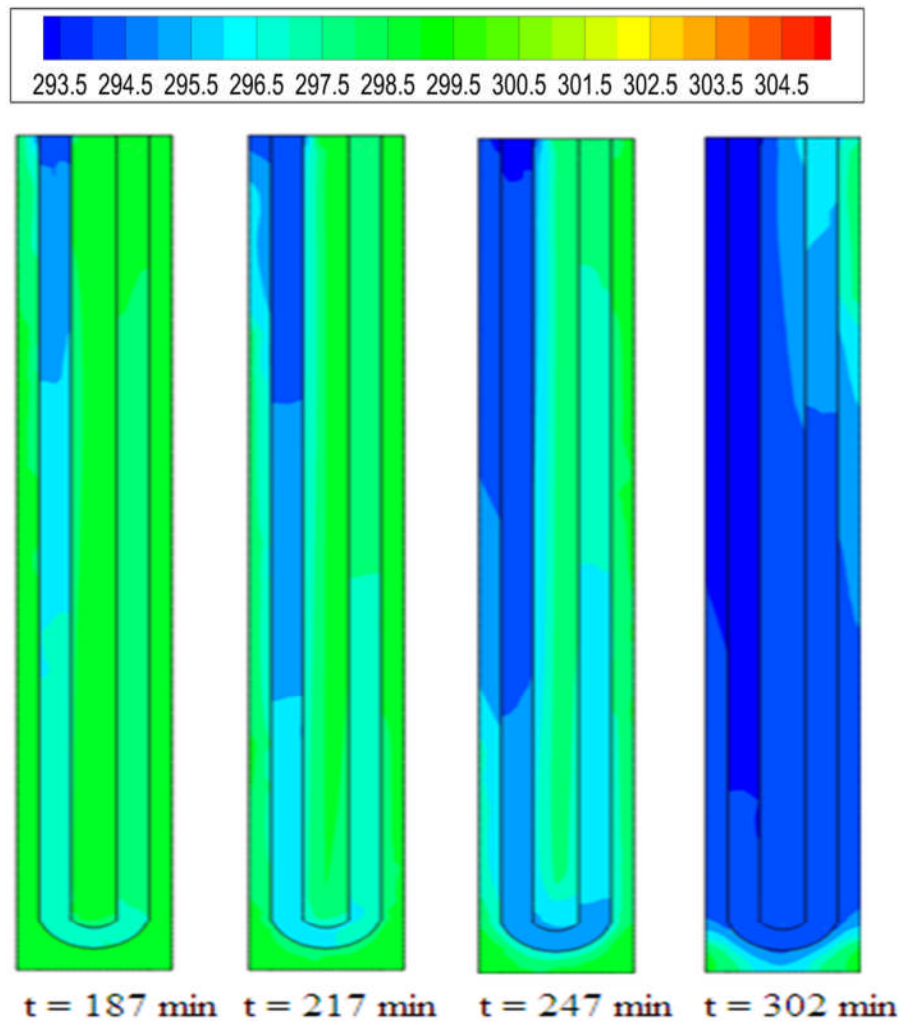
La Fig. 5.10 montre l'évolution de température en fonction du temps durant la phase de déstockage. A  $t = 345$  min, la température de l'eau dans la conduite commence à s'échauffé en absorbant de la chaleur du MCP qui subit un refroidissement. La température à l'axe de la sortie de la conduite est 296,99 K. En avançant dans le temps, l'eau s'échauffe davantage et le MCP continu la perdre de la chaleur. A  $t = 375$  min, la température à l'axe de la sortie atteint une température de 296,74 K. A  $t = 530$  min, la température à l'axe de la sortie est 293,17 K.

- Model (b)



**Fig. 5.11.** L'évolution de la solidification en fonction du temps durant la phase de déstockage model (d).

La Fig. 5.11 montre l'évolution de la solidification en fonction du temps durant la phase de déstockage, A  $t = 157 \text{ min}$ , on impose à l'entrée de la conduite une température de 285 K avec un débit de 0,02 kg/s. A  $t = 187 \text{ min}$ , on assiste à la solidification de 33,35 % du MCP correspondant à une masse solide en MCP de 8,22 kg. A  $t = 217 \text{ min}$ , le pourcentage solidifié atteint 69,86 % correspondant à une masse solide 19,2 kg, A  $t = 247 \text{ min}$ , le pourcentage arrive à 86,04% avec 24,06 kg de solide en MCP. A  $t = 302 \text{ min}$  la solidification est complète.



**Fig. 5.12.** L'évolution de température en fonction du temps durant la phase de déstockage model (d).

La Fig. 5.12 montre l'évolution de température en fonction du temps durant la phase de déstockage. A  $t = 187$  min, la température de l'eau dans la conduite commence à s'échauffé alors que le MCP commence à refroidir en cédant la chaleur stockée. La température à l'axe de la sortie de la conduite arrive à 296,26 K. Durant le temps, l'eau s'échauffe davantage et le MCP continu à perdre de la chaleur. A  $t = 217$  min la température à la sortie devient 295,61 K. A  $t = 302$  min l'échangeur fournit de l'eau à 290,69 K.

La vitesse de solidification dans les deux modèles (a) et (d) est de 0,131 kg/min, et 0,171 kg/min, respectivement. On a alors une amélioration de presque 2.4 kg/h dans la solidification du MCP correspondant à une récupération en énergie thermique de 360 kJ/h dans le modèle (d).

On remarque que les vitesses de la diminution de température à la sortie dans les deux modèles (a) et (d) sont 1,08°C/h et 2,76°C/h, respectivement. Donc, l'augmentation du débit d'eau améliore considérablement le processus de déstockage qui influe sur la température de l'eau à la sortie.

Au cours des deux phases stockage et déstockage le modèle (d) offre une accélération dans le processus fusion-solidification de 4,4 kg/h correspondant à une énergie thermique de 660 KJ/h.

### **Conclusion général :**

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'échangeur et de la fraction liquide de MCP. Cette étude a été réalisée à l'aide du code de calcul **Fluent**.

Les équations qui régissent le problème sont les équations de conservation de la masse (continuité), de la quantité de mouvement et d'énergie. Pour le phénomène de changement de phase la méthode enthalpique de porosité a été adoptée. Les effets de l'épaisseur (quantité massique) du MCP, du nombre de passe et le débit de l'eau sur l'efficacité thermique de l'échangeur ont été examinés. Les résultats obtenus montrent clairement l'influence des ces paramètres sur l'efficacité thermique de l'échangeur.

L'augmentation de la quantité du MCP utilisée influe considérablement sur la température de l'eau à la sortie où la diminution atteint  $2,31^{\circ}\text{C}$  sur une période de 80 min. On enregistre alors une vitesse de diminution de température par  $1,73^{\circ}\text{C/h}$ . En réduisant la quantité du MCP l'échangeur devient et s'adapte plus dans les régions à faible gisement solaire

L'augmentation du nombre de passe a provoquée une accélération dans le processus de fusion du MCP de presque 9,5 kg en MCP liquide correspondant à une énergie thermique de 1425 kJ en chaleur latente stockée. Cela correspond à une amélioration de 300 kJ/h. Cette amélioration de stockage n'influe pas considérablement sur la température de l'eau à la sortie où la diminution atteint à peine  $0,82^{\circ}\text{C}$  sur une période de 285min. On enregistre alors une vitesse de diminution de température par  $0,17^{\circ}\text{C/h}$ .

L'augmentation du débit entraine l'accélération du processus de fusion. En effet, l'augmentation du débit entraine l'augmentation du flux de chaleur et donc la puissance calorifique admise à l'échangeur. En passant de 0,01 kg/s à 0,02 kg/s on enregistre une amélioration de presque 3,4 kg en MCP liquide correspondant à une énergie thermique de 510 kJ en chaleur latente stockée. Cela correspond à une amélioration de 226,66 kJ/h.



## *Conclusion général*

---

L'augmentation du débit d'eau améliore considérablement le processus de déstockage qui influe sur la température de l'eau à la sortie. Les vitesses de la diminution de cette dernière sont  $1,08^{\circ}\text{C/h}$  et  $2,76^{\circ}\text{C/h}$  pour un débit de  $0,01\text{ kg/s}$  et  $0,02\text{ kg/s}$ , respectivement. Au cours des deux phases stockage et déstockage le modèle (d) offre une accélération dans le processus fusion-solidification de  $4,4\text{ kg/h}$  correspondant à une énergie thermique de  $660\text{ KJ/h}$ .

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

- ✓ Insertion des ailettes dans la conduite pour améliorer le transfert thermique.
- ✓ Changer la source thermique de l'échangeur par d'autres fluides caloporteur.
- ✓ L'utilisation des différents types de MCP pour tirer le mieux performant.
- ✓ Combiner différents types de MCP dans un même échangeur.

### Références Bibliographiques :

[1] : **Zouhir YOUNSI, Annabelle JOULIN, Laurent ZALEWSKI, Stéphane LASSUE, et Daniel ROUSSE** « ANALYSE NUMÉRIQUE DE LA FUSION DE MATÉRIAUX À CHANGEMENT DE PHASE DANS UNE ENCEINTE RECTANGULAIRE CHAUFFÉE PAR UNE PAROI LATÉRALE », Faculté des Sciences Appliquées de l'Université d'Artois, Canada, 2009, Lille.

[2] : **A. Benmansour et M.A. Hamdan** « 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 2001.

[3] : **Frédéric Kuznika, Joseph Virgone, Jean Noel, Raymond REISDORF** « Compréhension des effets de l'inertie thermique : cas des parois contenant des matériaux à changement de phase (MCP) », Centre de Thermique de Lyon, UMR 5008, INSA Lyon, UCBL, Bât. AUGC 2006.

[4] : **Abdeldjellil Benmansour** « 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 2007.

[5] : **Said MAKHLOUF 1a, Souad KHEDACHE, Dihia DJEFEL, Med Rachid HADID, Gilles LEFEBVRE** « Nouveau composite paraffine/poudre minérale destiné au stockage d'énergie thermique à basse température », a Université Mouloud Mammeri, Laboratoire L.M.S.E, Tizi-Ouzou, Algérie. Université Paris Est Créteil, 2013.

[6] : **Radouane ElBahjaoui , Hamid El Qarnia et El Khadir Lakhal** « 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, 2013

[7]: **C. Arkar, S. Medved** « Influence of accuracy of thermal property data of a phase change material on the result of a numerical model of a packed bed latent heat storage with spheres », University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, 2005.

[8]: **Suat Canbazog˘lua, Abdulmuttalip S, ahinaslana, Ahmet Ekmekyaparb, Y ´. Go˘khan Aksoya, Fatih Akarsua** « 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, 2004.

[9] : **Abdul Jabbar N. Khalifa , Kadhim H. Suffer, Mahmoud Sh. Mahmoud** « 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 .

[10]: **Robynne Murray, Louis Desgrosseilliers, Jeremy Stewart, Nick Osbourne, Gina Marin, Alex Safatli, Dominic Groulx, Mary Anne White** « 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.

[11] : **Mehmet Esen and Teoman Ayhan** « Development of a model compatible with solar assisted cylindrical energy tank and variation of stored energy with time for different phase change materials », Department of Mechanical Education , Firat University, 1995 .

[12] : **T. Kouskso, F. Strub, J. Castaing Lasvignottes, A. Jamil, J.P. Bédécarrats , Second law** « analysis of latent thermal storage for solar system », Laboratoire de Thermique e nerge'tique et Proce'de's, Avenue de l'Universite', 2007 .

[13] : **Monsieur Jean-Pierre BÉDÉCARRATS Maître de Conférences** «Utilisation rationnelle de l'énergie par les techniques de stockage et de transport du froid par chaleur latente », L'université de pau et des pays de l'Adour, 2010.

[14] : **Marie DUQUESNE** « résolution et réduction d'un modèle non linéaire de stockage d'énergie par adsorption sur des zéolithes » l'université de bordeaux 2013

[15] : **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.

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

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

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

- [19]: **Eduard Oró Prim** « Thermal energy storage (TES) using phase change materials (PCM) for cold applications », Universitat de Lleida, 2013.
- [20] : **A. GONTARD, K. GRYSKA, L. LALLEMAND** « Amélioration de la conductivité thermique de matériau à changement de phase », Université de Pau des pays de l'Adour 2012.
- [21] : **J.Taine et J.P.Petit** , cours et données de bases-transfert de chaleur MDF an isothermes , E d. Dunod,1995.
- [22] : **Alain bricad-Dominique Gobi**, Transmission de la chaleur, technique de l'ingénieur à 1570,1986.
- [23] : **A .Boumahrat et Gourdin**, Méthodes numériques appliquées, Réimpression 1993 Alger. Edition TEC et Doc- PARIS.
- [24] : **A.N.KORTI**, Modélisation numérique du transfert de chaleur lors de la solidification des métaux, Mémoire de magister, Université Abou bekr belkaid, Algérie 2000.
- [25]: **D. G. R. Sharma, Krishnan M., Ravindran C.**, Determination of the rate of latent heat liberation in binary alloys, Materials Characterization 44 (2000) 309–320.
- [26] : **J.S. Hasio**, An effecient algorithm for finite difference analyses of heat transfer with melting and solidification, Numerical heat transfer, (1985) vol 8, 653-666.
- [27] : **s.v. patankar**, Numerical heat transfer and fluid flow, Hemispher, Washinpto, DC (1980)196.

[28]: **R.I. Issa, A.D. Gosman, A.P. Watkins.**

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

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

[30]: <http://www.rubitherm.de/>

[31] : **Olukayode A. Obitayo**, SIMULATION AND ANALYSIS OF PHASE CHANGE MATERIALS FOR BUILDING TEMPERATURE CONTROL, Department of Mechanical Engineering, 2011

[32] : **Fluent**

## Résumé

Dans le cadre de notre projet, nous avons étudié le stockage d'énergie solaire par chaleur latente avec une simulation numérique effectuée par le code de calcul **Fluent**. Nous avons effectué plusieurs simulations avec des échangeurs cylindriques remplis par un Matériaux à Changement de Phase (MCP), à l'intérieur une canalisation d'eau passe à travers pour stocker la chaleur durant les périodes ensoleillées et la récupérer durant les périodes déficitaires. Une comparaison entre différents types d'échangeurs et de configurations ainsi que l'effet du débit d'eau sur le stockage et le déstockage d'énergie solaire ont été présentés.

**Mots Clés :** Stockage par chaleur latente ; Echangeur 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 **Fluent**. We performed several simulations with cylindrical exchangers filled with a Phase Change Material (PCM) inside a water pipe passes through to store heat during sunny periods and recover during deficit periods, A comparison between different types of heat exchangers and configurations as well as the effect of water flow on the storage and destocking of solar energy have been presented.

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

## ملخص

كجزء من مشروعنا، درسنا تخزين الطاقة الشمسية بواسطة الحرارة الكامنة مع المحاكاة العددية التي يؤديها الرمز الحسابي فلويانت. أجرينا العديد من عمليات المحاكاة مع مبادلات حرارية في اسطوانية مملوءة بمادة تغيير المرحلة، داخلها أنابيب يمر عبرها المياه لتخزين الحرارة خلال فترات مشمسة واستعادتها خلال فترات غيابها. تم قمننا بمقارنة بين أنواع مختلفة من المبادلات الحرارية وتكوينات فضلا عن تأثير تدفق الماء على تخزين واسترجاع الطاقة الشمسية.

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