



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Larbi Tébessa – Tébessa



Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie

Département: Sciences de la Matière



**MEMOIRE DE MASTER**

**Domaine : Sciences de la Matière**

**Filière : Physique**

**Option : Physique des Matériaux**

## *Thème*

*Modélisation et simulation des matériaux à  
changement de phase*

**Présenté par :**

**HADDAD Marwa**

**GRIB Rayan**

**Devant le jury :**

Président: RAOUAGE Nowari	MCP	Université Larbi Tébessi – Tébessa
Encadreur: SAOUANE Izzeddine	MAA	Université Larbi Tébessi – Tébessa
Examineur: QUIRAWANI Takieddine	MCB	Université Larbi Tébessi – Tébessa

*Date de soutenance : 29 /05/2020*

**Note :..... Mention :.....**



**Déclaration sur l'honneur de non-Plagiat**  
 (À joindre obligatoirement au mémoire; Remplie et signée)



Nous soussignons

Nom, prénom: HADDAD MAROUA & GRIB RAYAN

N° de carte d'étudiant: (1) 34024028 (2) 34020043

Régulièrement inscrits (es) en **Master** au **Département Sciences de la Matière**

Année universitaire: 2019/2020

Domaine: **Sciences de la matière**

Filière: **Physique**

Spécialité: Physique des matériaux

Intitulé du mémoire: .....

Modélisation et simulation des matériaux à  
 changement de phase

Attestons que notre mémoire est un travail original et que toutes les sources utilisées ont été indiquées dans leur totalité. Nous certifions également que nous n'avons ni recopié ni utilisé des idées ou des formulations tirées d'un ouvrage, article, ou mémoire, en version imprimée ou électronique, sans mentionner précisément leur origine et que les citations intégrales sont signalées entre guillemets.

Sanctions en cas de plagiat prouvé:

Les étudiants seront convoqués devant le conseil de discipline, les sanctions prévues selon la gravité du plagiat sont:

- L'annulation du mémoire avec possibilité de le refaire sur un sujet différent.
- L'exclusion d'une année du master.
- L'exclusions définitive.

2020 26

(1):

Fait à Tébessa, le: 26-10-2020  
 Signature des étudiants (es):  
 (2):



Université Larbi Tébessi- Tébessa

Faculté des sciences exactes et des sciences de la nature et de la vie

Département Science de la matière

Filière : Physique

Spécialité : Physique des matériaux

Année universitaire 2019/2020



## Formulaire de levée de réserves après soutenance d'un Mémoire de Master

**Données d'identification du candidats(es) :**

Nom et prénom du candidat : HADDAD Manoua

GRTB Rayan

Intitulé du Sujet :

Modélisation et simulation des matériaux  
à changement de phase

**Données d'identification du membre de jury :**

Nom et prénom : ROUACH Nouan'

Grade : PCA

Lieu d'exercice : Université Larbi Tébessi- Tébessa

Vu le procès-verbal de soutenance de la thèse sus citée comportant les réserves suivantes :

Il n'y a pas de réserves

Et après constatation des modifications et corrections suivantes :

Toutes les corrections demandées  
ont été réalisées

Je déclare en ma qualité de président de jury de soutenance que le mémoire cité remplit toutes les conditions exigées et permet au candidat de déposer son mémoire en vue de l'obtention de l'attestation de succès.

Le 22/09/2020

Président de jury de soutenance : (Nom/Prénom et signature)



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Larbi Tébessa – Tébessa



Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie

Département: Sciences de la Matière

**MEMOIRE DE MASTER**

**Domaine :** Sciences de la Matière

**Filière :** Physique

**Option :** Physique des Matériaux

*Thème*

*Modélisation et simulation des matériaux à  
changement de phase*

**Présenté par :**

**HADDAD Marwa**

**GRIB Rayan**

**Devant le jury :**

Président: RAOUAGE Nowari	MCP	Université Larbi Tébessi – Tébessa
Encadreur: SAOUANE Izzeddine	MAA	Université Larbi Tébessi – Tébessa
Examineur: QUIRAWANI Takieddine	MCB	Université Larbi Tébessi – Tébessa

*Date de soutenance : 29 /05/2020*

**Note :..... Mention :.....**

# Remercément

A decorative circular frame with a dashed border. At the top, three black graduation caps with tassels are arranged in a semi-circle. On the sides, there are yellow scrolls tied with red ribbons. At the bottom, there are blue flowers. The background is light green and white.

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

Ensuite j'exprime mon profonde gratitude  
à mon encadreur monsieur **SAOUANE Izzeddine**  
qui a accepté de diriger ce travail, ses conseils et sa disponibilité durant  
toute l'année pour arriver à concrétiser ce document.

Par ailleurs nous tenons à remercier les membres du jury  
monsieur **RAOUGE Nouari** et monsieur **QUIRAOUANI Takieddine**  
qui nous ont fait l'honneur par leurs présences et leurs disponibilités,  
à accepter d'évaluer ce travail.

Nous remercions également les personnels  
qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de notre travail.

Nous tenons aussi à souligner la contribution  
de tous les enseignants de notre département.



*J'ai un grand plaisir de dédier ce modeste travail à:*

*Ma très chère mère* , cette femme qui m'a donnée tous ce que  
j'ai tfoulue dans tous ma vie, le courage, la volonté,  
et l'apprentissage culture, c'est ma mère ma fierté dans ma vie,  
qui demeure à jamais dans mon cœur.

*Mon cher père* , en témoignage et en gratitude de son dévouement ;  
De son soutien permanent durant toutes mes années d'étude;  
Son sacrifice illimité ; son réconfort moral.

*Mes très chères sœurs : Fadwa, Aicha, Amani*

*Mes chers frères : Mohammed, Ziad*

*Ma sœur et binôme Rayan*

*Mes très chères amies chacun son nom.*

*Mes collègues pendant la période universitaire.*

*Toute la famille HADDAD.*

*Tous mes enseignants chacun son nom.*



*Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, L'amour, le respect Aussi,  
c'est tout simplement que. Je dédie cette mémoire*

*À MES CHERS PARENTS*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération  
pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.*

*Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour.*

*Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices,  
bien que je ne vous en acquitterai jamais assez.*

*Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte  
que jamais je ne vous déçoive.*

*À la femme de mon père qui m'a aidé à prier*

*Mes très chères sœurs :*

*Nour El Houda, Zina, Nahla, Atyef, ma puce Rym, Dalila, Siham.*

*Mes chers frères : Thamer, Said, Ridha, Ramzi.*

*À Ma sœur et binôme **Marwa***

*Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé,*

*qui étaient, toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagnaient durant mon chemin d'études supérieures,  
collègues d'étude : Soulef, Nada , Salima , Amel , Fatma , Meryam , Chourouk*

*Et Sœurs de cœur : **Nacera, Bouthaina, Soumaya, Ahlam.***

*Mes aimables amis : Ikram, Wissam, Hasna, Nesrine, Fatma, Ahlam.*

# Nomenclature

$T$	:	Température	[°C]
$M$	:	Masse	[Kg]
$C$	:	Capacité thermique massique	[J.Kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$H$	:	L'enthalpie	[J.Kg <sup>-1</sup> ]
$Q_{perte}$	:	perte de chaleur	[J]
$Q$	:	chaleur absorbé ou cédée	[J]
$T_1$	:	Température initiale	[°C]
$T_F$	:	Température de fusion	[°C]
$T_2$	:	Température finale	[°C]
$C_{sol}$	:	Capacité thermique massique à l'état solide	[J.Kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$C_{liquid}$	:	Capacité thermique massique à l'état liquide	[J.Kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$L_F$	:	Chaleur latente de changement de phase	[J.Kg <sup>-1</sup> ]
$H_{sol}$	:	Enthalpie massique du solide	[J.Kg <sup>-1</sup> ]
$H_{liq}$	:	Enthalpie massique du liquide	[J.Kg <sup>-1</sup> ]
$T_0$	:	Température à la frontière gauche	[K]
$T_s$	:	Température de solide	[K]
$T_l$	:	Température de liquide	[K]
$X(t)$	:	Position de l'interface	[--]
$V(t)$	:	Vitesse de l'interface solide- liquide	[m]
$Q$	:	Quantité de chaleur	[J/m <sup>3</sup> ]
$X$	:	Position	[m]
$T$	:	Temps	[s]
$L$	:	Chaleur spécifique	[J/Kg]
$K$	:	Conductivité thermique	[w/m/k]
$Ste$	:	Nombre de stefan	[/]
<b>Caractères grecques</b>			
$A$	:	Diffusivité thermique	[m <sup>2</sup> /s]
$\rho$	:	Densité	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$\tau(t)$	:	Temps d'arrivé au point $p$	[W/m <sup>2</sup> K]
$\rho$	:	Masse volumique	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\emptyset$	:	Flux de chaleur	[w/m <sup>2</sup> ]
$\Delta t$	:	Pas de temps	[°]

# Table des matières

## Sommaire

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles

Références Bibliographiques

Résumé

Abstract

ملخص

Introduction générale..... 1

### Chapitre I : Matériaux a changement de phase

I.1.Introduction... 2

I.2. Les différents types de stockage ..... 2

I.2.1 Stockage chimique ..... 2

I.2.2 Stockage mécanique ..... 2

I.2.3 Stockage électrique ..... 2

I.2.4 Stockage thermique ..... 2

I.2.5 Stockage d'énergie thermochimique ..... 3

I.3 Les méthodes de stockage d'énergie thermique ..... 3

I.3.1. Chaleur sensible..... 4

I.3.2. Chaleur latente ..... 5

I.4. Matériau à changement de phase ..... 7

I.5 Les différents types de changements d'état..... 8

I.6.Types des matériaux à changement de phase (MCP)..... 9

I.6.1 Les MCP organiques ..... 10

I.6.1.1 Les paraffine ..... 10

I.6.1.2 Non paraffines ..... 12

I.6.2 Les MCP inorganiques ..... 13

I.6.2.1 Les hydrates salins ..... 13

I.6.2.2 Métaux et alliages ..... 14

I.6.2.3 Eutectique ..... 15

I.6.3.Avantages et inconvénients des MCP organiques et inorganiques ..... 16

I.7.Critères de choix d'un matériau à changement de .....	17
I.7.1 Propriétés thermiques .....	17
I.7.2 Propriétés physiques .....	17
I.7.3 Propriétés cinétiques .....	17
I.7.4 Propriétés chimiques .....	17
I.7.5 Aspects économiques .....	17
I.8. Applications des MCP .....	18
I.8.1. Domaine électronique.....	18
I.8.2 Domaine mécanique.....	18
I.8.3 Domaine médicales .....	18
I.8.4. L'industrie textile.....	19
I.8.5. Domaine des routes.....	19
I.8.6 Les MCP dans les rideaux.....	20
I.8.7 Application aux bâtiments.....	20
I.9. Conclusion .....	21
<b>Chapitre II : Modélisation des MCP avec les conditions de Dirichlit</b>	
II.1 Introduction.....	22
II.2 Problème à une phase.....	24
III.2.2. Problème à deux phases.....	24
II.3. Problème de Neumann.....	31
II.4. Exemple de calcul.....	32
II.4.1. Le profil de la température.....	32
II.4.2. L'interface solide-liquide.....	32
II.4.3.Flux de chaleur.....	33
II.5. Conclusion.....	
<b>Chapitre III : Modélisation des MCP avec les conditions de Neumann</b>	
III.1.Introduction.....	34
III.2. Méthodes numériques .....	34
III.3. Modèle physique.....	35
III.4. Approximation de différences finies.....	36
III.5. L'algorithme de détermination le pas de temps.....	37
III.6. Exemple de calcul.....	39
Conclusion générale .....	43
<b>Références bibliographiques .....</b>	

# Liste des figures

<i>figure N°</i>	<i>Titre</i>	<i>Page</i>
I.1	Déférentes méthodes possibles du stockage de l'énergie thermique	3
I.2	Les schémas suivants expliquent les cycles de stockage et de décharge de l'énergie	4
I.3	Exemple : a/ Paraffine - b/ Eau	8
I.4	Le diagramme suivant présente le nom attribué à chacun de changements d'état	9
I.5	Classification des matériaux a changement de phase	9
I.6	Acide gras	10
I.7	Paraffines brutes, en capsulées, en poudre ou en granulés	12
I.8	Sels Hydratés ainsi l'utilisation d'agent de nucléation afin d'être fiables	13
I.9	L'Auric Acide	16
I.10	Récipients transporter sang et organes qui contiennent MCP	18
I.11	L'efficacité de MCP dans les textiles	19
I.12	Rideaux à MCP	20
I.13	Isolation thermique d'un bâtiment	21
II.1	Fusion du solide semi-infini	22
II.2	La racine $\lambda'$	24
II.3	Problème de deux phases	26
II.4	L'évolution de la température en fonction de temps	30
II.5	Position de l'interface	31
II.6	Vitesse de l'interface solide-liquide.	31
II.7	Le flux de chaleur	32
III.1	La géométrie pour un problème de la solidification de seule phase	35
III.2	L'évolution de la température pour $X(t) = 0.1$	40

<b>III.3</b>	L'évolution de la température pour $X(t)$	41
<b>III.4</b>	L'évolution de la température pour	41
<b>III.5</b>	L'évolution de la température	42

# *Liste des tableaux*

<i>Tableau N°</i>	<i>Titre</i>	<i>Page</i>
<b>I.1</b>	Comparaison de différentes méthodes de stockage d'énergie thermique en fonction de leur densité énergétique.	7
<b>I.2</b>	Points de fusion et chaleur latente pour quelques paraffines pures, solides sous forme de cires	11
<b>I.3</b>	Point de fusion et chaleur latente de fusion des acides gras	14
<b>I.4</b>	Exemples d'hydrates de sel ayant été étudiés en tant que MCP	15
<b>I.5</b>	Une liste de quelques Eutectiques	16

## ***Introduction générale***

L'étude des phénomènes de stockage et déstockage de chaleur dans les matériaux à changement de phase solide-liquide (liquide-solide) a suscité depuis déjà plusieurs décennies et suscite encore de nos jours beaucoup d'intérêt dans divers domaines scientifiques et secteurs technologiques et plus particulièrement dans les applications en rapport avec les systèmes de stockage de chaleur ou de froid développés pour l'agroalimentaire ou pour le chauffage et la climatisation dans le secteur résidentiel ainsi que de dissipation de chaleur par chaleur latente dans les systèmes passifs de refroidissement de composants électroniques.

Les Matériaux à Changement de Phase, appelés communément « MCP », sont des matériaux intelligents qui reposent sur l'application d'un principe physique simple, ils se liquéfient en absorbant de l'énergie à partir d'une certaine température caractéristique pour chaque type de matériau et restituent cette énergie lorsque la température de leur environnement est inférieure à celle-ci.

Le but de ce travail est de développer une méthode numérique permettant de prédire le problème de changement de phase solide-liquide en 1D en utilisant un réseau de mailles fixes. On tient compte du transfert de chaleur par conduction en résolvant l'équation d'énergie.

Ce travail vise d'une part à modéliser et simuler le comportement de changement de phase et d'autre part, à approcher les mécanismes d'échange thermique à l'interface. Par ailleurs, cette étude traitera la solidification et la fusion du MCP. Deux approches différentes seront utilisées pour modéliser le changement de phase liquide-solide.

Pour atteindre les objectifs fixés à cette étude, on a subdivisé le travail en trois chapitres.

Le premier chapitre est consacré à une revue bibliographique des travaux de recherche sur le stockage d'énergie thermique et les catégories de ce stockage, et nous avons également fait une définition complète aux matériaux à changement de phase et leur application.

Au cours du deuxième chapitre, nous étudierons la caractérisation du problème de changement de phase solide liquide. Nous introduirons la modélisation des changements de phase liquide-solide en présentant la formulation du problème de Stefan et sa solution analytique en 1D seulement avec la condition de Dirichlet.

Le troisième chapitre, nous développerons une modélisation de problème de changement de phase en 1D avec la condition de Neumann. Finalement en écrivant une conclusion générale de notre travail.

# Chapitre 1

Matériaux à changement

De phase

## I.1. Introduction

Les matériaux à changement de phase (MCP) stockent l'énergie en changeant de phase solide- liquide (fusion) puis ils restituent la chaleur par le changement de phase liquide-solide (solidification). Ce stockage peut se faire sous deux formes:

Le stockage par la chaleur sensible (Stockage Thermique Sensible, STS) dans lequel la température des matériaux de stockage varie avec la quantité d'énergie stockée et le matériau ayant une grande capacité thermique. Le stockage par la chaleur latente (Stockage Thermique Latente, STL) qui utilise l'énergie emmagasinée ou restituée lorsqu'un corps change d'état (solide, liquide, gaz).

## I.2. Les différents types de stockage

### I.2.1 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 [1,2].

### I.2.2. Stockage mécanique

Les systèmes du stockage d'énergie mécaniques comportent le stockage d'énergie gravitationnel, le stockage par l'hydro puissance pompé, le stockage d'énergie sous forme d'air comprimé et par volants [3].

### I.2.3. Stockage électrique

- Supraconducteurs magnétiques: stockage électromagnétique.
- photovoltaïque (batteries, accumulateur) -Stockage à très basse température [3].

### I.2.4. Stockage thermique

L'utilisation différée de l'énergie est l'idée commune qui vient à l'esprit dès que l'on parle de stockage. Essentiellement trois modes de stockage thermique peuvent être envisagés: le stockage par chaleur sensible, le stockage par chaleur latente, le stockage thermochimique [2].

### I.2.5. Stockage d'énergie thermochimique

L'énergie thermochimique est la chaleur absorbée ou libérée au cours d'une réaction chimique endothermique ou exothermique. Le stockage d'énergie thermochimique est basé sur l'énergie des liaisons des composés chimiques mise en jeu au cours des réactions chimiques réversibles. Dans ce système, la capacité de stockage de chaleur est généralement élevée parce qu'une énergie chimique élevée se produit au cours de la rupture et de la recombinaison des liaisons moléculaires dans une réaction chimique réversible. Le stockage d'énergie thermochimique peut être effectué à l'aide de caloduc chimique ou d'une pompe à chaleur chimique. Ce système est plus compliqué que le stockage de la chaleur sensible et latente[4].

### I.3. Les méthodes de stockage d'énergie thermique

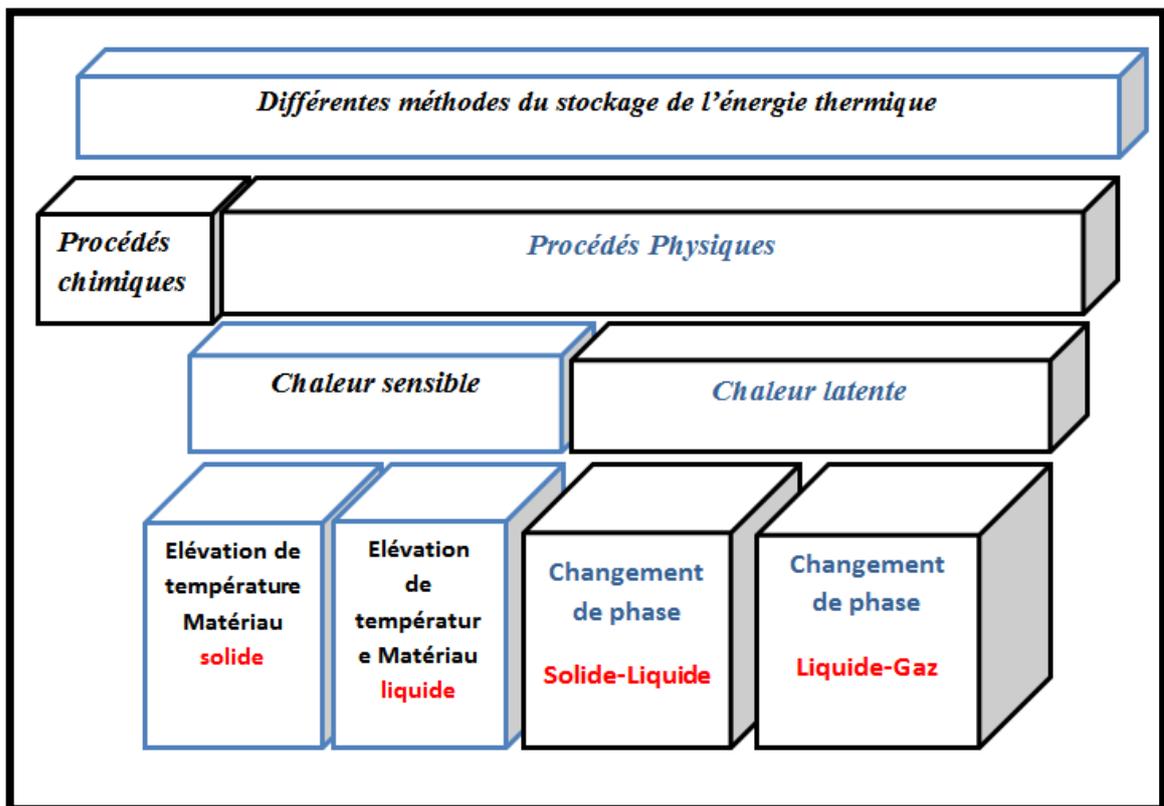


Fig. I.1. Différentes méthodes possibles du stockage de l'énergie thermique.

Le stockage de la chaleur peut se faire de deux façons différentes, soit par [5] :

- Chaleur sensible
- Chaleur latente

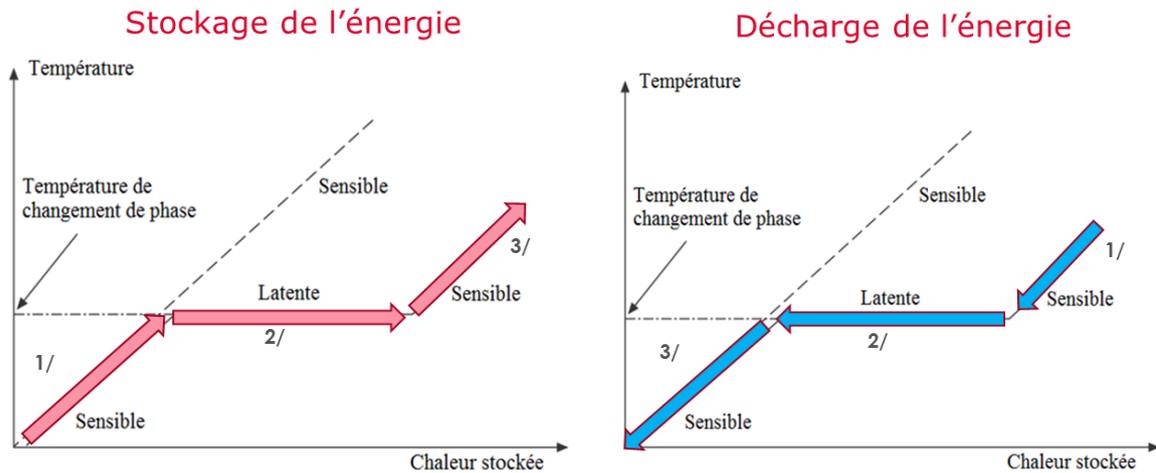


Fig I.2. Les schémas suivants expliquent les cycles de stockage et de décharge de l'énergie

### I.3.1. Chaleur sensible

Le stockage par chaleur sensible est réalisé par un apport thermique augmentant la température du milieu récepteur « monphasé ». Le déstockage (ou soutirage) de la chaleur entraînera une diminution de la température de ce milieu. Considérons le réchauffement d'un corps à haute température qu'on place ensuite dans un système d'utilisation dont la température est plus basse. À pression constante, pour l'élévation de la température  $T_1$  à  $T_2$  d'un corps de masse  $m$  et de capacité thermique massique  $C(T)$ , l'énergie stockée est donnée par la variation d'enthalpie :

$$H_2 - H_1 = \int_{T_2}^{T_1} mc(T)dT \tag{I.1}$$

Afin de simplifier le problème, on suppose que la capacité thermique massique ne dépend pas de la température :  $C(T) = constante = C$ .

L'équation (I.1) devient :

$$H_2 - H_1 = mc(T_2 - T_1) \tag{I.2}$$

La quantité d'énergie qui est stockée est proportionnelle à la différence de température. Ainsi, le choix de ce stockage est intéressant lorsque l'écart de température est grand.

Par la suite, on met le corps préalablement chauffé en présence d'un système utilisateur tel que sa température  $T'_1$  soit inférieure à  $T_2$  dans le but qu'il récupère d'une quantité d'énergie égale à :

$$mc(T_2 - T'_1) - |Q_{perte}| \quad (I.3)$$

Où,  $|Q_{perte}|$  désigne la perte de chaleur au cours du maintien à la température  $T_2$ , ou lors de l'échange que l'on essaie de minimiser, un stockage par chaleur sensible est ainsi réalisé.

Au cours processus de stockage, si nous rencontrons les cas suivants :

$T_2 > T_1$  alors il s'agit du stockage chaud.

$T_2 < T_1$  alors il s'agit du stockage froid.

Selon le cas considéré, l'effet inverse sera un déstockage soit du chaud ou du froid.

Les principaux constituants employés pour le stockage par chaleur sensible sont des liquides (eau) ou des solides (pierres) possédant des chaleurs sphériques importantes[5].

### I.3.2. Chaleur latente

Le stockage par chaleur latente consiste à emmagasiner de l'énergie, qui par la suite va provoquer une variation de température et un changement de phase du matériau. Lors de la restitution de l'énergie, on observera le phénomène du changement de phase inverse. La chaleur  $Q$ , absorbée ou cédée, durant le processus de changement de phase est régie par :

$$Q = mL_F \quad (I.4)$$

Dans la pratique, il se peut que la chaleur sensible et la chaleur latente interviennent successivement dans les processus thermiques. En effet, si on considère qu'un constituant servant de stockage est initialement à la température  $T_1$ , qui est inférieure à la température de fusion  $T_F$  et que  $T_F$  soit inférieure à la température finale  $T_2$  ( $T_1 < T_F < T_2$ ), le stockage se fera sous forme sensible et sous forme latente. A pression constante, le stockage de l'énergie est donné par la variation d'enthalpie :

$$H_2 - H_1 = \int_{T_1}^{T_F} mc_{sol}(T)dT + mL_F(T_F) + \int_{T_F}^{T_2} mc_{liq}(T)dT \quad (I.5)$$

Avec :

$$\begin{cases} c_{sol} \text{ capacité thermique massique à l'état solide } [J.Kg^{-1}.K^{-1}] \\ c_{liq} \text{ capacité thermique massique à l'état liquide } [J.Kg^{-1}.K^{-1}] \\ L_F \text{ chaleur latente de changement de phase } [J.Kg^{-1}.K^{-1}] \end{cases}$$

En supposant que les capacités thermiques massiques des corps sont indépendantes de la température, l'équation (I.5) devient

$$H_2 - H_1 = mc_{sol} (T_F - T_1) + mL_F (T_F) + mc_{liq} (T_2 - T_F) \quad (I.6)$$

$$L_F (T_F) = H_{liq} (T_F) - H_{sol} (T_F) > 0 \quad (I.7)$$

Avec :

$$H_{sol} (T_F) : \text{Enthalpie massique du solide à la température d'équilibre } T_F [J.Kg^{-1}]$$

$$H_{liq} (T_F) : \text{Enthalpie massique du liquide à la température d'équilibre } T_F [J.Kg^{-1}]$$

$$L_F(T_F) : \text{variation enthalpie lors du changement de phase } [J.Kg^{-1}]$$

Dans l'équation (I.6), le terme  $mL_F$  est très grand comparé aux autres termes de l'équation. Cela vient du fait que l'énergie stockée par chaleur latente est beaucoup plus importante que celle du stockage par chaleur sensible.

Le stockage par chaleur latente est ainsi performant pour stocker de grandes quantités d'énergie lorsque les masses et l'écart de température sont faibles. Cependant, ce type de stockage oblige à recourir à des technologies très élaborées [5].

<b>Stockage sensible</b>	<b>Température (°C) Froid - Chaud</b>	<b>Capacité calorifique <math>c_p</math> (kJ/kg.K)</b>
Sable – roche – huile minérale	200 – 300	1.3
Béton renforcé	200 - 300	0.85
Huile minérale	200 - 300	2.6
Eau	20 - 80	4.18
Nitrates de sels fondus	250 – 350	1.5
<b>Stockage latent</b>	<b>Température de fusion <math>T_{fusion}</math> (°C)</b>	<b>Chaleur latente <math>\Delta h_{S-L}</math> (kJ/kg)</b>
Acide maléique	131-140	235
Xylitol	95	232
Erythritol	118	340
MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	117	165
NaNO <sub>3</sub>	307	172
<b>Stockage sensible</b>	<b>Masse volumique <math>\rho</math> (kg/ m<sup>3</sup>)</b>	<b>Densité énergétique (kWh<sub>t</sub>/m<sup>3</sup>)</b>
Sable – roche – huile minérale	1700 2200	61 52
Béton renforcé	770	56
Huile minérale	1000	70
Eau	1825	76
Nitrates de sels fondus		
<b>Stockage latent</b>	<b>Masse volumique <math>\rho</math> (kg/ m<sup>3</sup>)</b>	<b>Densité énergétique (kWh<sub>t</sub>/m<sup>3</sup>)</b>
Acide maléique	1590	103
Xylitol	1500	97
Erythritol	1450	137
MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	1569	72
NaNO <sub>3</sub>	2260	108

**Tableau .I.1.** Comparaison de différentes méthodes de stockage d'énergie thermique en fonction de leur densité énergétique [6].

#### I.4. Matériau à changement de phase

Les matériaux à changement de phase ou MCP sont des matériaux passés d'un état physique à un autre dans une plage de température restreinte. Un matériau à changement de phase met à profit sa capacité d'absorber ou de libérer de l'énergie pendant son changement de phase. Quand le point de fusion est atteint, le MCP passe de la phase solide à la phase liquide, ce qui est accompagné d'une absorption d'énergie, ce processus aide ainsi à réduire l'augmentation de la température ambiante. Quand le changement de phase est inversé, c'est-à-dire lorsque le matériau passe de l'état liquide à l'état solide, la chaleur absorbée est libérée.

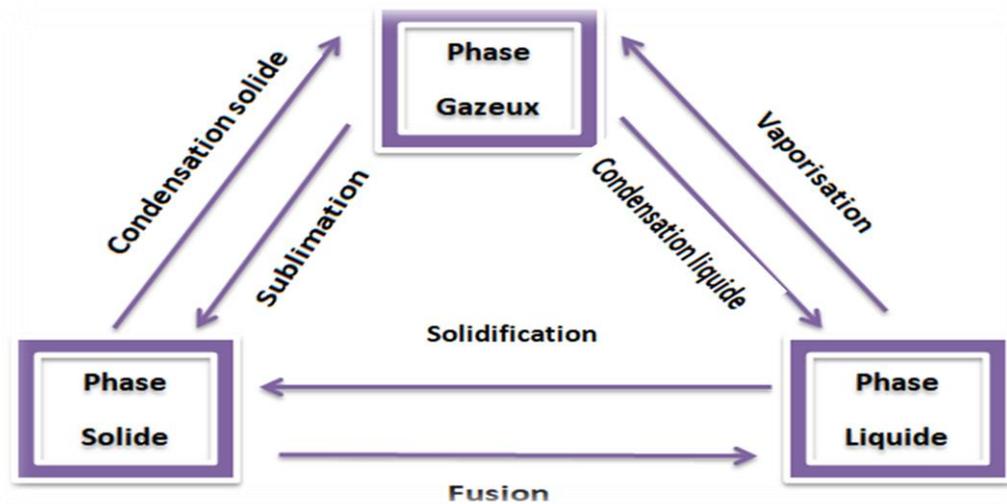
Les changements de phase se produisent sans variation de température, ce qui signifie que de grandes quantités d'énergie peuvent être stockées et relâchées sans changement de température des matériaux. Un MCP permet donc de stocker la chaleur du milieu lorsque la température ambiante dépasse la température de fusion et de libérer cette chaleur quand la température devient inférieure [2].



*Fig.I.3 Exemple de MCP : a. Paraffine, b.Eau*

### **I.5.Les différents types de changements d'état**

Les états (ou phases) de la matière représentent les différentes formes sous lesquelles une substance peut exister dans la nature. Les trois états de la matière les plus connus sont les états gazeux, solide et liquide. Il existe d'autres états comme le plasma, mais ceux-ci sont plutôt rares et doivent normalement être produits en laboratoire, dans des conditions de température et de pression précises [7].



**Fig.I.4.** Le diagramme suivant présente le nom attribué à chacun des changements d'état.

La fusion est le passage de l'état solide à l'état liquide. Pour que ce changement de phase se produise, il faut que de la chaleur soit fournie à la substance solide [8].

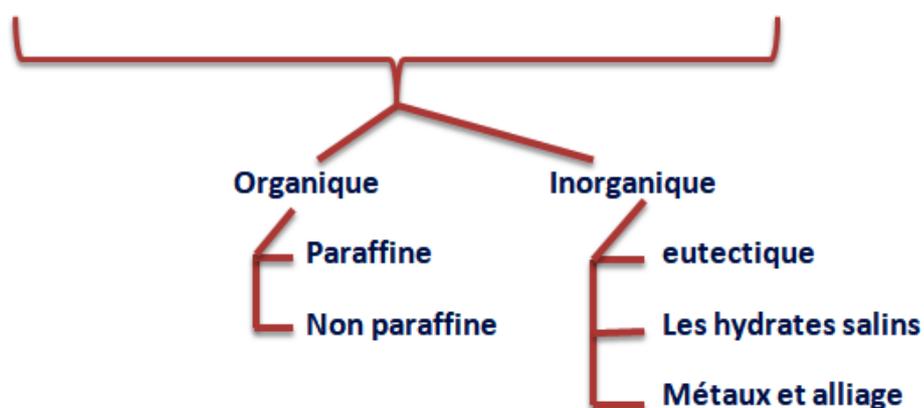
La solidification est le passage de l'état liquide à l'état solide. La solidification est le procédé inverse de la fusion. Il faut donc diminuer la température pour transformer une substance à l'état liquide initialement vers l'état solide [8].

### I.6. Types des matériaux à changement de phase (MCP)

Il existe de nombreux types de matériaux à changement de phase, de nature physico-chimique particulièrement différentes les unes des autres.

Ce sont leurs caractéristiques de fusion-cristallisation qui les rendent intéressants pour le stockage de chaleur latente. Parmi ces matériaux, on distingue les 2 familles suivantes [9]:

#### Classification des matériaux à changement de phase



**Fig.I.5.** Classification des matériaux à changement de phase.

### I.6.1. Les MCP organiques

Les matériaux ou les substances organiques ont une température ou une plage de température de fusion comprise entre 0°C et 150° 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 [10].



*Fig.1.6. Acide gras[2].*

#### I.6.1.1 Les paraffine

Les paraffines sont une famille d'hydrocarbonés saturés. Au-delà de  $C_{15}H_{32}$  elles sont solides sous formes de cires. Globalement, plus la chaîne carbonée est longue plus la température de fusion est élevée et plus la chaleur latente est grande. La plupart des paraffines commerciales sont obtenues par distillation à base de pétrole et ne sont pas pures mais des mélanges de plusieurs hydrocarbures. Le Tableau I.2 indique les propriétés de paraffines pures usuelles [11].

Les paraffines, car on en distingue plusieurs types, sont des alcanes, à savoir des molécules linéaires d'hydrocarbures saturés à chaîne non cyclique, et dont la formule brute est  $C_nH_{2n+2}$ , où la valeur de n se situe entre 18 et 32, celle de la masse molaire se situe entre 275 et 600 g/mol.

On distingue les paraffines constituées d'alcane linéaires (n-alcane) et celles constituées d'alcane ramifiées (iso-alcane), soit :

- Les paraffines liquides ou fluides ( $n = 8$  à  $19$ ) dont la viscosité est de  $25$  à  $80$  *mPa.s*.
- Les paraffines huileuses ou pâteuses, dont la viscosité est de  $110$  à  $230$  *mPa.s*.
- Les paraffines solides, cires ( $n = 20$  à  $40$ ) dont la température de figeage. (solidification) se situe entre  $50$  °C et  $62$  °C [12].

Nom	Point de fusion (°C)	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Chaleur latente (J/g)
C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	18,2	774	238
C <sub>17</sub> H <sub>34</sub>	22	778	215
C <sub>18</sub> H <sub>34</sub>	28,2	814 <sup>S</sup> -775 <sup>L</sup>	245
C <sub>19</sub> H <sub>34</sub>	31,9	912 <sup>S</sup> -769 <sup>L</sup>	222
C <sub>20</sub> H <sub>34</sub>	37	n.a.	247
C <sub>21</sub> H <sub>34</sub>	41	n.a.	215
C <sub>22</sub> H <sub>34</sub>	44	n.a.	249

**Tableau .I.2.** Points de fusion et chaleur latente pour quelques paraffines pures, solides sous forme de cires [11].

Sont la grande stabilité chimique des paraffines; elles n'ont pas tendance à la ségrégation des phases donc permettent de grands nombres de cycles fusion/solidification consécutifs. La chaleur latente de fusion / solidification est grande. Il n'y a quasiment pas de surfusion avec les paraffines et les agents de nucléation ne sont pas nécessaires. De plus les paraffines ne sont pas toxiques et 100% recyclables.

Sont l'origine pétrolière des paraffines commerciales ; ainsi que le fait que la conductivité thermique à l'état solide soit assez faible. Le volume occupé par la paraffine peut varier signifie activement avec le changement d'état. Contrairement aux sels hydratés la zone de température de changement de phase est assez étalée sur plusieurs degrés, le pic est plus large et moins élevé. Enfin les paraffines sont inflammables donc elles doivent être conditionnées en conséquence pour l'usage en bâtiment [11].



*Fig.1.7.Paraffines brutes, en capsulées, en poudre ou en granulés[2,3]*

### I.6.1.2.Non paraffines

Les corps organiques non paraffinés sont les plus nombreux matériaux à changement de phase. Les MCP organiques non paraffiniques se caractérisent par leurs propriétés très variées. Chacun de ces matériaux auront ses propres propriétés contrairement aux paraffines, qui ont des propriétés très similaires. Des études approfondies mènent à reconnaître un certain groupe convenant au stockage d'énergie thermique. Ces matières organiques sont subdivisées en acides gras et autres composés organiques non paraffiniques

Les acides gras sont parmi les nombreux types des MCP organiques non paraffiniques, ont suscité récemment l'intérêt car ils sont caractérisés par des propriétés thermo physiques et cinétiques souhaitables aux applications sur l'enveloppe des bâtiments. La température de fusion et la chaleur latente de fusion de certains acides sont indiquées dans le tableau I.3 [13].

Matière	Formule	Température de fusion (°C)	Chaleur latente (kJ/kg)
Acetic acid	CH <sub>3</sub> COOH	16.7	184
Capric acid	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>8</sub> COOH	36	152
Eladic acid	C <sub>8</sub> H <sub>7</sub> C <sub>9</sub> H <sub>16</sub> COOH	47	218
Lauric acid	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>10</sub> COOH	49	178
Pentadecanoic acid	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>13</sub> COOH	52.5	178
Tristearin	(C <sub>17</sub> H <sub>35</sub> COO) <sub>3</sub> C <sub>3</sub> H <sub>5</sub>	56	191
Myristic acid	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>12</sub> COOH	58	199
Palmitic acid	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>14</sub> COOH	55	163
Stearic acid	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>16</sub> COOH	69.4	199
Acetamide	CH <sub>3</sub> CONH <sub>2</sub>	81	241
Methyl fumarate	(CHCO <sub>2</sub> NH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	102	242

*Tableau I.3.Point de fusion et chaleur latente de fusion des acides gras[13].*

L'inconvénients de matériaux non paraffines sont [14] :

- faible conductivité thermique.
- Points d'éclair bas.
- Inflammabilité.
- Instabilité à des températures élevées.
- Niveau variable de toxicité.

### I.6.2. Les MCP inorganiques

Parmi ces composés, seuls les sels hydratés présentent un intérêt pour leur utilisation comme MCP. Ils sont issus d'un alliage de sels organiques et d'eau [11]. Ont une température ou une plage de températures de fusion comprise entre  $-100\text{ °C}$  et  $+1000\text{ °C}$ . Les plus utilisés sont : l'eau (température de fusion  $0\text{ °C}$ ), les solutions aqueuses de sel (température de fusion inférieure à  $0\text{ °C}$ ), des sels hydratés (température de fusion comprise entre  $5\text{ °C}$  et  $130\text{ °C}$ ), des mélanges de sels, des mélanges de métaux (température de fusion supérieur à  $150\text{ °C}$ ). Ils ont plusieurs avantages : ils ont une chaleur latente importante et une haute conductivité thermique. Ils 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 [12].



*Fig.1.8 Sels Hydratés ainsi l'utilisation d'agent de nucléation afin d'être fiables [2]*

#### I.6.2.1. Les hydrates salins

Les hydrates de sel consistent d'un rapport de mélange entre le sel et de l'eau. Il s'agit généralement d'un nombre entier de molécules d'eau par paire d'ions du sel, où se forme une structure cristalline stable.. Les molécules d'eau sont localisées et orientées dans la structure d'une manière bien définie. Dans certaines structures, l'eau est plus étroitement orientée vers l'anion, et dans les autres sels vers le cation.

Les hydrates de sel ont souvent une densité de stockage comparativement élevée par rapport à leur masse volumique. Dans le fait que la séparation de phase est un problème commun avec hydrates de sel. Ils peuvent potentiellement être séparé dans la phase liquide et ainsi montre un problème de stabilité.

Leur conductivité thermique est similaire à celle de l'eau, les hydrates de sel sont chimiquement très stables. Dans le tableau 1.8 on donne une sélection typique qui est à la base de nombreux MCP commerciaux [13].

### **I.6.2.2. Métaux et alliages**

La plupart des matériaux à changement de phase (MCP) appartiennent à la famille des chalcogénures, donc contiennent au moins un élément chalcogène de la colonne VI du tableau périodique comme le soufre (S), le sélénium (Se), et le tellure (Te). Les alliages à base d'antimoine comme le GeSb, GaSb et InSb ne font pas partie des chalcogénures mais restent des matériaux à changement de phase très prometteurs [15].

Cette catégorie comprend les métaux de fusion à basse température car la plupart des métaux ont des températures de fusion assez élevées à plus de 3000 ° C. Par exemple, le carbone fond à 3527 C.

Une liste des métaux à changement de phase et leurs propriétés dans l'application sur l'enveloppe sont données dans le tableau I.4. Le principal inconvénient des MCP métallique est leurs faibles chaleurs latentes de fusion [13].

Matière	Température de fusion (°C)	Enthalpie de fusion (kJ/kg)	Conductivité thermique (W/m·K)	Densité (kg/m <sup>3</sup> )
LiClO <sub>3</sub> -3H <sub>2</sub> O	8	155		1530 (liquide) 1720 (solide)
KF-3H <sub>2</sub> O	18.5	231		1447 (liquide, 20 °C) 1455 (solide, 18 °C)
CaCl <sub>2</sub> -6H <sub>2</sub> O	29, 30	171,19 0	0.540 (liquide, 39°C) 1.088 (solide, 23 °C)	1562 (liquide, 32 °C) 1710 (solide, 25 °C)
LiNO <sub>3</sub> -3H <sub>2</sub> O	30	296		
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -10H <sub>2</sub> O	32	254	0.554 (solide)	1485 (solide)
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> -12H <sub>2</sub> O	35-44	280	0.476 (liquide) 0.514 (solide)	1442 (liquide) 1522 (solide)
Na <sub>2</sub> S <sub>3</sub> O <sub>3</sub> -5H <sub>2</sub> O	48-55	187,20		1670 (liquide) 1750 (solide)
NaCH <sub>3</sub> COO)-3H <sub>2</sub> O	58	226,26 4		1280 (liquide) 1450 (solide)
Ba(OH) <sub>2</sub> -8H <sub>2</sub> O	78	265,28 0	0.653 (liquide, 86°C) 1.255 (solide, 23 °C)	1937 (liquide, 84°C)
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> -6H <sub>2</sub> O	89, 90	149,16 3	0.490 (liquide, 95 °C) 0.669 (solide, 56 °C)	1550 (liquide, 94°C)
MgCl <sub>2</sub> -6H <sub>2</sub> O	117	165,16 9	0.570 (liquide, 120°C) 0.704 (solide, 110 °C)	1450 (liquide, 120°C) 1569 (solide, 20 °C)

**Tableau 1.4.** Exemples d'hydrates de sel ayant été étudiés en tant que MCP [13].

### I.6.2.3 Eutectique

L'origine du mot eutectique grec et signifie fondre [16]. Les eutectiques sont des mélanges de deux ou plusieurs corps, par définition. Ils sont classés en eutectiques inorganiques, eutectiques organiques et eutectiques organiques – inorganique. Le plus connu est l'eutectique eau sel, saler les routes en hiver permet d'abaisser la température de fusion du mélange ainsi constitué. La température de fusion d'un mélange eutectique est en effet inférieure à celle des deux composés le constituant. Quelques eutectiques sont utilisés pour le refroidissement et dans les systèmes passifs de stockage de l'énergie solaire [13].

<b>Eutectiques Inorganiques</b>	<b>Point de fusion [°C]</b>	<b>Chaleur latente de fusion [kJ/kg]</b>
49,3% MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O + 50,7% Mg(NO <sub>3</sub> ).6H <sub>2</sub> O	58	132,3
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (32,5%)H <sub>2</sub> O(41,4%), NaCl(6,66%),NH <sub>4</sub> Cl(6,16%)	13	146
61,5%Mg(NO <sub>3</sub> )6H <sub>2</sub> O + 38,5%NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	51	131,1
58,3%Mg(NO <sub>3</sub> )6H <sub>2</sub> O +41,7%MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	58	106
CaCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O + CaBr <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O	14	140
<b>Eutectiques Organiques</b>		
Acides Caprique –Laurique	18	120
Acides Palmitique – Laurique	33	145
Acides Stéarique – Laurique	34	150

*Tableau.1.5. Une liste de quelques Eutectiques [13]*



*Fig.1.9.L'Auric Acide [2].*

### **I.6.3. Avantages et inconvénients des MCP organiques et inorganiques**

La plupart des MCP organiques tels que les cires de paraffine sont chimiquement stables et non corrosives. Ils présentent également peu ou pas de propriétés de surfusion, une chaleur latente élevée et ils sont recyclables, ce qui les rend bien adaptés à la plupart des matériaux de construction. Cependant, ils présentent des inconvénients tels que, une faible conductivité thermique, un changement de volume pendant le processus de changement de phase et l'inflammabilité [13].

Les MCP inorganiques tels que les hydrates de sel et les composites de sel ont une chaleur latente par unité de volume beaucoup plus élevée, une conductivité thermique plus élevée, sont moins chers, recyclables et ininflammables. Cependant, un inconvénient majeur, est qu'ils sont corrosifs pour la plupart des métaux, ce qui entraîne leur courte durée de vie ainsi que le coût élevé de l'emballage et de la maintenance. Contrairement aux composés organiques, les composés inorganiques peuvent également subir une séparation de phase et une surfusion, ce qui affectera grandement leurs propriétés de changement de phase.

Les matériaux métalliques, ne possèdent pas les inconvénients des sels inorganiques, ce qu'en fait une solution potentielle pour les MCP à haute température [13].

## **I.7. Critères de choix d'un matériau à changement de phase**

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

### **I.7.1. Propriétés thermiques**

- La température de transition de phase doit être conforme au domaine d'application.
- Une chaleur latente de transition élevée.
- Une bonne qualité de transfert de chaleur, une conductivité thermique élevée faciliterait la charge et la décharge du stockage de l'énergie [5].

### **I.7.2 Propriétés physiques**

- Une densité importante du corps permettra un volume de stockage très faible et donc un réservoir de stockage petit.
- Pour réduire les contraintes mécaniques dans le conteneur, la tension en vapeur doit être minimale et l'expansion volumique petite.
- Une stabilité des phases favorable pour le stockage et le déstockage de la chaleur [5].

### **I.7.3 Propriétés cinétiques**

- La surfusion doit être réduite.
- Un taux de cristallisation important [5].

### **I.7.4. Propriétés chimiques**

- Une stabilité chimique à long terme des cycles de fusion/solidification.
- La compatibilité avec les matériaux de construction.
- L'étude de la dangerosité du produit (toxicité, inflammabilité, explosion,...) passant par les réglementations et normalisations en vigueur. La dangerosité du produit doit être minimisée.
- Recyclable [5].

### **I.7. 5.Aspects économiques**

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

- Disponible en grande quantité [5].

## I.8.Applications des MCP

### I.8.1. Domaine électronique

L'utilisation des MCP dans le domaine de l'électronique pour assurer le contrôle thermique et la protection des composants électroniques a reçu récemment une grande attention. En effet, la surchauffe de ces composants est absorbée par les MCP qui peuvent être placés directement en couche mince sur le composant électronique ou introduits dans une cavité aux puits de chaleur classique [17].

### I.8.2 Domaine mécanique

Les MCP ont été également utilisés pour préchauffer les moteurs à combustion interne comme par exemple le moteur diesel. En effet, les trois quart de l'énergie produite par un moteur automobile sont dissipés dans la nature.

Cette énergie sera alors stockée par les MCP connectés au radiateur. Le stockage par chaleur latente permet alors d'éviter les problèmes liés au démarrage à froid du moteur [17].

### I.8.3 Domaine médicales

Dans le secteur médical, une des applications principales est le transport de sang et organes. D'autres applications médicales peuvent être des coussinets chauds ou froids pour traiter la douleur locale dans le corps [3].



**Fig.I.10.**Réipients transporter sang et organes qui contiennent MCP[3,4].

### I.8.4. L'industrie textile

Récemment et dans l'objectif de réguler d'une manière passive la température corporelle en fonction de la température du milieu ambiant, des vêtements intelligents contenant des fibres thermo-régulées incorporant des matériaux à changement de phase attirent de plus en plus l'attention des fabricants de textiles, tels les vêtements à usage technique nécessitant une meilleure gestion des variations de température corporelle. En effet, l'intégration de ces matériaux dans les vêtements de protection comme la tenue feu des pompiers améliore la protection des usagers. Les différentes techniques d'incorporation de ces matériaux dans le textile et les applications potentielles des MCP dans ce domaine (couvertures, oreillers, revêtement de siège de voiture, tenue de sport combinaison spatiale, chaussures, gants, etc.) [17].

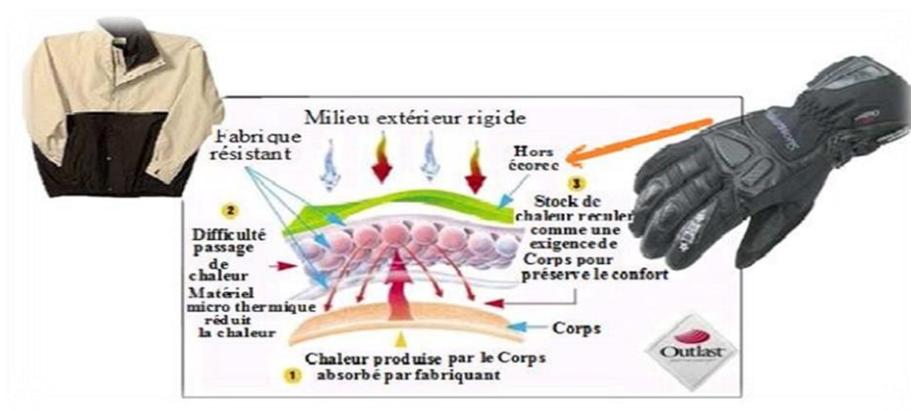


Fig I.11: L'efficacité de MCP dans les textiles

### I.8.5. Domaine des routes

Les MCP sont également utilisés dans le domaine des routes en tant que retardateurs d'apparition du gel sur la chaussée. Les MCP employés dans ces projets, dont le point de solidification est supérieur à celui de l'eau, libèrent de l'énergie lorsque la température extérieure atteint leur température de solidification. Ceci limite la dégradation de la chaussée par action du froid [17].

### I.8.6 Les MCP dans les rideaux

Les rideaux à base de MCP sont aussi expérimentés pour améliorer le confort résidentiel. Le principe de fonctionnement consiste à laisser les fenêtres ouvertes afin que les rideaux soient exposés aux rayonnements solaires. La fusion des MCP permet de rafraîchir l'intérieur du bâtiment. Au cours du refroidissement nocturne ou par temps nuageux, le rideau libère la chaleur solaire emmagasinée ce qui permet aux MCP de se solidifier et la salle de se réchauffer [3].



*Fig I.12. Rideaux à MCP.*

### I.8.7 Application aux bâtiments

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

- Leur utilisation, lorsqu'ils sont intégrés à l'enveloppe du bâtiment, pour des applications de chauffage.
- Leur intégration à l'enveloppe de bâtiments à faible inertie thermique dans le but d'améliorer le confort d'été.
- L'utilisation des MCP pour chauffer ou refroidir un bâtiment, peut se faire de trois façons différentes.
- Intégration dans les murs du bâtiment ;
- Intégration dans les éléments de constructions autres que les murs ;
- Intégration dans les unités de stockages à chaud et/ou à froid.

L'intégration de matériau à changement de phase (MCP) dans l'enveloppe d'un bâtiment constitue une solution pour améliorer la performance thermique de celui-ci, notamment en termes de confort d'été [2].



*Fig 1.13. Isolation thermique d'un bâtiment*

## **I.9. Conclusion**

Le stockage de l'énergie thermique par chaleur sensible ou latente est un sujet très important, si on observe le nombre important de publications présentées dans cette partie. Les études traitant le stockage par chaleur latente sont plus nombreuses par rapport à celles qui traitent le stockage par chaleur sensible.

Dans la plupart des travaux, le MCP occupe tout le domaine et est considéré homogène. 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.

Par ailleurs nous pouvons dire que l'utilisation des matériaux à changement de phase pour le stockage de l'énergie thermique présente un grand intérêt au regard du contexte énergétique actuel.

# Chapitre II

*Modélisation des MCP avec  
les conditions de Dirichlet*

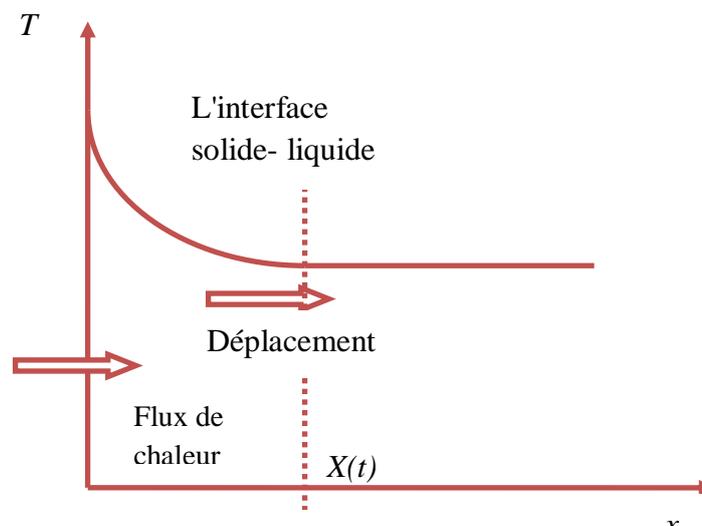
## II.1. Introduction

La modélisation va permettre de créer une représentation simplifiée d'un problème. L'objectif principal dans ce chapitre est d'exposer la démarche théorique pour répondre à la problématique scientifique. Nous présentons la méthodologie appliquée à notre cadre d'étude, nous présentons et discutons des résultats obtenus du modèle à changement de phase solide-liquide avec les solutions analytiques existantes dans la littérature. Les solutions analytiques étant établies pour des conditions aux limites de type de Dirichlit et Neumann, et pour un milieu semi infini.

## II.2. Problème à une phase

La fusion est le passage d'un corps de l'état solide à l'état liquide. Le phénomène physique de problème mono phase peut être décrit de la manière suivante [18, 19,20]:

- Soit un milieu semi-infini dans lequel un corps solide  $y$  est confiné et dont sa température  $T_i$  est approximativement égale à la température du fusion  $T_F$  pour tout  $x > 0$ .
- La température à la frontière gauche ( $x = 0$ ) est soudainement élevée à une température de fusion  $T_f$ .
- Le solide commence par conséquent à la fusion. Dans ce cas la température dans le reste de solide est constante .
- L'interface diphasique solide-liquide, quant à elle, va se déplacer dans la direction positive de  $x$  (figure II.1).



**Fig.II.1.** Fusion du solide semi-infini.

Dans la région liquide la formulation mathématique est:

$$\frac{\partial T_\ell}{\partial t} = \alpha_\ell \frac{\partial^2 T_\ell}{\partial x^2} \quad 0 < x < X(t) \quad (\text{II.1})$$

Avec des conditions initiales et aux limites:

$$T_\ell(x, 0) = T_f \quad x \geq 0, t = 0 \quad (\text{II.2})$$

$$T_0(0, t) = T_0 \quad x = 0, t > 0 \quad (\text{II.3})$$

$$T_\ell(X(t), t) = T_f \quad x = X(t), t > 0 \quad (\text{II.4})$$

$$-k_\ell \left( \frac{\partial T_\ell}{\partial x} \right)_{[X(t)]} = \rho L \frac{dX(t)}{dt} \quad x = X(t), t > 0 \quad (\text{II.5})$$

La solution sous la forme:

$$T_\ell(x, t) = T_0 + A \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{\alpha_\ell t}} \right)$$

A l'interface :

$$x = X(t) \quad T_\ell(X(t), t) = T_f$$

$$\Rightarrow T_f = T_0 + A \operatorname{erfc} \left( \frac{X(t)}{2\sqrt{\alpha_\ell t}} \right)$$

$$\lambda' = \frac{X(t)}{2\sqrt{\alpha_\ell t}}$$

Alors :

$$T_f = T_0 + A \operatorname{erfc}(\lambda')$$

Donc:

$$\lambda' = Cst \Rightarrow A = \frac{T_f - T_0}{\operatorname{erf}(\lambda')}$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\pi} \int_0^x e^{-x^2} dx$$

Le profil de température est donnée par :

$$T_\ell(x,t) = T_0 - (T_0 - T_f) \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_\ell t}}\right)}{\operatorname{erf}(\lambda')} \quad (\text{II.6})$$

Le bilan à l'interface :  $-k_\ell \left(\frac{\partial T_\ell}{\partial x}\right)_{[X(t)]} = \rho L \frac{dX(t)}{dt}$

$$T_\ell(x,t) = T_0 - (T_0 - T_f) \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_\ell t}}\right)}{\operatorname{erf}(\lambda')}$$

$\lambda'$  en fonction de  $Ste_\ell$ , pour  $0 \leq Ste_\ell \leq 5$ , est donné sur la figure II.2 [20]:

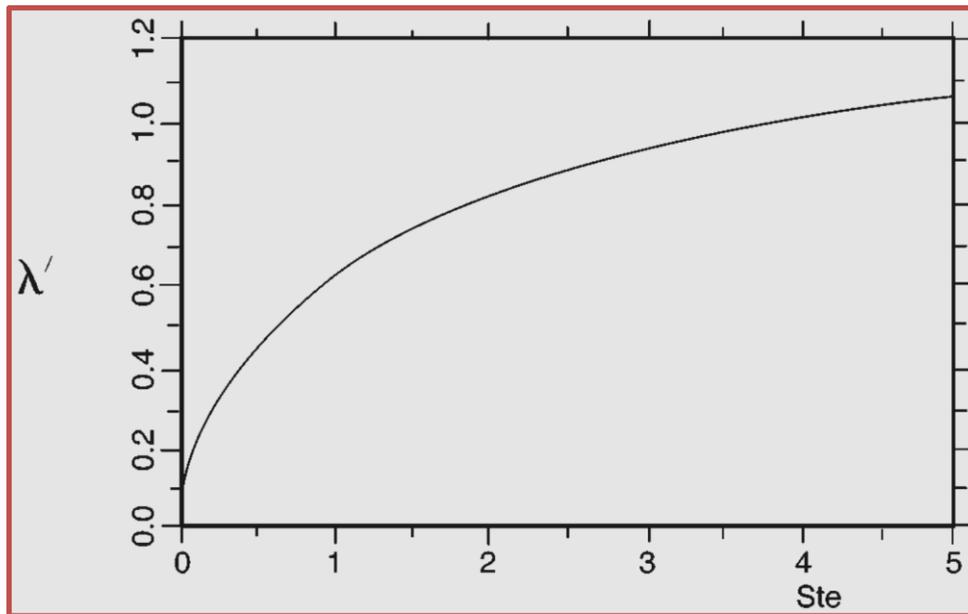


Fig.II.2. La racine  $\lambda'$

Alors :

✓ Position de l'interface :  $X(t) = 2\lambda' \sqrt{\alpha_\ell t}$  (II.7)

✓ Temps d'arrivée au point p :  $\tau(p) = \frac{p^2}{4\alpha_\ell \lambda'^2}$  (II.8)

$$\checkmark \text{ Vitesse de l'interface solide-liquide : } v(t) = \frac{dX(t)}{dt} = \frac{\alpha_\ell \lambda'}{\sqrt{\alpha_\ell t}} \quad (\text{II.9})$$

✓ Flux de chaleur :

$$\phi(x,t) = \frac{k_\ell (T_0 - T_f) e^{-\frac{x^2}{4\alpha_\ell t}}}{\text{erf}(\lambda') \sqrt{\pi \alpha_\ell t}} \quad (\text{II.10})$$

• Quantité de chaleur en  $(J/m^3)$ :

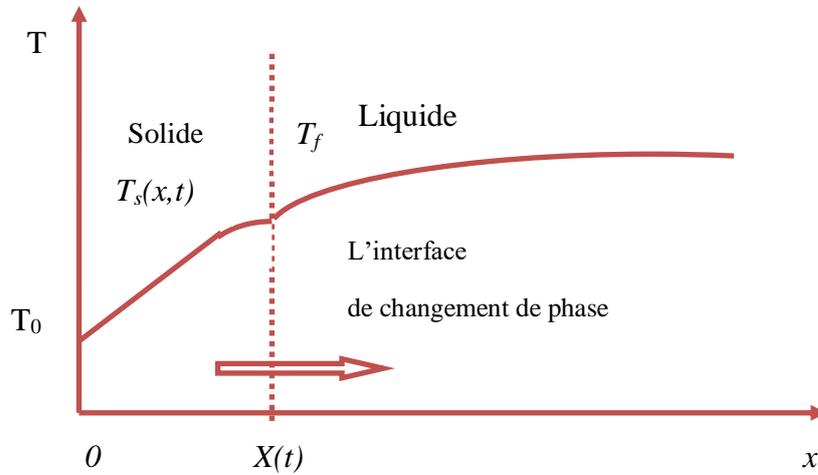
$$Q(p,t) = \frac{k_\ell (T_0 - T_m) \left( -\frac{e^{-\lambda'^2} p \sqrt{\lambda'^2}}{\lambda'^2} + 2e^{\frac{-p^2}{4\alpha_\ell \tau}} \sqrt{\alpha_\ell \tau} + p \sqrt{\pi} \left( \text{erf}(\lambda') - \text{erf}\left(\frac{p}{2\sqrt{\alpha_\ell \tau}}\right) \right) \right)}{\text{erf}(\lambda') \alpha_\ell \sqrt{\pi}} \quad (\text{II.11})$$

### III.2.2. Problème à deux phases

La solidification correspond au changement de phase de l'état liquide à l'état solide.

Le phénomène physique de problème de deux phases peut être décrit de la manière suivante [18,20] :

- Considérons un demi-espace de longueur infinie. La température initiale  $T_i$  sur tout le demi-espace est constant et est différente ou approximativement égale de la température de fusion  $T_f$ . La substance est présente sous forme liquide (ou solide). La température à la frontière gauche est soudainement abaissée (élevée) à une température  $T_0 < T_f$  ( $T_0 > T_f$ ) et il y a solidification (fusion) à partir de la position  $x = 0$  (figure II.3).
- L'appellation à deux phases résulte du fait que les températures sont inconnues dans les phases solide et liquide.



**Fig.II.3.** Problème de deux phases..

La formulation mathématique pour cette problème de solidification est:

Région solide :

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \alpha_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2}, \quad 0 < x < X(t), t > 0 \quad (\text{II.12})$$

Région liquide :

$$\frac{\partial T_\ell}{\partial t} = \alpha_\ell \frac{\partial^2 T_\ell}{\partial x^2}, \quad x > X(t), t > 0 \quad (\text{II.13})$$

Condition initiale :

$$T_\ell(x, 0) = T_i, \quad x \geq 0, t = 0 \quad (\text{II.14})$$

Condition aux limites :

$$T_s(0, t) = T_0, \quad x = 0, t > 0 \quad (\text{II.15})$$

Conditions à l'interface :

$$T_\ell [X(t)] = T_s [X(t)] = T_f, \quad x = X(t), t > 0 \quad (\text{II.16})$$

$$k_s \left( \frac{\partial T_s}{\partial x} \right)_{[X(t)]} - k_\ell \left( \frac{\partial T_\ell}{\partial x} \right)_{[X(t)]} = \rho L \frac{dX(t)}{dt}, x = X(t), t > 0 \quad (\text{II.17})$$

Le développement de la solution à ce problème est détaillé dans [17]. Les profils de température sont donnés par :

$$T_s(x,t) = T_0 + A \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{\alpha_s t}} \right) \quad (\text{II.18})$$

$$T_\ell(x,t) = T_i + B \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{\alpha_\ell t}} \right) \quad (\text{II.19})$$

La condition (II.17) conduit alors à :

$$T_0 + A \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{\alpha_s t}} \right) = T_i + B \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{\alpha_\ell t}} \right) = T_f$$

Cette relation doit être vérifiée pour tout les valeurs de t, on déduit que :  $X(t) = \lambda' \sqrt{\alpha_\ell t}$

Où  $\lambda'$  est constante. En tenant compte de cette forme de  $X(t)$ , l'équation (II.18) permet d'écrire :

$$\frac{k_s A e^{\frac{-\lambda'^2}{4\alpha_s}}}{\sqrt{\pi\alpha_s}} - \frac{k_\ell B e^{\frac{-\lambda'^2}{4\alpha_\ell}}}{\sqrt{\pi\alpha_\ell}} = L \frac{\rho \lambda'}{2} \quad (\text{II.20})$$

Les constantes A et B sont déterminées par les équations:

$$A = \frac{T_f - T_0}{\operatorname{erf} \left( \frac{\lambda'}{2\alpha_s} \right)} \quad \text{et} \quad B = \frac{T_f - T_i}{\operatorname{erfc} \left( \frac{\lambda'}{2\alpha_\ell} \right)}$$

Alors les profils de température sont donnés par :

$$T_s(x,t) = T_0 + A \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{\alpha_s t}} \right) \quad (\text{II.21})$$

Qui donne la température du solide et

$$T_\ell(x,t) = T_i + B \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{\alpha_\ell t}} \right) \quad (\text{II.22})$$

La position  $X(t)$  du front de changement de phase se calcule finalement par :

$$X(t) = \lambda' \sqrt{\alpha_\ell t} \quad (\text{II.23})$$

Le paramètre  $\lambda'$  est une racine de l'équation :

$$\frac{(T_0 - T_f) k_s e^{-\frac{\lambda'^2}{4\alpha_s}}}{(\alpha_s)^{\frac{1}{2}} \operatorname{erf} \left( \frac{\lambda'}{2\alpha_s^{\frac{1}{2}}} \right)} + \frac{(T_i - T_f) k_\ell e^{-\frac{\lambda'^2}{4\alpha_\ell}}}{(\alpha_\ell)^{\frac{1}{2}} \operatorname{erf} \left( \frac{\lambda'}{2\alpha_\ell^{\frac{1}{2}}} \right)} + \frac{\rho L \sqrt{\pi}}{2} = 0 \quad (\text{II.24})$$

Pour un problème de solidification, ou de l'équation :

$$\frac{(T_0 - T_f) k_\ell e^{-\frac{\lambda'^2}{4\alpha_\ell}}}{(\alpha_\ell)^{\frac{1}{2}} \operatorname{erf} \left( \frac{\lambda'}{2\alpha_\ell^{\frac{1}{2}}} \right)} + \frac{(T_i - T_f) k_s e^{-\frac{\lambda'^2}{4\alpha_s}}}{(\alpha_s)^{\frac{1}{2}} \operatorname{erf} \left( \frac{\lambda'}{2\alpha_s^{\frac{1}{2}}} \right)} - \frac{\rho L \lambda' \sqrt{\pi}}{2} = 0 \quad (\text{II.25})$$

### II.3. Problème de Neumann

Considérons un demi-espace de longueur infinie. Initialement la température sur tout le demi-espace est constante et est égale à  $T_f$ . Il s'agit d'un problème à une phase et la température du liquide (solide) reste égale à la température de fusion. On impose alors une condition de flux sur la frontière gauche du domaine et il y a solidification (ou fusion) à partir de la position  $x = 0$ .

La formulation mathématique pour un problème de solidification ou de fusion est la suivante [20] :

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \alpha_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} \quad 0 < x < X(t), t > 0 \quad (\text{II.26})$$

$$T(x, 0) = T_f \quad 0 < x < X(t), t > 0 \quad (\text{II.27})$$

$$-k_\ell \left( \frac{\partial T_\ell(0, t)}{\partial x} \right)_{[X(t)]} = q_w'' \quad (q_w'' \text{ est une constante}) \quad (\text{II.28})$$

$$T_\ell(x, t) = T_f \quad x > X(t), t > 0 \quad (\text{II.28})$$

$$T_\ell(X(t), t) = T_f \quad x = X(t), t > 0$$

(II.29)

$$k_\ell \left( \frac{\partial T_\ell}{\partial x} \right)_{[X(t)]} = \rho L \frac{dX(t)}{dt} \quad x = X(t), t > 0 \quad (\text{II.30})$$

Pour ce problème, le profil de température du solide (liquide) est donné par:

$$T_s(x, t) \approx T_f + \frac{-q_w'' x}{k_s} - \frac{(q_w'')^2 (x^2 + 2\alpha_s t)}{2k_s \alpha_s L \rho_\ell} + \frac{(q_w'')^4 (x^4 + 12\alpha_s^2 t + 12\alpha_s^2 t^2)}{12k_s \alpha_s^3 L^3 \rho_\ell^3} + \dots \quad (\text{II.31})$$

La position de l'interface est donnée par:

$$X(t) \approx \frac{|q_w''| t}{L \rho} - \frac{|q_w''|^3 t^2}{2\alpha_s L^3 \rho^3} + \frac{5|q_w''|^5 t^3}{6\alpha_s^2 L^5 \rho^5} - \frac{51|q_w''|^7 t^4}{24\alpha_s^3 L^7 \rho^7} + \frac{827|q_w''|^9 t^5}{120\alpha_s^4 L^9 \rho^9} + \dots \quad (\text{II.32})$$

## II.4. Exemple de calcul

Considérons un demi-espace de longueur infinie à une seule phase à partir d'un état isotherme ( $T = 0^\circ\text{C}$ ), les valeurs numériques des constantes utilisées pour ce cas sont les suivantes :

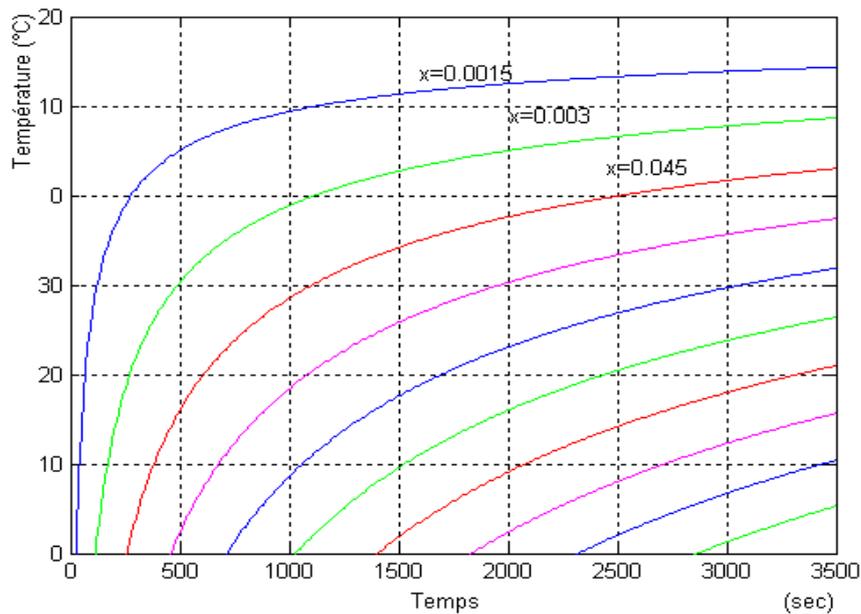
$$k = 0.6 \text{ W/mK}, \rho = 1000 \text{ kg/m}^3, C_p = 4180 \text{ J/kg}, T_f = 0^\circ\text{C}, T_0 = -30^\circ\text{C}, Ste = 0.375,$$

$$\lambda' = 0.369871.$$

### II.4.1. Le profil de la température

La résolution d'un problème de à changement de phase consiste à déterminer les champs de températures ainsi que la position de l'interface.

La figure (II.4) montre l'effet de la durée sur les profils de température. La température augmente sensiblement avec la durée de fusion.



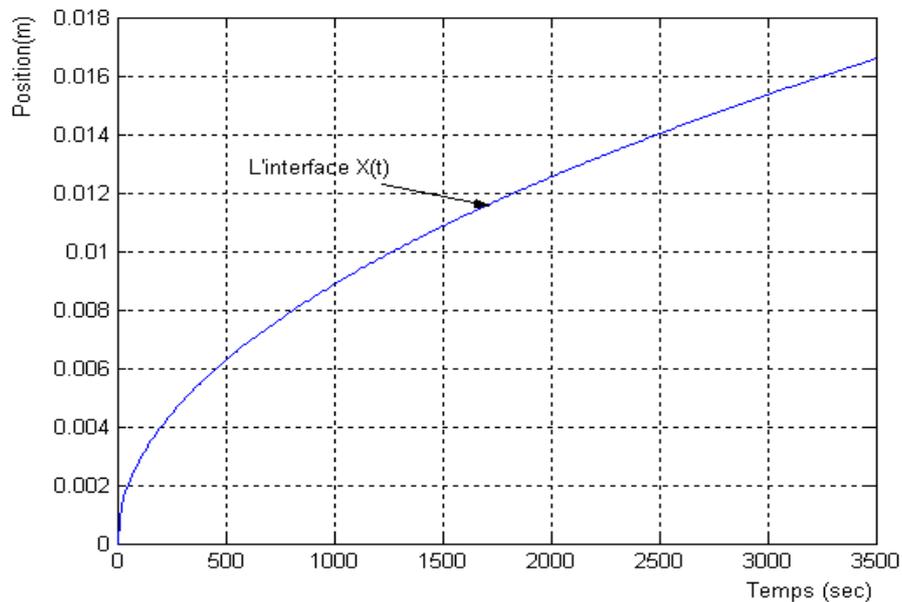
**Fig.II.4.** L'évolution de la température en fonction de temps.

### II.4.2. L'interface solide-liquide

Au cours du changement de phase liquide-solide d'un corps pur ou d'un mélange (cas des alliages), il y a existence d'une zone de transition entre les deux phases. A l'échelle microscopique, la zone de transition (ou interface) correspond à une discontinuité des propriétés physiques (figure II.5, II.6). A l'échelle macroscopique, elle peut être diffuse et continue comme c'est le cas pour la « zone pâteuse » lors de la solidification. On parlera de solidification par le passage de l'état liquide à l'état solide et de fusion par la transition s'effectuant de la phase solide à la phase liquide.

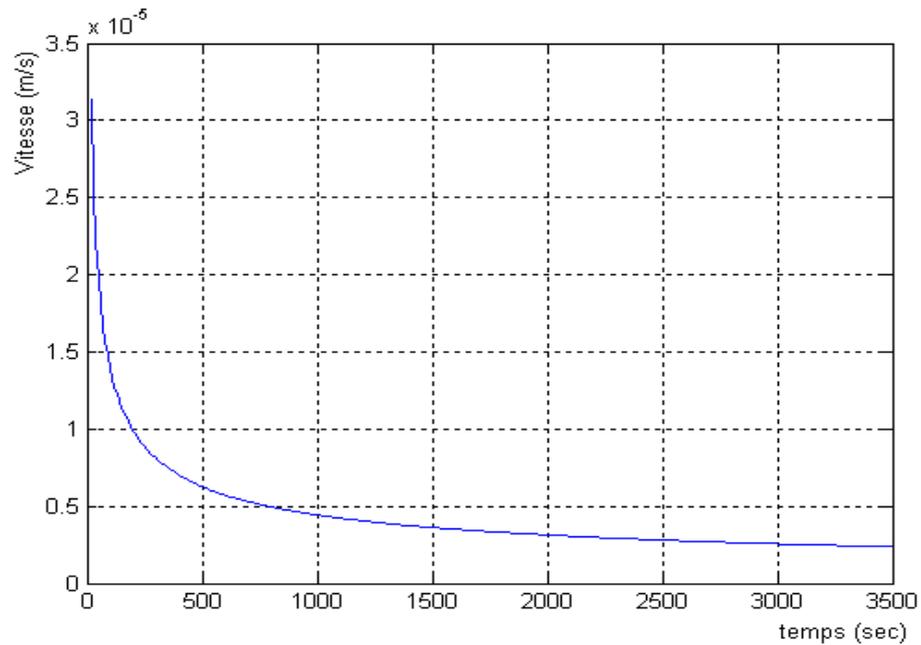
L'interface est à une température déterminée par les relations locales d'équilibre thermodynamique.

Le changement d'état donne lieu à un dégagement de chaleur pour la solidification (une absorption de chaleur dans le cas de la fusion) proportionnel à la vitesse de changement de phase et localisé à l'interface.



**Fig.II.5.** Position de l'interface

La figure (II.6) présente le profil de la vitesse de l'interface solide-liquide en fonction de temps. La vitesse de l'interface mobile reste faible et est lentement variable dans le temps.

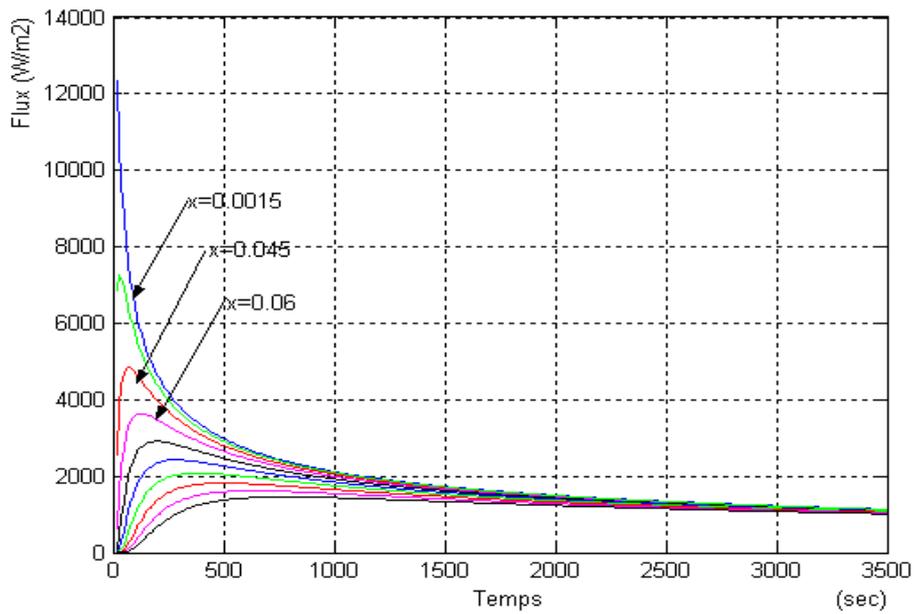


*Fig.II.6. Vitesse de l'interface solide-liquide.*

### II.4.3. Flux de chaleur

Le changement d'état donne lieu à un dégagement de chaleur pour la solidification (une absorption de chaleur dans le cas de la fusion) proportionnel à la vitesse de changement de phase et localisé à l'interface.

Nous avons étudié les profils de chaleur dans une gamme de temps de 0 à 3500s, avec des valeurs de  $x$ . La figure II.7 montre l'effet du temps sur les profils flux de chaleur.



**Fig.II.7.** Flux de chaleur.

## II.5. Conclusion

Les solutions analytiques existantes dans la littérature sont établies pour des configurations simples. En effet, les transferts thermiques considérés sont pour des milieux homogènes semi infinis dont les changements de phase sont isothermes.

Nous avons présenté le modèle retenu ainsi que les différentes hypothèses associées, il nous reste qu'à le résoudre. Les solutions analytiques étant établies pour des conditions aux limites de type Dirichlet et pour un milieu semi infini.

# Chapitre III

*Modélisation des MCP avec  
les conditions de Neumann*

### III.1. Introduction

Ce chapitre porte sur la description en 1D d'un schéma numérique de résolution d'équations aux dérivées partielles, la méthode de variable de pas de temps, cette schéma numérique est présenté en détail pour le traitement de discontinuités en 1D. La méthode est ici présentée pour le problème particulier de la résolution de l'équation de la chaleur pour des problèmes de changement de phase.

### III.2. Méthodes numériques

Comme il n'existe des solutions analytiques à l'équation de la chaleur que pour quelques cas en 1D, divers schémas numériques ont été utilisées pour résoudre cette équation. On peut regrouper ces schémas numériques en deux catégories principales [5,20] :

- les schémas numériques avec maillage fixe.
- les schémas numériques avec maillage mobile.

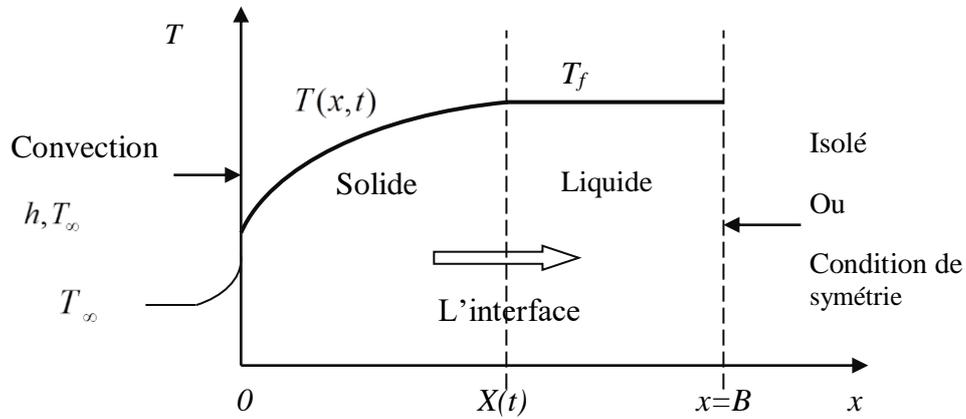
En ce qui concerne les schémas avec maillage fixe, la position de l'interface ne correspond pas nécessairement à un nœud en 1D. Dans ces schémas, on tient compte de la chaleur latente.

- En définissant une variable d'enthalpie totale  $H$  ou une variable d'enthalpie massique  $h$  pour ensuite déterminer la température à partir de celle-ci.
- Ou bien en remplaçant le coefficient de chaleur massique constant par un coefficient de chaleur massique qui est en fonction de la température (méthode de capacité thermique) et qui prend une valeur très élevée à la frontière liquide/solide.

Une description exhaustive de ces schémas numériques est faite par Voller [21]. Le désavantage majeur de ces schémas est la limitation de la précision lorsque l'interface est présente sous la forme d'une discontinuité [22,23]. Ces schémas numériques peuvent cependant être facilement utilisés lorsque le changement de phase se produit sur un intervalle de température plutôt qu'à une température donnée. Les schémas avec maillage fixe ont été utilisés efficacement pour des problèmes 1D et 2D.

### III.3. Modèle physique

Considérons la figure III.3, pour un problème de solidification à une seule phase [20].



**Fig.III.1.** La géométrie pour un problème de la solidification de seule phase

La formulation mathématique pour ce problème est :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad 0 \leq x \leq X(t), t > 0 \quad (\text{III.1})$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = h(T_\infty - T) \quad x = 0, t > 0 \quad (\text{III.2})$$

$$T(x, t) = T_f \quad x = X(t), t > 0 \quad (\text{III.3})$$

$$k \frac{\partial T}{\partial x} = \rho L \frac{dX(t)}{dt} \quad x = X(t), t > 0 \quad (\text{III.4})$$

### III.4. Approximation de différences finies

L'approximation de différences finies de l'équation (III.1) à (III.4) est décrite ci-dessous:

En écrive l'équation (III.1) sous la forme:

$$\frac{T_{i-1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i+1}^{n+1}}{(\Delta x)^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t_n} \quad (\text{III.5})$$

L'équation (III.5) est réarrangée comme suivant:

$$\left[ -r_n T_{i-1}^{n+1} + (1 + 2r_n) T_i^{n+1} - r_n T_{i+1}^{n+1} \right]^{(p)} = T_i^n \quad (\text{III.6})$$

Condition à la limite à  $x = 0$  :

$$\frac{\partial T}{\partial x} = HT - HT_\infty \quad \text{avec } H = h/k$$

Et alors discrétisé comme:  $\frac{T_1^{n+1} - T_0^{n+1}}{\Delta x} = HT_0^{n+1} - HT_\infty$

Ce résultat est réarrangé sous la forme

$$\left[ T_1^{n+1} - (1 + H\Delta x T_0^{n+1}) \right]^{(p)} = -H\Delta x T_\infty \quad (\text{III.7})$$

Condition de l'Interface : la condition de continuité de température à l'interface, l'équation. (III.3) est écrit comme:

$$T_{n+1}^{n+1} = T_f^* = \text{Température de fusion}$$

L'équation d'équilibre d'énergie de l'interface (III.4) est discrétisée comme :

$$\frac{T_{n+1}^{n+1} - T_n^{n+1}}{\Delta x} = \frac{\rho L}{k} \frac{\Delta x}{\Delta t_n} \quad (\text{III.8})$$

Qui est réarrangé dans la forme :

$$[\Delta t_n]^{(p+1)} = \frac{\rho L}{k} \left[ \frac{(\Delta x)^2}{T_f^* - T_n^{n+1}} \right]^{(p)} \quad (\text{III.9})$$

Depuis  $T_{n+1}^{n+1} = T_f^* =$  La température de fusion.

### III.5. L'algorithme de détermination le pas de temps

Nous décrivons maintenant l'algorithme pour la détermination le pas de temps  $\Delta t_n$ , l'interface déplace exactement une distance  $\Delta x$ .

Une expression explicite développée pour de calcul de premier pas de temps  $\Delta t_0$  comme suit [20] :

Donne  $n = 0$  dans l'équation (III.7) et (III.9) et éliminez  $T_0^1$  et noter que  $T_1^1 = T_f^*$ .

$$\Delta t_0 = \frac{\rho L \Delta x (1 + H \Delta x)}{k H (T_f^* - T_\infty)} \quad (\text{III.10})$$

Avec  $\Delta t_0 \equiv t_1 - t_0$ .

Pas de temps  $\Delta t_1$ : nous ajoutons  $i=1, n=1$  dans l'équation (III.6) et note que  $T_1^1 = T_2^2 = T_f^*$ :

$$\left[ -r_1 T_0^2 + (1 + 2r_1) T_1^2 \right]^{(p)} = (1 + r_1^{(p)}) T_f^* \quad (\text{III.12})$$

$$\left[ -(1 + H \Delta x) T_0^2 + T_1^2 \right]^{(p)} = -H \Delta x T_\infty \quad (\text{III.13})$$

---

Pas de temps  $\Delta t_n$  : les résultats ci-dessus sont maintenant utilisés dans l'algorithme suivant pour calculer le pas de temps  $\Delta t_n$  chaque niveau de temps  $t_n$ ,  $n = 2, 3, \dots$

- a) Le pas de temps  $\Delta t_n$  au niveau de temps  $t_n$ ,  $n = 2, 3, \dots$  sont calculés par itération. Une valeur de conjecture  $\Delta t_n^{(0)}$  est choisie comme:

$$\Delta t_n^{(0)} = \Delta t_{n-1}, n = 2, 3, \dots \quad (\text{III.14})$$

Le système des équations de différences finis (III.5), (III.7), ainsi que la condition (III.8) sont résolus pour  $i = 2, 3, \dots, n$  en mettant  $p = 0$  et une première évaluation est obtenue pour les températures nodales  $[T_i^{n+1}]^{(0)}$  pour  $i = 1, 2, \dots, n$

Nous notons que le système des équations est tri-diagonal, par conséquent aisément résolu.

- b) Les valeurs de  $[T_i^{n+1}]^{(0)}$  obtenu à partir de l'équation. (III.14) sont introduits dans l'équation (III.9) pour  $p = 0$  et une première évaluation pour le pas de temps  $\Delta t_n^{(1)}$  est déterminée.
- c)  $\Delta t_n^{(1)}$  est utilisé comme valeur de conjecture et l'étape (a), (b) sont répétées pour calculer une deuxième évaluation pour l'étape de temps  $\Delta t_n^{(2)}$ .
- d) Les étapes (a), (b) et (c) sont répétées jusqu'à ce que la différence entre deux pas de temps consécutive  $|\Delta t_n^{(p+1)} - \Delta t_n^{(p)}|$  satisfasse le critère indiqué d'une convergence.

### III.6. Exemple de calcul

Considérez un problème de solidification d'une seule phase pour un liquide initialement à la température de fusion  $T_f^*$ , confiné à la région  $0 \leq x \leq 1$ . La solidification a lieu en raison du refroidissement convectif sur la surface de frontière  $x = 0$ . Tandis que la surface de frontière à  $x = 1$  est isolée.

On donne la formulation mathématique de ce problème sous la forme adimensionnels comme suit :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{dans } 0 < x < S(t) \quad t > 0,$$

Conditions aux limites :

$$-\frac{\partial T}{\partial x} + 10T = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad x = 1, t > 0$$

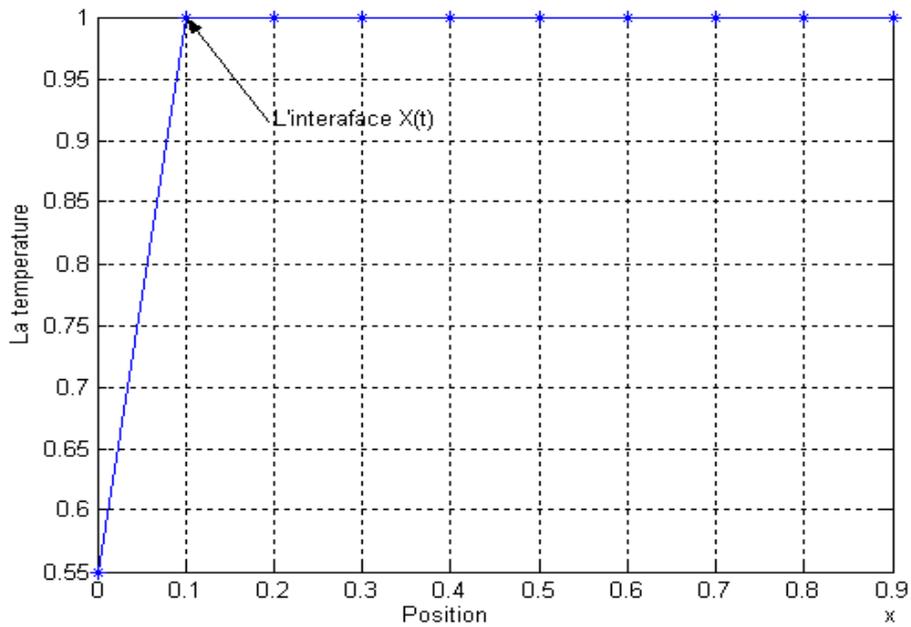
Condition de l'interface:

$$T(x, t) = 1 \quad \text{à } x = S(t), t > 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{dS(t)}{dt} \quad \text{à } x = S(t), t > 0$$

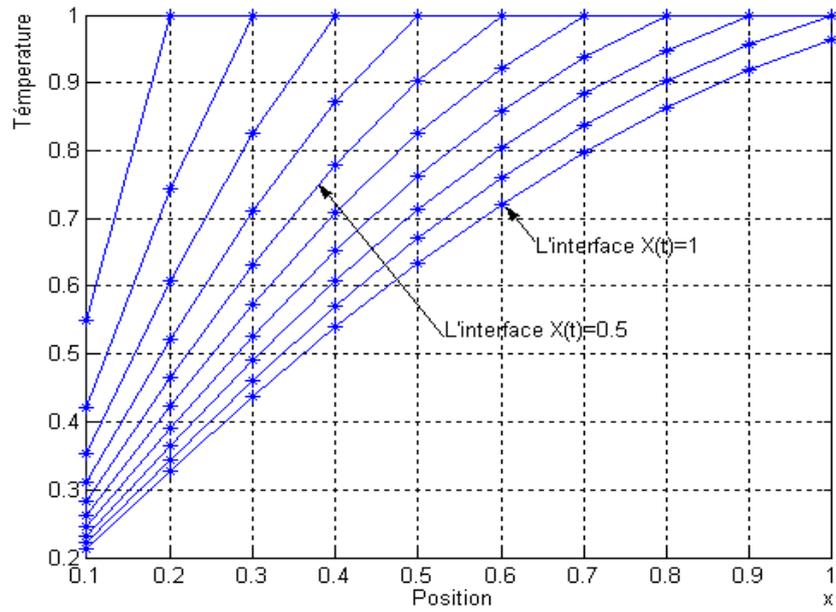
$$T_f^* = 1, H = 10, T_\infty = 0, \alpha = 1, \frac{\rho L}{k} = 1.$$

Le pas d'espace est choisi comme  $\Delta x = 0.1$ .

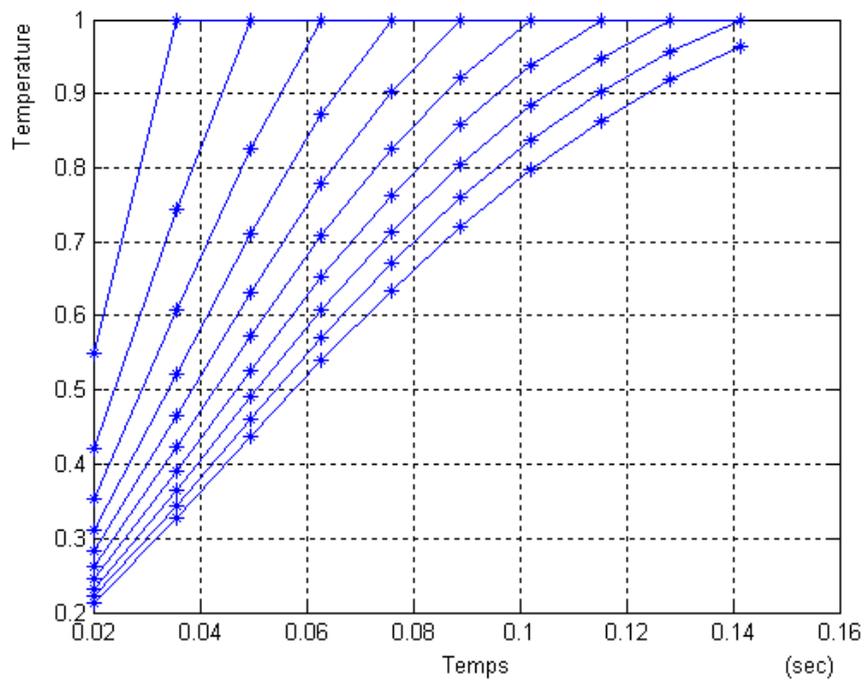


**Fig.III.2.** L'évolution de la température pour  $X(t) = 0.1$

La solidification commence à la surface de frontière  $x=0$  à cause de la convection et les mouvements de l'interface solide-liquide de  $x=0$  au  $x=0.5$  dans un intervalle de temps  $\Delta t_s$  alors cette partie est solidifiée et l'autre partie entre  $x=0.5$  et  $x=1$  est liquide comme illustré dans la figure (comme titre d'exemple). Alors en montre dans ce simple exemple que l'interface solide-liquide est en mouvement.



**Fig.III.5.** L'évolution de la température pour  $X(t)$



**Fig.III.6.** L'évolution de la température

La figure III.6 présente l'évolution de la température au cours de temps et position pour quelque valeur de la position de l'interface solide liquide.

Les courbes des solutions analytiques et du modèle ont les mêmes allures au cours du temps. Ainsi, le modèle prédit convenablement le champ de température lors du phénomène de la solidification monophasée.

On observe une conclusion similaire que pour le fusion monophasée, c'est-à-dire que le modèle est capable de décrire le champ de température au cours du temps.

## Conclusion générale

Des solutions analytiques et méthode numérique ont été mises au point pour simuler le problème de changement de phase solide-liquide à 1D. La méthode de pas de temps de traiter le transfert de chaleur par conduction dans les deux phases solide et liquide. En tout temps, on peut prédire:

- L'évolution de la température;

La température augmente sensiblement avec la durée de fusion.

L'interface est à une température déterminée par les relations locales d'équilibre thermodynamique.

Le changement d'état donne lieu à un dégagement de chaleur pour la solidification (une absorption de chaleur dans le cas de la fusion) proportionnel à la vitesse de changement de phase et localisé à l'interface.

- Les positions exactes de l'interface solide-liquide;

Cette méthode offre plusieurs avantages dont : la plus grande facilité de trouver exactement la position de l'interface solide-liquide fonction du temps et de déterminer la vitesse de déplacement de l'interface sans avoir besoin d'utiliser l'expression de la condition à l'interface solide-liquide.

La vitesse de l'interface mobile reste faible et est lentement variable dans le temps.

Les solutions analytiques existantes dans la littérature sont établies pour des configurations simples. En effet, les transferts thermiques considérés sont pour des milieux homogènes semi infinis dont les changements de phase sont isothermes.

Nous avons présenté le modèle retenu ainsi que les différentes hypothèses associées, il nous reste qu'à le résoudre. Les solutions analytiques étant établies pour des conditions aux limites de type Dirichlet et pour un milieu semi infini.

Une conclusion similaire que pour le fusion monophasée, c'est-à-dire que le modèle est capable de décrire le champ de température au cours du temps.

## Références bibliographiques

- [1] G. Med Amine, «Etude d'un stockage thermique mixte (chaleur sensible et chaleur latente) », mémoire de master, Faculté de Blida (2014)
- [2] B. Sara, L. Samiha, «Simulation numérique du stockage thermique par chaleur latente dans une capsule sphérique », mémoire de master, Faculté de boumerdes, (2016)
- [3] B. Meriem, «Simulation numérique du stockage thermique par chaleur latente dans une capsule Elliptique», mémoire de master, Université de Boumerdes , (2016)
- [4] G. Abbassi, «Etude numérique des transferts de chaleur et de masse lors de la fusion d'un matériau à changement de phase », mémoire de master, Université Oum El bouaghi, (2018)
- [5] G.Stéphane , «Contribution à l'Étude des Parois Complexes intégrant des Matériaux à Changement de Phase : Modélisation, Expérimentation et Évaluation de la performance énergétique globale », Thèse de doctorat, Université de La Réunion,(2013)
- [6] S.Adél , «Stockage de chaleur dans les Matériaux à Changement de Phase », Thèse de doctorat, Université de la grenoble alpes (2015)
- [7] <http://www.alloprof.qc.ca/BV/Pages/s1009.aspx>
- [8] <http://www.alloprof.qc.ca/BV/pages/s1578.aspx>
- [9] [http://www.thermique-du-batiment.wikibis.com/materiau\\_a\\_changement\\_de\\_phase.php](http://www.thermique-du-batiment.wikibis.com/materiau_a_changement_de_phase.php)
- [10] Serge Ekomy Ango. «. Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase », Thèse de doctorat, Génie des procédés. Arts et Métiers Paris Tech, (2011).
- [11] B.Julien, «Intégration des matériaux a changement de phase comme système de régulation dynamique en rénovation THERMIQUE », Thèse de doctorat, Université de Lyon,( 2012).
- [12] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Paraffine>
- [13] A.Yousfi, «Etude thermique d'un mur de bâtiment composé d'un matériau à changement de phase », mémoire de master, Université de Tébessa (2018).
- [14] Edina Milisic , «Modelling of energy storage using phase-change materials (PCM materials)», memoir de master, Norwegian University, July (2013).
- A.Manuela, « Dépôt de matériaux à changement de phase par PE-MOCVD à injection liquide pulsée pour des applications mémoires PCRAM. », Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, Français, (2015).
- [15]

## **Références bibliographiques**

- [16] <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-eutectique-3514/>
- [17] D.Sarra, «Développement de nouveaux bétons "accumulateurs d'énergie" : investigation expérimentale, probabiliste et numérique du comportement thermique », Thèse de doctorat, Université Paris-Est, (2015).
- [18] T. Messai, « Simulation du transfert de chaleur lors du changement de phase Solide-Liquide », Mémoire de magistère, Université de Biskra , (2010).
- [19] S. Ghosh and S. Moorthy. *An arbitrary lagrangian-eulerian finite-element model for heat transfer analysis of solidification processes. Numerical Heat Transfer, Part B*, 23:327-350, (1993).
- [20] G. Bell. *On the performance of the enthalpy method. International Journal of Heat and Mass Transfer*, 25:587-589, (1982).
- [21] V. Voller and C.R. Swaminathan. *Fixed grid techniques for phase change problems: A review. International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 30:875-898, (1990).

# نمذجة ومحاكاة مواد تغيير الطور

## ملخص

رأينا في هذا العمل أنه من الضروري اختيار وحدة تخزين الطاقة الحرارية. من بين الأنواع الثلاثة لوحات التخزين المقدمة، يجب استخدام نوعين فقط، تخزين حراري معقول وتخزين حراري كامن. في الواقع، في حالة تغيير الطور الصلب / السائل، بالنسبة لكمية معينة من الطاقة المخزنة ومواد تخزين معينة، يتطلب التخزين بالحرارة الكامنة حجمًا أقل من التخزين بالحرارة المعقولة لأن الحرارة الكامنة أكثر بكثير مهمة من القدرات الحرارية للمراحل الصلبة والسائلة. قدمنا نمذجة تغيرات المرحلة الصلبة-السائلة من خلال تقديم صياغة مشكلة ستيفان وحلها التحليلي في  $D 1$  فقط مع حالة  $Dirichlet$ ، و نمذجة مشكلة تغيير الطور في  $D 1$  مع حالة  $Neumann$ .

**الكلمات المفتاحية:**  $MCP$ ، مشكلة ستيفان، التخزين الكامن، التخزين الحساس.

# Modeling and simulation of phase change materials

## Abstract

We have seen that it is necessary to choose a thermal energy storage unit. Among the three types of storage units presented, only two should be selected, sensible heat storage and latent heat storage. Indeed, in the case of the solid / liquid phase change, for a given amount of stored energy and a given storage material, storage by latent heat requires less volume than storage by sensible heat because the latent heat is much more important than the heat capacities of the solid and liquid phases.

We will introduce the modeling of liquid-solid phase changes by presenting the formulation of Stefan problem and its analytical solution in 1D only with the Dirichlet condition, we will develop a modeling of phase change problem in 1D with the Neumann condition.

**Keywords:** MCP, Stefan problem, latent storage, sensitive storage..

## ***Résumé***

Nous avons pu constater dans ce travail qu'il est nécessaire de choisir une unité de stockage de l'énergie thermique. Parmi les trois types d'unités de stockage présentés, uniquement deux doivent être retenus, le stockage par chaleur sensible et le stockage par chaleur latente. En effet, dans le cas du changement de phase solide/liquide, pour une quantité d'énergie stockée et un matériau de stockage donnés, le stockage par chaleur latente requiert moins de volume que le stockage par chaleur sensible car la chaleur latente est beaucoup plus importante que les capacités calorifiques des phases solide et liquide.

Ce travail présentée la modélisation des changements de phase liquide-solide en présentant la formulation du problème de Stefan et sa solution analytique en 1D seulement avec la condition de Dirichlet, est développée une modélisation de problème de changement de phase en 1D avec la condition de Neumann.

***Mots clés*** : MCP, Problème de Stefan, stockage latente, stockage sensible.