



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

N° : DP202303ME

**Université 20 août 1955-Skikda**

Faculté des Sciences

Département de Physique

## **Mémoire de Master**

**Filière :** Physique

**Spécialité :**

**Thème**

---

**Etude énergétique d'un capteur solaire stockeur utilisant un nanofluide à changement de phase**

---

Présenté par :

**Amel TRENE**

Soutenu le :26/06/2023 devant le jury composé de :

F. Mebarek Oudina	Prof.	Université de Skikda	Président
K. Bourrich	M.A.A	Université de Skikda	Rapporteur
T. Chelirem	M.A.A	Université de Skikda	Examineur

Année Universitaire : 2022/2023



# *REMERCIEMENTS*

### *Remerciements*

*Louange à Allah par la grâce du qui les bonnes choses se réalisent.*

*Je tiens à remercier tout d'abord mes très chers parents.*

*Je remercie mon encadreur*

*Madame Bourrich Kawthar pour la qualité du sujet*

*Son support et les orientations durant toute la réalisation de ce travail.*

*Je remercie tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.*

*Trene Amel*

# *Dédicace*

*Dédicaces*

*Avant tout, je tiens à remercier le bon dieu,*

*Et l'unique qui m'a offert le*

*Courage et la volonté nécessaire pour affronter*

*Les différents moments de la vie,*

*Je dédie ce modeste travail A ma mère Noura.*

*A mon père Rabah.*

*A mon fiancé M.A.*

*A mes frères Abd essalem et Abd elhak*

*A ma nièce nourhane.*

*A mes chères amis Latreche Wissem et Saadellah Kawtar.*

*A mes amis et mes collègues de la promotion 2023*

*« Physique Énergétique ».*

*Trene Amel*

اللهم لا تجعلني أصاب بالغرور إذا نجحت، و لا باليأس إذا أخفقت و ذكرني أن  
الإخفاق هو التجربة التي تسبق النجاح

اللهم إذ أعطيتني نجاحا فلا تأخذ مني تواضعي و  
إذا أعطيتني تواضعا لا تأخذ اعترازي بكرامتي ، اللهم أمين

Nomenclature

Liste de figures

Liste de tableaux

Introduction générale

## Chapitre 01 : Etude bibliographique

1.1. Introduction

1.2. Principe de fonctionnement d'un stockage par chaleur latente

1.3. Les différents types de matériaux à changement de phase

1.3.1. MCP pour les applications solaires

1.3.2. MCP : exemples de composés

1.3.3. Qualités requises pour les MCP

1.3.4. Comparaison entre MCP

1.5. Le stockage d'énergie thermique dans les MCPs

## Chapitre 02 : Modélisation Mathématique et numérique

2.1. Introduction

2.2. Description du problème

2.3. Géométrie du circuit échangeur

2.4. Hypothèse prise en considération pour le capteur solaire

2.5. Mode de charge

2.5.1. Distribution de la température dans l'ailette

2.5.2. Distribution de la température dans le MCP solide

2.5.3. Distribution de la température suivant la direction de l'écoulement de l'eau

2.6. Mode de décharge

2.6.1. Distribution de la température dans l'ailette

2.6.2. Distribution de la température dans le MCP solide

2.7. Solution des équations

2.7.1. Transfert thermique tout au long de l'ailette

2.7.2. Transfert thermique dans le MCP

2.7.3. Distribution de la température dans le sens de l'écoulement de l'eau

Chapitre 03 : Résultats et discussion

3.1. Introduction

3.2. Influence de la variation de  $h_c$  sur le facteur d'efficacité du capteur stockeur

3.3. Influence du mode d'écoulement sur le facteur d'efficacité du capteur stockeur

3.3.1. Ecoulement laminaire

3.3.2. Ecoulement turbulent

3.3.3. Ecoulement très turbulent

3.4. Comparaison entre le mode charge et le mode de décharge

3.5. Conclusion

Conclusion générale

Références

Résumé



## Liste des figures

Figure 1.1 : Le NANO-MCP à l'état solide.

Figure 1.2 : Le NANO-MCP à l'état liquide.

Figure 1.3 : Principe de fonctionnement d'un stockage par chaleur latente.

Figure 1.4 : Changement d'état présente dans un diagramme température-enthalpie.

Figure 1.5 : Famille de matériaux des MCPs.

Figure 2.1 : Coupe de l'absorbeur.

Figure 2.2 : Bilan énergétique sur l'élément d'ailette pendant le mode de charge.

Figure 2.3 : Bilan énergétique dans un élément de tube.

Figure 2.4 : Bilan énergétique sur l'élément d'ailette pendant le mode de décharge.

Figure 3.1 : Variation du facteur d'efficacité du collecteur stockage en fonction de l'emplacement des tubes  $W$  pour différentes valeurs de  $K\delta$  avec  $h_{fi} = 100W/m^2.K$  et

a)  $h_C = 15W/m^2.K$ , b)  $h_C = 45W/m^2.K$ , c)  $h_C = 75W/m^2.K$ , d)  $h_C = 90W/m^2.K$ .

Figure 3.2: Variation du facteur d'efficacité du collecteur stockage en fonction de l'emplacement des tubes  $W$  pour différentes valeurs de  $K\delta$  avec  $h_{fi} = 300W/m^2.K$  et

a)  $h_C = 15W/m^2.K$ , b)  $h_C = 30W/m^2.K$ , c)  $h_C = 60W/m^2.K$ , d)  $h_C = 90W/m^2.K$ .

Figure 3.3: Variation du facteur d'efficacité du collecteur stockage en fonction de l'emplacement des tubes  $W$  pour différentes valeurs de  $K\delta$  avec  $h_{fi} = 1000W/m^2.K$  et

a)  $h_C = 15W/m^2.K$ , b)  $h_C = 30W/m^2.K$ , c)  $h_C = 60W/m^2.K$ , d)  $h_C = 90W/m^2.K$ .

Figure 3.4: Variation du facteur d'efficacité du collecteur stockage en fonction de l'emplacement des tubes  $W$  pour différents modes de débit avec  $h_C = 15W/m^2.K$  ; modes de charge et décharge.

## Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Qualités requises pour les différentes MCP.

Tableau 1.2 : Propriétés thermiques de certains MCP.

## Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
$k$	La conductivité thermique de l'absorbeur	$W.m^{-1}.K^{-1}$
$C_p$	La capacité thermique spécifique de l'eau	-
$S$	L'énergie radiative incidente sur la surface absorbante	$J m^{-2}$
$A_c$	La surface de capteur	$m^2$
$T_a$	La température ambiante	°C ou K
$T_m$	La température de fusion du MCP	°C ou K
$T_S$	La température du MCP solide	°C ou K
$T_L$	La température du MCP liquide	°C ou K
$T_{fe}$	La température de l'eau entre le tube	°C ou K
$T_{fs}$	La température de l'eau sortie le tube	°C ou K
$U_{t1}$	Le coefficient global de perte thermique de l'absorbeur vers l'ambiance pendant le mode de charge	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$U_{t2}$	Le coefficient global de perte thermique de l'absorbeur vers l'ambiance pendant le mode de décharge	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$U_b$	Le coefficient global de perte thermique des de la cuve vers l'ambiance	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$T$	La distribution de température entre deux tubes	°C ou K
$h_c$	Le coefficient de transfert thermique entre l'absorbeur et le MCP	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$h_s$	Le coefficient de transfert thermique à l'interface liquide-solide	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$h_l$	Le coefficient de transfert thermique de chaleur	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$h_{ac}$	La conductance d'air entre l'absorbeur et le MCP solide	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$H$	La chaleur latente de fusion du MCP	$J.kg^{-1}$
$q_{ait}$	Quantité de chaleur	w
$q_{tube}$	Quantité de chaleur	w

## NOMENCLATURE

$q_u$	Quantité de chaleur	w
F	Facteur d'efficacité d'ailette	-
$F_R$	Facteur de conductance du capteur	-
$\dot{F}$	Facteur d'efficacité de capteur	-
$\dot{m}$	Le débit massique par unité de surface	
$k_b$	La conductivité thermique de lien	W/mk
$C_s$	Conductibilité du lien	
$\Psi_L$	La valeur de $\Psi$ pour $T = T_L$	
$k_s$	La conductivité thermique du MCP solide	W/mk
Lettre grecques	Désignation	Unité
$\eta$	Rendement	-
$\delta$	L'épaisseur de l'absorbeur	$kJ.kg^{-1}.K^{-1}$
$\rho$	Densité du MCP	$kg.m^{-3}$
$X_m$	Epaisseur de la zone fondue pendant le mode de charge	m
$y_m$	Epaisseur de la zone fondue pendant le mode de décharge	m
Indice	Désignation	
f	Fluide calorifique	
MCP	Matériau à changement de phase	
$l$	Liquide	
$s$	Solide	
$n$	Nombre de période	
$n_t$	Nombre de tube	

*ail*

Ailette



INTRODUCTION GENERALE

## Introduction générale

Dans le but de perfectionner une machine frigorifique solaire, on a suggéré de la relier à un capteur solaire qui sert aussi comme unité de stockage. La réduction de la taille de ces systèmes avec une grande densité d'énergie stockée n'est possible que par l'utilisation de la chaleur latente de changement de phase [1].

Une analyse thermique a été développée pour ce genre de capteur stockeur pour des conditions d'états quasi-régulières en utilisant des matériaux à changement de phase (MCP) comme substance d'emménagement de chaleur, d'où on a obtenu des nouvelles équations de Hottel-Whillier-Bliss (HWB) pour les capteurs plans performants aux systèmes qui servent à stocker l'énergie thermique.

BUDDHI et al. [2] ont conçu et testé un capteur stockeur solaire dans des conditions variables de paramètres de conception en utilisant un acide stéarique comme MCP. Si toutefois, on utilise le MCP dans les capteurs plans comme un milieu de stockage, le transfert thermique devient plus compliqué parce que l'emploi d'un MCP amène le système dans des conditions d'états quasi-régulières, et il n'y a aucune possibilité pour employer les équations de HWB sous leur ancienne forme pour la caractérisation du système.

Les équations de transfert thermique correspondantes à ces capteurs stockeurs prennent maintenant la forme du problème de Stefan pour le déplacement des frontières du transfert thermique.

Pour perfectionner ce système de stockage on a appliqué les mêmes équations que BANSAL et BUDDHI [3] en utilisant une paraffine comme MCP [4] ; les propriétés thermo-physiques de ce MCP satisfont les critères qu'on doit tenir compte pour choisir une telle substance d'emménagement de chaleur [5].

## Introduction générale

Dans le but de perfectionner une machine frigorifique solaire, on a suggéré de la relier à un capteur solaire qui sert aussi comme unité de stockage. La réduction de la taille de ces systèmes avec une grande densité d'énergie stockée n'est possible que par l'utilisation de la chaleur latente de changement de phase.

Une analyse thermique a été développée pour ce genre de capteur stockeur pour des conditions d'états quasi-régulières en utilisant des matériaux à changement de phase (MCP) comme substance d'emmagasinement de chaleur, d'où on a obtenu des nouvelles équations de Hottel-Whillier-Bliss (HWB) [1] pour les capteurs plans performants aux systèmes qui servent à stocker l'énergie thermique.

BUDDHI et al. [2] ont conçu et testé un capteur stockeur solaire dans des conditions variables de paramètres de conception en utilisant un acide stéarique comme MCP. Si toutefois, on utilise le NANO-MCP dans les capteurs plans comme un milieu de stockage, le transfert thermique devient plus compliqué parce que l'emploi d'un NANO-MCP amène le système dans des conditions d'états quasi-régulières, et il n'y a aucune possibilité pour employer les équations de HWB sous leur ancienne forme pour la caractérisation du système.

Les équations de transfert thermique correspondantes à ces capteurs stockeurs prennent maintenant la forme du problème de Stefan pour le déplacement des frontières du transfert thermique.

Pour perfectionner ce système de stockage on a appliqué les mêmes équations que BANSAL et BUDDHI [1] en utilisant une paraffine comme MCP [3] ; les propriétés thermo-physiques de ce NANO-MCP satisfont les critères qu'on doit tenir compte pour choisir une telle substance d'emmagasinement de chaleur [5].



## CHAPITRE 01 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

## 1.1 Introduction :

L'étude des matériaux à changement de phase est une application directe de la thermodynamique. Son principe repose sur l'exploitation de la chaleur latente de fusion de certains matériaux. Souvent il s'agit de paraffine, sous forme de billes. Concrètement, cette dernière est prise en sandwich entre deux plaques d'un matériau étanche (par exemple de l'aluminium) [3].

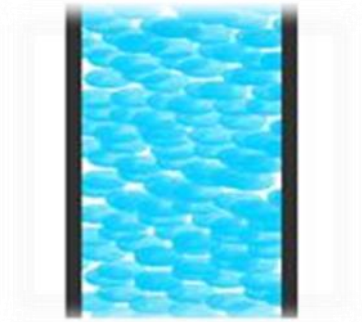


Figure 1.1 : Le MCP à l'état solide [1].

Été comme hiver, le matériau à changement de phase va permettre de lisser les variations de température. Cela signifie que les pics (de chaleur et de froid) seront fortement réduits. Ceci vient du fait que le MCP va alternativement emmagasiner et restituer de l'énergie (sous forme de chaleur). En hiver, lorsque le soleil entre par les ouvertures, le matériau à changement de phase va se liquéfier [6].

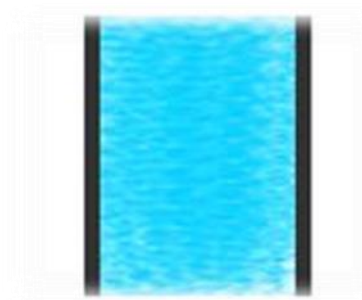


Figure 1.2 : Le MCP à l'état liquide [1].

Il va ainsi absorber de l'énergie sous forme latente, sans que sa température n'augmente (la liquéfaction est endothermique, elle absorbe de l'énergie). Lorsque le soleil se couchera, la température redescendra, de ce fait, le MCP va se re-solidifier. Cette transformation est exothermique, ce qui signifie qu'elle rejette de l'énergie (de la chaleur) [6]. Le chauffage principal (chaudière, radiateurs électriques, ...) sera donc moins sollicité, et des économies d'énergie seront réalisées [3].

## 1.2. Principe de fonctionnement d'un stockage par chaleur latente :

La chaleur latente est la quantité d'énergie qui est nécessaire pour faire passer un corps dans son état supérieur. Par exemple de l'état solide vers liquide, ou liquide vers gazeux. Le graphe suivant permet de bien différencier la chaleur sensible de la chaleur latente [7].

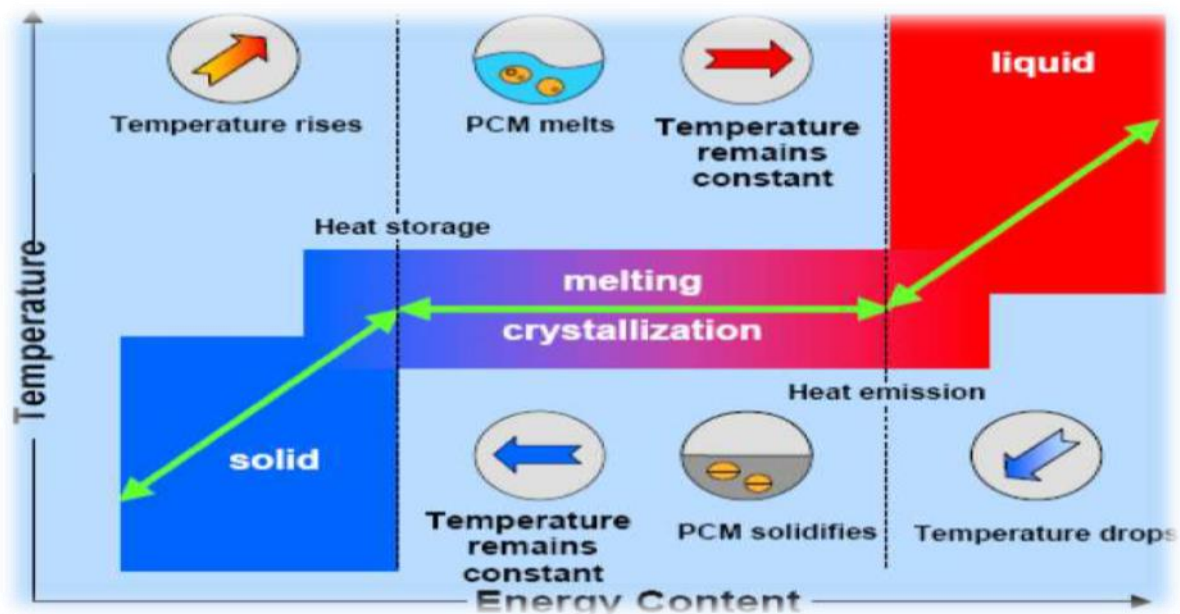


Figure 1.3 : Principe de fonctionnement d'un stockage par chaleur latente [1].

Le stockage par chaleur latente présente deux avantages par rapport à la chaleur sensible (Dumas et PY, 2009) :

- le stockage par chaleur latente consiste à exploiter la quantité d'énergie engagée lors du changement d'état d'un corps. Ce changement d'état s'opère à température constante, donc il permet de régler la température du milieu de changement de phase (exemple habitat).
- une autre différence entre le mode de stockage par chaleur sensible et latente est due aux très fortes capacités de stockage du latente par rapport à sensible.

Pour analyser le processus de fusion d'un corps, prenons le cas d'un solide à température  $T_1$  ( $T_1$  est inférieure à la température de fusion  $T_f$ ) : pour qu'il atteigne sa température de fusion, il faut apporter de l'énergie. L'énergie est donc stockée par ce matériau sous forme de chaleur sensible et lorsque la  $T_f$  est atteinte, le matériau change de l'état solide à l'état liquide. Ce

changement d'état se fait à température constante et l'énergie apportée par l'extérieur sert alors à rompre les liaisons existantes dans le solide. Une fois que la matière est entièrement transformée de l'état solide à l'état liquide et si le système continue à recevoir de l'énergie, alors celle-ci sera de nouveau cumulée par le matériau sous forme de chaleur sensible. Le bilan des transformations entre  $T_1$  (température initiale du solide) et  $T_2$  (température finale du liquide), en faisant l'hypothèse que les chaleurs spécifiques du matériau en phase solide et liquide ( $c^s$  et  $c^l$ ) sont indépendantes des températures [1], est donc écrit par :

$$\Delta H = H_2 - H_1 = m \cdot c^s (T_f - T_1) + m \cdot L_f(T_f) + m \cdot c^l (T_2 - T_f) \quad (1)$$

$$L_f(T_f) = h^l(T_f) - h^s(T_f) > 0 \quad (2)$$

Où  $h^l(T_f)$  et  $h^s(T_f)$  sont les enthalpies massiques du liquide et du solide à la température de fusion  $T_f$ ,  $L_f(T_f)$  est la chaleur latente de fusion. Le changement d'état permet donc de faire un stockage de chaleur à température constante ou quasi constante, la température se stabilisant à une température proche de la température du matériau à changement de phase (MCP) sélectionné [25]. La Figure 1.1. Représente cette transformation.

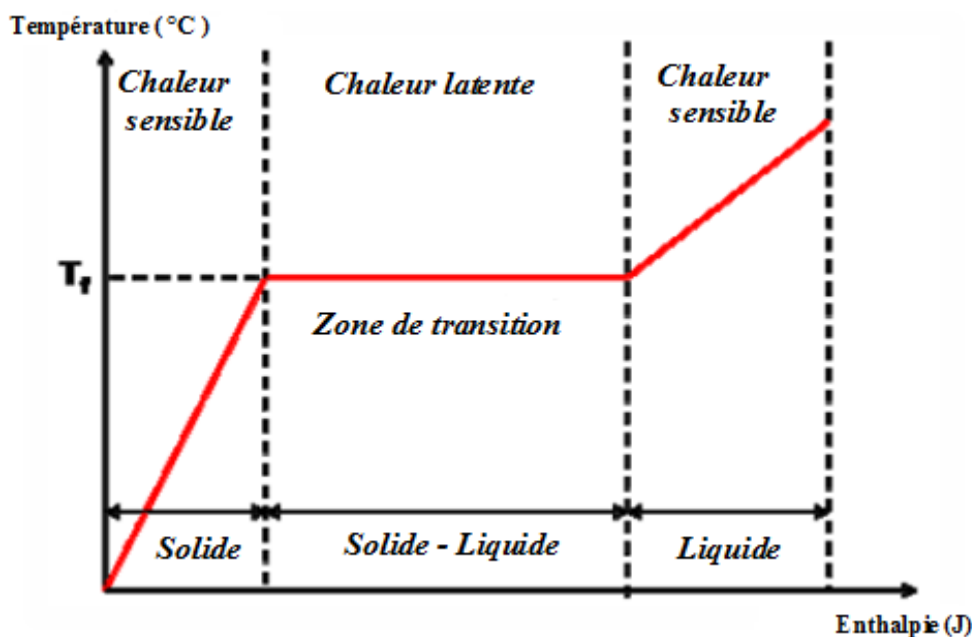


Figure 1.4: Changement d'état un diagramme température-enthalpie [1]

**Le processus de stockage par chaleur latente se divise en deux phases principales :** la charge et la décharge. Pendant la phase de charge, de l'énergie thermique est fournie au matériau à changement de phase pour faire fondre ou liquéfier la substance. L'énergie est stockée sous forme de chaleur latente lors du changement d'état, sans que la température du matériau ne varie

sensiblement. Ce stockage peut être réalisé à partir de sources d'énergie renouvelables telles que le solaire, la biomasse, etc. Lors de la phase de décharge, lorsque l'énergie thermique est requise, le matériau à changement de phase est refroidi ou solidifié, libérant ainsi la chaleur latente stockée sous forme de chaleur sensible. Cela permet d'utiliser cette énergie pour des applications de chauffage, de production d'électricité, etc.

Le principal avantage du stockage par chaleur latente réside dans sa grande densité énergétique et sa capacité à stocker de grandes quantités d'énergie thermique dans un volume réduit. Cela en fait une technologie prometteuse pour la gestion de l'énergie et l'intégration des énergies renouvelables, en permettant le stockage et l'utilisation ultérieure de l'énergie thermique de manière efficace et durable. [1]

### 1.3. Les différents types de matériaux à 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) [8].

#### 1.3.1. MCP pour les applications solaires :

L'énergie solaire-thermique est généralement stocké sous la forme d'eau chaude (chaleur sensible). En raison du temps-dépendant et caractéristiques imprévisibles de l'exposition au soleil, l'efficacité des systèmes solaires thermiques repose sur l'efficacité de la technologie de stockage d'énergie thermique solaire - L'énergie thermique peut être stockée sous forme de chaleur latente en utilisant un matériau à changement de phase approprié (MCP). Ceci offre une plus grande capacité de stockage de chaleur par unité de volume / masse et une stabilité à haute température de l'eau chaude stockée. L'utilisation de réservoirs de stockage de l'énergie solaire thermique avec la technologie de stockage de chaleur latente à base de MCP devrait améliorer l'efficacité des systèmes solaires thermiques disponibles. La plus grande efficacité est obtenue

en comblant le fossé entre la disponibilité de la chaleur solaire et de la demande d'eau chaude [9]. Le matériau à Changement de phase (MCP) absorbe la chaleur pendant son cycle de changement de phase (solide → liquide) au cours du cycle solaire diurne. La quantité de Chaleur qu'un réservoir d'eau peut absorber est beaucoup plus élevée avec la présence d'un matériau à changement de phase. Le MCP58P est un MCP inorganique non toxique et ininflammable, qui peut être encapsulé dans du polypropylène de 75 mm ou des billes de polyéthylène à haute densité. Ils sont ensuite ajoutés à des réservoirs de stockage d'eau isolés de l'atmosphère. Ce MCP fonctionne à partir de 52 °C à 63 °C avec une température de changement de phase de 55 °C à 59 °C. Cette chaleur latente stockée dans le MCP maintient la température de l'eau stockée pendant des périodes plus longues et aussi préchauffe l'eau d'entrée froide pendant l'absence de chaleur solaire. La technologie de stockage de chaleur latente réduit également les fluctuations de température de l'eau dans le système solaire thermique parce que le MCP stabilise les températures. Le principal avantage du MCP est d'accumuler la chaleur latente pour les systèmes solaires thermiques d'où la température de l'eau stockée diminue à un rythme beaucoup plus lent. Le MCP peut préchauffer l'eau froide d'entrée lors de la consommation extrême d'heures du soir. Le stockage total de chaleur est plus efficace avec le MCP quand il est dans des réservoirs de stockage solaires thermiques [9].

Il existe trois grandes familles de MCP qui sont comme suit :

### ❖ Les MCP inorganiques :

Les matériaux ou les substances inorganiques ont une plage de températures de fusion comprise entre -100°C et +1000°C. Les plus utilisés sont : l'eau (température de fusion 0°C), les solutions aqueuses de sel (température de fusion inférieure à 0°C), des sels hydratés (température de fusion comprise entre 5°C et 130°C), des mélanges de sels, des mélanges de métaux (température de fusion supérieur à 150°C). Ils ont plusieurs avantages : ils ont une chaleur latente importante et une haute conductivité thermique. Ils ont une fusion nette (c'est-à-dire une plage de fusion étroite). Ils sont non-inflammables et ils ont un coût d'investissement abordable. Ils sont en général facilement disponibles. Les 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 [10].

### ❖ Les MCP organiques ;

Les matériaux ou les substances organiques ont une température ou une plage de température 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].

### ❖ 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 [10].

### 1.3.2. MCP : exemples de composés

Parmi les MCP disponibles utilisés dans le bâtiment, ce sont les plus populaires. Ils se déclinent en trois groupes : les composés organiques, inorganiques et eutectiques.

### ❖ Composés organiques :

Les matériaux ou les substances organiques ont une température ou une plage de température comprise entre 0° C et 150°. Les plus utilisés sont essentiellement à base de paraffine, des acides gras et des alcools de sucre. Ils comportent certains inconvénients, comparés aux avantages des MCP 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 plupart du temps et ils sont recyclables [1].

## ❖ Composés inorganiques :

Les matériaux ou les substances inorganiques ont une température ou une plage de températures de fusion comprise entre  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $+1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Les plus utilisés sont : l'eau (température de fusion  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), les solutions aqueuses de sel (température de fusion inférieure à  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), des sels hydratés (température de fusion comprise entre  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), des mélanges de sels, des mélanges de métaux (température de fusion supérieur à  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) [9]. 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 [1].

## ❖ Composés 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). [11] 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 [1].

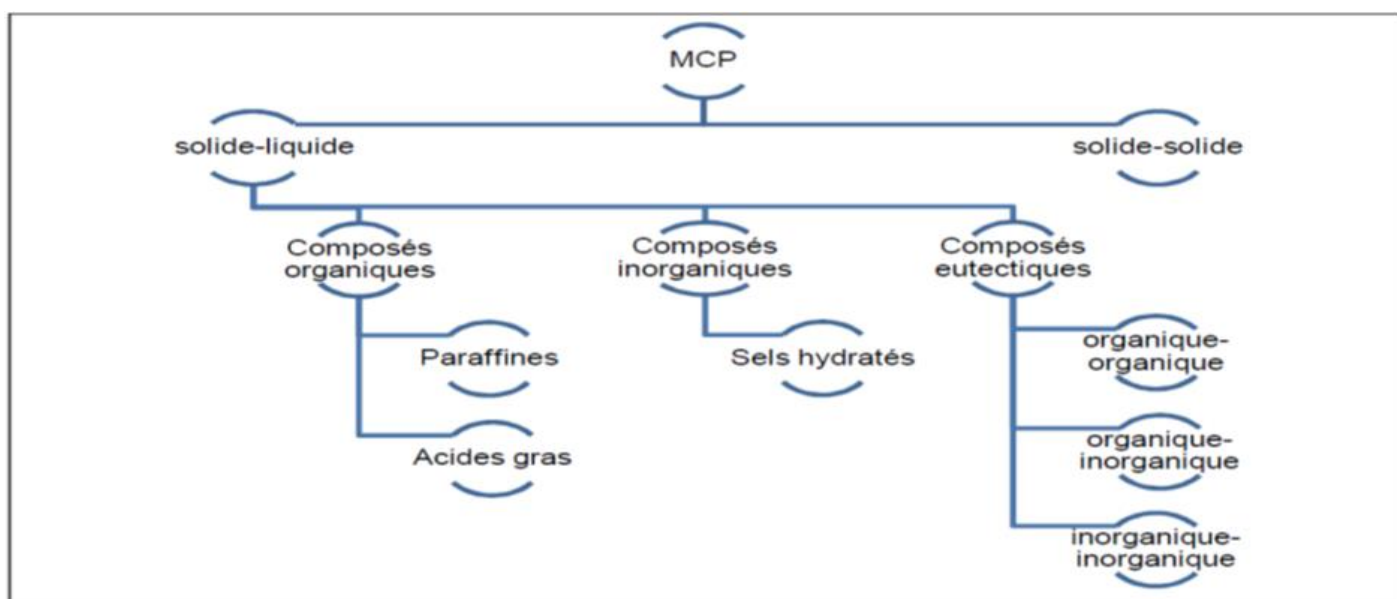


Figure 1.5: Famille de matériaux des MCPs [1].

### 1.3.3. Qualités requises pour le MCP :

MCP	Qualités requises (Points forts)
MCP organiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas de corrosion.</li> <li>- Pas de problème de surfusion.</li> <li>- Stabilité thermique et chimique.</li> <li>- Compatibilité avec les matériaux conventionnels de construction.</li> <li>- Faible coût.</li> </ul> Recyclable.
MCP inorganiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Importante enthalpie de transition (équivalente à environ deux fois la valeur de celle des composés organiques).</li> <li>- Haute conductivité thermique.</li> <li>- Plage de fusion étroite.</li> <li>- Faible coût et facilement disponible</li> </ul> Non-inflammable
MCP eutectiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Point de fusion net et similaire à une substance pure.</li> <li>- Chaleur latente volumétrique légèrement supérieure à celle des composés organiques purs</li> </ul>

Tableau 1.1. Les qualités requises pour les différentes MCP [1].

### 1.3.4. Comparaison entre MCP :

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

➤ Les MCPs inorganiques :

Les matériaux ou les substances inorganiques 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 [12].

➤ Les MCP<sub>s</sub> organiques :

Les matériaux ou les substances organiques comportent certains inconvénients, comparés aux avantages des MCPs 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 plupart du temps et ils sont recyclables [12].

➤ Les MCP<sub>s</sub> eutectiques :

Les MCPs eutectiques sont des substances composées de plusieurs MCPs purs. 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 celles 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 [12].

Matériaux		Température de fusion (°C)	Enthalpie de fusion (kJ/kg)
MCP <sub>s</sub>	Eau	0	333.6
Organiques	Stéarate de butyle	19	140
	L'acide caprique-l'aurique	21	143
MCP <sub>s</sub>	KF. 4H <sub>2</sub> O	18.5	231

Inorganiques	$Mn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	25.5	125.9
	$Na_2SO \cdot 10H_2O$	32	251
MCP <sub>S</sub>	66.6% $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ + 33.3% $MgCl_2 \cdot 6H_2O$	25	127
Eutectiques	48% $CaCl_2$ + 4.3% $NaCl$ + 47.3% $H_2O$	26.8	188
	47% $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ + 53% $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	30	136

Tableau 1.2. Propriétés thermiques de certains MCP [1].

### 1.5. Le stockage d'énergie thermique dans les MCP<sub>S</sub>:

Le stockage d'énergie thermique d'un matériau à changement de phase peut être réalisé par une transformation d'énergie interne sous forme de chaleur sensible, la chaleur latente et thermochimique ou une combinaison de ceux-ci.

Dans le stockage de chaleur sensible, l'énergie thermique est stockée par élévation de la température d'un solide ou un liquide. Le système utilise la capacité thermique et la variation de la température du matériau pendant le processus de charge et de décharge. La quantité de chaleur stockée dépend de la chaleur spécifique du milieu, le changement de température et la quantité de matériau stockée [1].

$$Q = \int mC_p dT = mC_{aP}(T_f - T_i) \quad (3)$$

La chaleur latente de stockage est basée sur l'absorption ou la libération de la chaleur lorsqu'un MCP est soumis à un changement de phase (solide → liquide ou liquide → gaz) ou vice - versa. La capacité de stockage du système avec un MCP est donnée par :

$$Q = ma_m \Delta h + \int_i^m mC_p dT + \int_m^f mC_p dT \quad (4)$$

Les systèmes utilisant un MCP ont certains avantages par rapport aux systèmes simples. Le plus important est d'avoir une densité d'énergie plus élevée, par unité de masse ou par unité de volume. Les systèmes Thermochimiques comptent sur l'énergie absorbée et libérée dans la rupture et la réforme des liaisons moléculaires dans une réaction chimique tout à fait réversible

[1]. Dans ce cas, la chaleur stockée dépend de la quantité de Matériau de stockage, la chaleur de réaction endothermique, et l'ampleur de la conversion.

$$Q = a_r m \Delta h_r \quad (5)$$

Parmi les techniques ci-dessus de stockage de chaleur thermique, accumulateur de chaleur latente de l'énergie thermique est particulièrement attractif en raison de sa capacité à fournir une densité de stockage d'énergie élevée et ses caractéristiques pour stocker de la chaleur à température constante elle correspond à la température de transition de phase du matériau à changement de phase (MCP). Le changement de phase peut-être sous l'une des formes suivantes : solide - solide, solide - liquide, solide - gaz, liquide -gaz.

Dans les transitions (solide - solide), la chaleur est stockée lorsque le matériau est transformé à partir d'un cristallin à l'autre. Cette transition a généralement la chaleur latente et le changement de volume est plus petit que dans les transitions (Solide - liquide) et (Solide-solide) ; les MCPs offrent des avantages et des exigences relatives aux contenants moins stricts et une plus grande flexibilité de conception. Les matériaux les plus prometteurs ont une solution solide organique de pentaérythritol, penta glycine et  $\text{Li}_2\text{SO}_4$ .

Les transitions (Solide - gaz) et (liquide - gaz) ont une chaleur latente plus élevée que dans les autres transitions de phase, mais leur changement de volume est plus grand. La transition de phase est associée à des problèmes de confinement et excluent leur potentiel qui est une utilité dans les systèmes de stockage thermique. De grandes variations de volume rendent le système complexe et peu pratique.

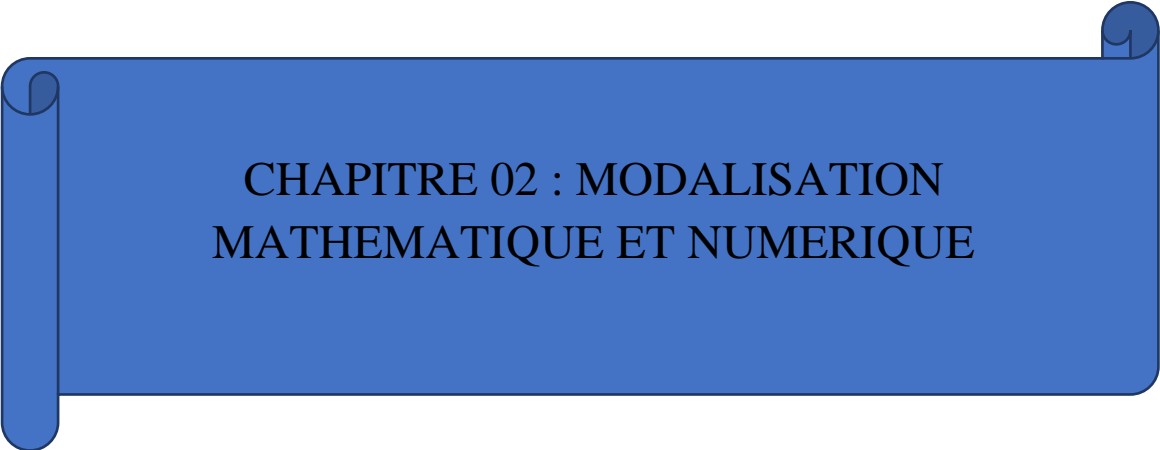
Les transformations (Solide - liquide) ont une chaleur latente relativement plus petite que (liquide - gaz). Cependant, cette transformation ne concerne qu'une petite modification (de l'ordre de 10 pour cent ou moins) en volume. Les transitions (solide-liquide) se sont révélés être économiquement intéressant pour une utilisation dans des systèmes de stockage d'énergie thermique. Les MCPs eux-mêmes ne peuvent pas être utilisé comme milieu de transfert de chaleur. Milieu de transfert de chaleur doit être employé avec échangeur de chaleur entre les deux transfère d'énergie depuis la source vers le MCP. L'échangeur de chaleur pour être utilisé doit être conçu spécialement, compte tenu de la faible diffusivité thermique du MCP en général. Le changement de volume des MCPs lors de la fusion nécessiteraient aussi la conception de volume spécial des conteneurs à la totalité des MCPs. Il doit être capable d'absorber ces variations de volume et doit également être compatible avec le MCP utilisé.

Pendant un stockage d'énergie de chaleur latente, le système doit, par conséquent, posséder au moins a priori les propriétés suivantes :

- Un MCP approprié avec son point de fusion dans la plage souhaitée de la température,
- Une surface d'échange de chaleur appropriée et un récipient approprié compatible avec le MCP. [12]

### 1.6. Conclusion

Le problème principal dans le domaine de l'énergie solaire est le stockage de l'énergie thermique. Pour détourner ce problème, il a été suggéré d'utiliser un capteur solaire à plat qui sert également de système de stockage ; cette solution réduira la taille du réfrigérateur solaire que nous étudions. Une haute densité d'énergie stockée n'est que possible si nous utilisons la chaleur latente de changement de phase. Une analyse thermique a été développée pour ce type de capteur stockeur pour des conditions d'état quasi-stable utilisant un stockage de chaleur à nanofluide, substance basée sur un mélange de sels binaires  $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$  comme PCM et de l'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) comme nanoparticule, à partir de laquelle les nouvelles équations de Hottel-Whillier-Bliss ont été utilisées pour un capteur plan efficace comme support de stockage. Des calculs ont été effectués pour une large gamme de paramètres afin de vérifier l'applicabilité du modèle mathématique développé.



**CHAPITRE 02 : MODALISATION  
MATHEMATIQUE ET NUMERIQUE**

## 2.1. Introduction :

Le capteur stockeur solaire est un dispositif qui consiste à collecter et stocker l'énergie solaire à l'aide d'un gradient de salinité (sel dissout dans l'eau à concentration imposée). Ce capteur est formé de trois zones stratifiées.

Le but du présent travail est de déterminer le profil horizontal de la température dans une couche donnée et le profil vertical le long des différentes couches du capteur en fonction du temps d'échauffement de celui-ci. Le modèle mathématique adopté dans ce travail est basé sur l'équation de la conduction de la chaleur avec une source d'énergie extérieure au système. L'approche de résolution numérique du modèle mathématique adopté repose sur la discrétisation de l'équation de la chaleur en utilisant la méthode des différences finies conjointement au schéma de Cranko-Nicholson avec des conditions initiales et aux limites appropriées. La convergence, la stabilité et la consistance du schéma numérique utilisées sont aussi prises en considération [1].

## 2.2. Description de problème :

Une analyse thermique doit être développée pour ce genre de capteur stockeur pour des conditions d'états quasi-réguliers en utilisant des matériaux à changement de phase (MCP) comme substance d'emménagement de chaleur, d'où on a obtenu des nouvelles équations de Hottel-Whillier-Bliss (HWB) [14] pour des capteurs plans performants aux système qui servent à stocker l'énergie thermique.

BUDDHI et al.[2]ont conçu et testé un capteur stockeur solaire dans des conditions variables de paramètres de conception en utilisant une acide stéarique comme MCP.Si toutefois , on utilise le MCP dans les capteurs plans comme un milieu de stockage , le transfert thermique devient plus compliqué parce que l'emploi d'un MCP amène le système dans les conditions d'états quasi-réguliers , et il n'y a aucune possibilité pour employer les équations de HWB sous leur ancienne forme pour la caractérisation du système[1].

Les équations de transfert thermique correspondantes à ces capteurs stockeurs prennent maintenant la forme du problème de Stefan pour le déplacement des frontières du transfert thermique [1].

Pour perfectionner ce système de stockage on a appliqué les mêmes équations que BANSAL et BUDDHI [4] en utilisant un NANO-MCP; les propriétés thermodynamiques de ce NANO-MCP satisfont les critères qu'on doit tenir compte pour choisir une telle substance d'emménagement de chaleur [5].

### 2.3. Géométrie du circuit échangeur

Nous avons considéré dans notre travail que la chaleur est évacuée par des tubes fixés sous l'absorbant ; ces tubes sont immergés dans un réservoir ou notre NANO-MCP est situé [15], comme le montre la figure 2.1

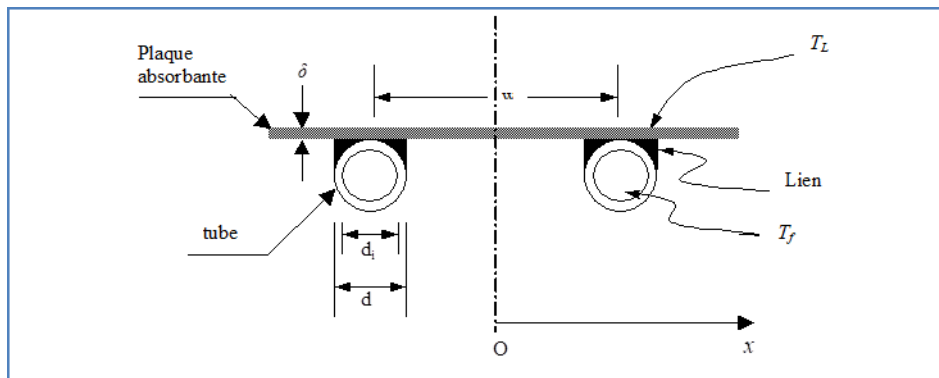


Figure 2.1 : Coupe de l'absorbant [15].

### 2.4. Hypothèses prise en considération pour le capteur stockeur solaire :

L'équation du bilan énergétique de notre système doit être séparée pour le mode de charge et décharge-le en appliquant hypothèses suivantes [15] :

- Le système est dans un état quasi-équilibré puisque les variations de températures sont lentes.
- La conduction est le mode dominant du transfert thermique entre la plaque absorbante et le liquide du NANO-MCP pendant le mode de charge.
- Le liquide du NANO-MCP est juste au-dessous de la plaque absorbante pendant le mode de charge.
- Nous supposons que la plaque absorbante au-dessus du lien a une certaine température minimale locale  $T_L$ .
- La température de la zone fondue reste constante (égale à la température de fusion).
- L'écoulement de l'eau dans les tubes est uniforme, avec un débit constant.
- les couvertures sont opaques aux rayonnement infrarouge.
- Les propriétés thermodynamiques de tous les matériaux sont indépendantes des températures.

- Pendant le mode de décharge, la zone fondue est entre deux zones solidifiées du NANO-MCP.

## 2.5. Mode charge :

### 2.5.1. Distribution de la température dans l'ailette :

Le schéma du capteur stockeur figure 2.2 Montre que dès que la plaque absorbante intercepte le rayonnement solaire incident, elle commence à transmettre la chaleur vers le NANO-MCP solide jusqu'à ce qu'on obtient une phase liquide, qui se trouve au-dessous de la plaque absorbante. Dans la direction OX perpendiculaire à l'écoulement de l'eau, la température de la plaque absorbante est maximale à mi-chemin entre deux tubes (l'origine de l'axe des x sera prise à l'un de ces points) et vaut alors  $T_m$  qui diminue graduellement vers les tubes. En considérant la symétrie par rapport à O, et considérant un élément de surface de longueur  $\Delta x$  et de largeur l'unité (parallèle à la longueur du tube et au flux du fluide) quelque part entre l'origine et le tube [15], on peut noter l'équation suivante du bilan énergétique :

$$S\Delta x = k\delta \frac{dT}{dx} - k\delta \frac{d}{dx} \left( T + \frac{\partial T}{\partial x} \Delta x \right) + U_n(T - T_a)\Delta x + h_c(T - T_m)\Delta x \quad (6)$$

(Quantité d'énergie absorbée par l'absorbeur, quantité de chaleur échangée dans les tubes, quantité de chaleur échangée entre  $x$  et  $x + \Delta x$ , pertes thermiques du capteur vers l'ambiance, quantité d'énergie transférée de l'absorbeur vers le NANO-MCP) où  $S$  est l'énergie radiative incidente sur la surface absorbante,  $k$  est la conductivité thermique de l'absorbeur,  $\delta$  l'épaisseur de l'absorbeur,  $T_a$  la température ambiante,  $U_{t1}$  le coefficient global de perte thermique de l'absorbeur vers l'ambiance pendant le mode de charge,  $h_c$  le coefficient de transfert thermique entre l'absorbeur et le NANO-MCP,  $T_m$  la température de fusion du MCP, et  $T$  la distribution de température entre deux tubes. D'après Bansal and Buddhi [4], on peut écrire l'équation (1) sous la forme différentielle suivante :

$$\frac{d^2T}{dx^2} = \frac{U_n+h_c}{k\delta} \left[ T - T_a - \frac{S+h_c(T_m-T_a)}{U_n+h_c} \right] \quad (7)$$

La différence entre l'équation courante du capteur plan normale (CPN) et celle d'un capteur utilisant un NANO-MCP, est qu'on a remplacé le coefficient de perte global  $U_L$  (qui inclut également les pertes avant et les pertes arrières) par le coefficient  $(U_{t1} + h_c)$  où on a combiné entre l'effet de perte thermique global et le gain thermique du NANO-MCP [15].

## 2.5.2. Distribution de la température dans le NANO-MCP solide :

Dans cette étude on rencontre le problème des limites mobiles, puisque les conditions aux limites changent en fonction de  $y$ , et l'interface de fusion solide-liquide varie avec le temps.

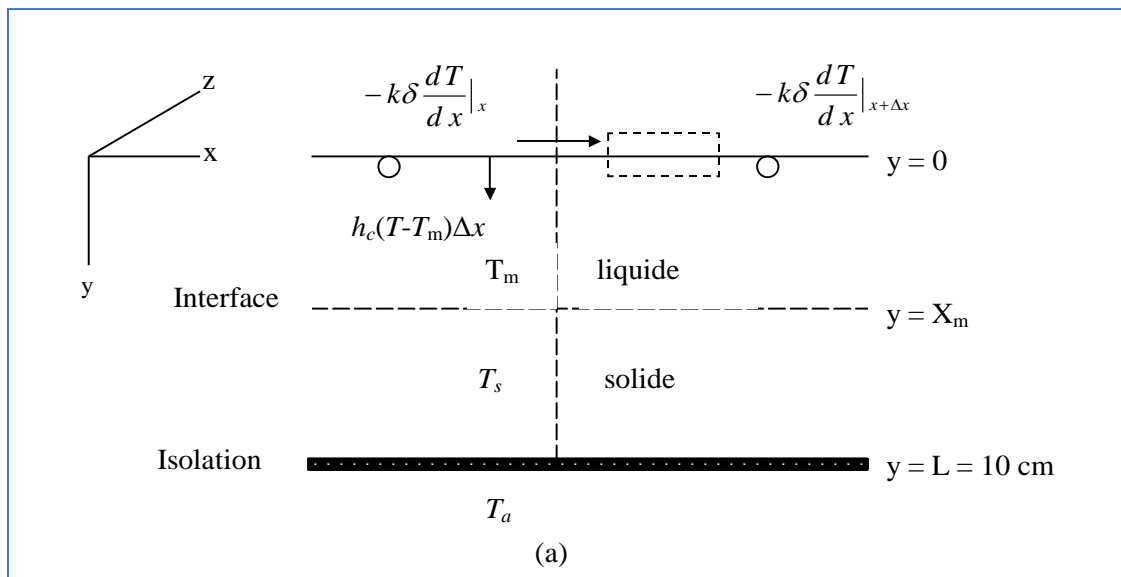


Figure 2.2 : bilan énergétique sur l'élément d'ailette pendant le mode de charge [15].

D'après la figure 2.2 on peut dire que la quantité d'énergie transférée au NANO-MCP est partiellement utilisée d'une part à l'interface de fusion solide-liquide (stockage d'énergie) et d'autre part au transfert d'énergie vers le NANO-MCP solide. Mathématiquement on peut écrire la formule qui suit :

$$h_c(T - T_m) = H\rho_l \frac{dX_m(t)}{dt} + h_s(T_m - T_s(y, t)|_{y=x_m}) \quad (8)$$

(quantité d'énergie transférée de l'absorbeur vers le NANO-MCP, quantité d'énergie thermique stockée dans le NANO-MCP, quantité d'énergie transférée du MCP liquide vers le MCP solide) tel que  $H$  est la chaleur latente de fusion du NANO-MCP,  $\rho_l$  densité du NANO-MCP liquide,  $h_s$  coefficient de transfert thermique à l'interface liquide-solide,  $T_s$  température du MCP solide  $X_m$  épaisseur de la zone fondue pendant le mode de charge [15].

Puisque le transfert de chaleur est prédominant unidimensionnel [3], la distribution de température dans le NANO-MCP solide est donnée par l'équation de conduction thermique de Fourier, suivante :

$$\frac{\partial^2 T_s(y, t)}{\partial y^2} = \frac{\rho_s c_p}{k_s} \frac{\partial T_s(y, t)}{\partial t} \quad (9)$$

Où  $c_p$  est la chaleur spécifique de l'eau,  $k_s$  est la conductivité thermique du NANO-MCP solide et  $\rho_s$  densité du NANO-MCP solide.

La distribution de température  $T_s(y, t)$  dans le NANO-MCP solide satisfait les conditions aux limites suivantes [16/17] :

$$-k_s \left. \frac{\partial T_s}{\partial y} \right|_{y=x_m} = h_s (T_m - T_s|_{y=x_m}) \quad (10)$$

Et

$$-k_s \left. \frac{\partial T_s}{\partial y} \right|_{y=L} = h_a (T_s|_{y=L} - T_a) \quad (11)$$

Où  $h_a$  est le coefficient de pertes thermiques de l'absorbeur vers l'ambiance. En supposant que l'absorbeur est soumis à un éclairage solaire sinusoïdal et de période égale à 24 heures ; et mettre en évidence que la distribution de la température à l'intérieur du NANO-MCP solide est périodique avec cette période ; l'équation (9) a pour solution l'équation (17) qui montre qu'il y a donc une propagation d'une onde de température amortie [15].

$$T_s(y, t) = A_0 + A_l y + \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \exp(\alpha_n y) + A_{nl} \exp(-\alpha_n y)] \exp(in\omega t) \quad (12)$$

Où  $\alpha_n = (1 + i) \sqrt{(n\omega\rho_s C_s / 2k_s)}$  tel que  $i^2 = -1$   $n$  nombre de période,  $C_s$  conductibilité du lien,  $A_0$ ,  $A_l$ ,  $A_n$  et  $A_{nl}$  sont des constantes inconnues qu'on peut les trouver à l'aide des conditions aux limites [éq. (10) et (11)]. Si  $\omega$  (éq. 12) est la fréquence variante durant une Période de 24 heures, il faut bien faire attention à ce que la température aux limites soit harmonique avec la transition du mode de charge en mode de décharge [4].

### 2.5.3. Distribution de la température suivant la direction de l'eau :

La quantité de chaleur utile  $q_u$  par unité de longueur calculée à partir de l'équation (34) est transférée à l'eau par conduction à travers l'épaisseur du tube puis par échange convectif sur la paroi interne du tube. L'eau entre dans le tube avec une température  $T_{fe}$ , cette température augmente jusqu'à ce qu'elle atteigne la température de sortie  $T_{fs}$  [15].

A partir de la figure 2.3 nous pouvons donner le bilan énergétique du fluide traversant un élément de tube de longueur  $\Delta z$  comme suit :

$$\left( \frac{m}{n_t} \right) C_p T_f \Big|_z - \left( \frac{m}{n_t} \right) C_p T_f \Big|_{z+\Delta z} \Delta z q_u = 0 \quad (13)$$

Où  $\dot{m}$  est le débit de l'eau,  $c_p$  sa chaleur spécifique et  $n_t$  nombre de tube.

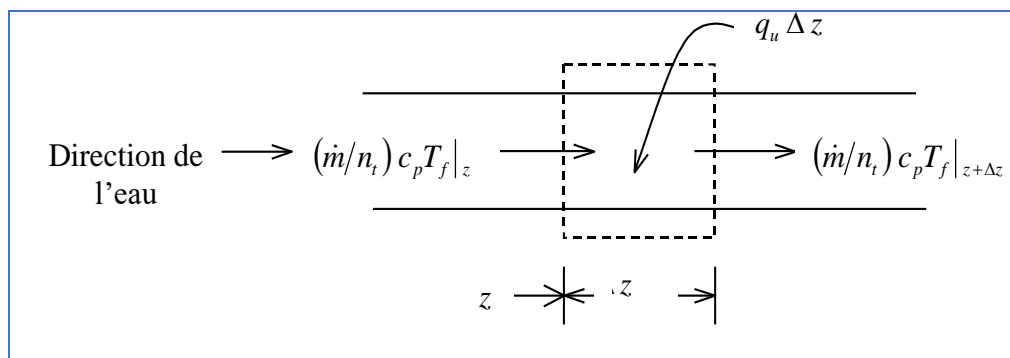


Figure 2.3. Bilan énergétique dans un élément de tube [15].

## 2.6. Mode de décharge :

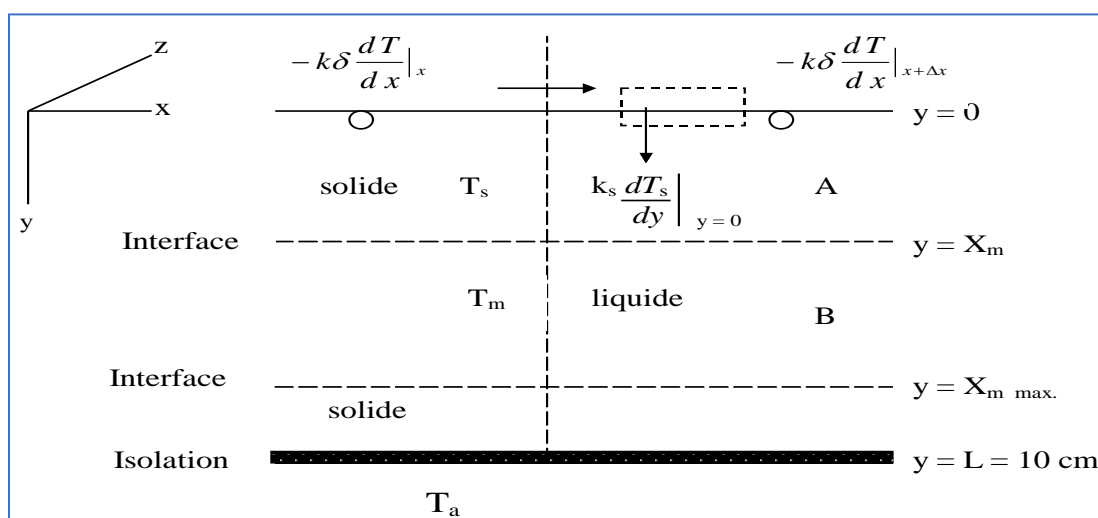


Figure 2.4. Bilan énergétique sur l'élément d'ailette pendant le mode de décharge [2].

Quand la quantité de chaleur utile devient inférieure à la quantité des pertes thermiques, le processus de congélation démarre et le NANO-MCP commence à se solidifier, ainsi le problème des frontières mobiles peut être résolu selon la géométrie montrée à la figure 2.4 où la zone fondue est entre deux zones solidifiées du NANO-MCP [2].

### 2.6.1. Distribution de la température dans l'ailette :

Soit un élément de longueur  $\Delta x$  et de largeur l'unité, on peut écrire l'équation suivante du bilan énergétique

$$k_s \frac{\partial T_{sl}}{\partial y} \Big|_{y=0} \Delta x \equiv U_{t2}(T - T_a)\Delta x + k\delta \frac{\partial T}{\partial x} - k\delta \frac{\partial}{\partial x} \left( T + \frac{\partial T}{\partial x} \Delta x \right) \quad (14)$$

(Quantité de chaleur transférée à partir du NANO-MCP à la plaque absorbante; quantité de pertes thermiques de la plaque vers l'ambiance; quantité de chaleur échangée dans les tubes, quantité de chaleur échangée entre  $x$  et  $x + \Delta x$ ) où  $U_{t2}$  le coefficient global de perte thermique de l'absorbeur vers l'ambiance pendant le mode de décharge [15].

L'équation résultante devient maintenant :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \frac{U_{t2} + C_2}{k\delta} \left[ T - T_a - \left( \frac{C_1 T_m - C_2 T_a}{U_{t1} + C_2} \right) \right] \quad (15)$$

Où

$$C_1 = \frac{h_a h_l h_s}{h_l h_s + (h_l Y_{m1} + k_s)'} \\ C_2 = \frac{h_a^2 (h_l Y_{m1} + k_s)}{h_l h_s + h_{ac} (h_l Y_{m1} + k_s)'}$$

tel que  $h_{ac}$  la conductance d'air entre l'absorbeur et le NANO-MCP solide,  $h_l$  est le coefficient de transfert de chaleur entre la zone fondue et la zone solidifiée du MCP pendant le mode de décharge,  $Y_{m1}$  est l'épaisseur de la zone solidifiée pendant le mode de décharge [15].

L'équation (15) du second degré, est résolue similairement à l'équation (12) et on arrive à l'équation suivante pour la quantité de chaleur utile,

$$q_u = wF' \left[ (C_1 T_m - C_2 T_a) - (U_{t2} + C_2)(T_f - T_a) \right] \quad (16)$$

## 2.6.2. Distribution de la température dans le NANO-MCP solide :

A l'interface solide-liquide pour la région A-B (figure4), l'équation du bilan énergétique peut être écrite comme suit :

$$H\rho_l A_c \frac{\partial y_{ml}}{\partial t} = A_c h_l (T_m - T_s|_{y=y_{ml}}) + U_b A_s (T_m - T_a) \quad (17)$$

Où  $A_s$  est la surface de contact entre la zone fondu et l'un des côtés de la cuve de l'absorbeur,  $U_b$  est le coefficient global de perte thermique des parois de la cuve vers l'ambiance.

On trouve à nouveau que la distribution de la température dans la zone solidifiée est périodique [éq. (14)] avec les constantes à déterminer par les conditions aux frontières suivantes :

$$k_s \frac{T_s}{y} \Big|_{y=y_{ml}} = h_l (T_m - T_s|_{y=y_{ml}}) \quad (18)$$

$$k_s \frac{T_s}{y} \Big|_{y=0} = h_{ac} (T_s|_{y=0} - T) \quad (19)$$

L'équation (29) est résolue comme avant, c.-à-d.,

$$y_{ml}(T_n) = y_{ml}(T_{n-1}) + \left[ A_c h_l (T_m - T_s|_{y=y_{ml}}) + U_b A_s (T_m - T_a) \right] / H \rho_l \quad (20)$$

En combinant entre les équations précédentes, l'énergie utile rassemblée est obtenue par l'expression habituelle, et le rapport entre la température de sortie et la température d'entrée est donné par :

$$\frac{T_{f0} - T_a - \left[ \frac{C_1 T_m - C_2 T_a}{U_{t2} + C_2} \right]}{T_{ft} - T_a - \left[ \frac{C_1 T_m - C_2 T_a}{U_{t2} + C_2} \right]} = \exp \left( \frac{-F' A_c (U_{t2} + C_2)}{\dot{m} c_p} \right) \quad (21)$$

## 2.7. Solution des équations :

### 2.7.1. Transfert thermique tout au long de l'ailette :

Pour résoudre l'équation (7), on définit d'après Duffie et Beckman [18], les paramètres suivants :

$$\left\{ \begin{array}{l} m^2 = \frac{U_{t1} + h_c}{k \delta} \\ \text{et} \\ \Psi = T - T_a - \left\{ \frac{S + h_c (T_m + T_a)}{U_{t1} + h_c} \right\} \end{array} \right. \quad (22)$$

D'où l'équation (2) devient

$$\frac{d^2 \Psi}{dx^2} - m^2 \Psi = 0 \quad (23)$$

En suivant les conditions aux limites suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Psi}{dx} \Big|_{x=0} = 0 \\ \Psi \Big|_{x=(w-d)/2} = T_L - T_a - \frac{S + h_c (T_m + T_a)}{U_{t1} + h_c} \end{array} \right. \quad (24)$$

La solution générale est alors

$$\Psi = C_1 \sinh mx + C_2 \cosh mx \quad (25)$$

Les constantes  $C_1$  et  $C_2$  peuvent être trouvées en substituant les conditions aux limites dans la solution générale.

On obtient, en supposant que  $(u_{t1} + h_c)$  est constante :

$$\frac{\Psi}{\Psi_L} = \frac{T - T_a - S - h_c(T_m - T_a)/U_{t1} + h_c}{T_L - T_a - S - h_c(T_m - T_a)/U_{t1} + h_c} = \frac{\cosh mx}{\cosh m(w-d)/2} \quad (26)$$

Où  $\Psi_L$  est la valeur de  $\Psi$  pour  $T = T_L$

L'énergie transmise de l'ailette de largeur  $(w - d)/2$  par unité de longueur dans le sens de l'écoulement vers la région du tube est donnée par la loi d'évolution de Fourier [15] :

$$\begin{aligned} q_{ait} &= -k\delta \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=(w-d)/2} \\ &= \frac{k\delta m}{U_{t1} + h_c} [S + h_c(T_m - T_a) - (U_{t1} + h_c)(T_L - T_a)] * \tanh m \frac{w-d}{2} \end{aligned} \quad (27)$$

L'équation (25) traduit l'énergie rassemblée seulement d'un côté d'un tube ; en prenons en considération que l'énergie reçue par l'ailette est symétrique par rapport au tube  $((w - d)/2 \leq x \leq w)$  :

$$q_{ait} = \dot{F}(w - d) * [S + h_c(T_m - T_a) - (U_{t1} + h_c)(T_L - T_a)] \quad (28)$$

Où

$$F = \frac{\tanh[m(w-d)/2]}{m(w-d)/2} \quad (29)$$

$F$  : facteur d'efficacité de l'ailette, il a une valeur plus basse que celle d'un CPN parce que  $m(w - d)/2$  est presque trois fois plus grande que celle d'un CPN pour le même espacement de tube. Cependant, on peut augmenter l'efficacité de l'ailette si nous maintenons les tubes plus étroits ce qui influera finalement sur la capacité de stockage [15].

La quantité de chaleur  $q_{tube}$  collecté au-dessus du tube est symétrique par rapport à tel que

$$((w - d)/2 \leq x \leq (w + d)/2)$$

$$q_{tube} = d[S + h_c(T_m - T_a) - (U_{t1} + h_c)(T_L - T_a)] \quad (30)$$

La quantité de chaleur globale transférée à l'eau par un élément de surface  $w.dz$  de l'absorbeur dans le sens de l'écoulement est la somme des deux équations (26) et (28)

$$q_u = [F(w - d) + d] * [S + h_c(T_m - T_a) - (U_{t1} + h_c)(T_L - T_a)] \quad (31)$$

Finalement, la quantité de chaleur utile donnée par l'équation (29) doit être transférée au fluide. La résistance thermique à l'écoulement de l'eau résulte du lien et de la résistance du tube [15]. La quantité de chaleur utile peut être exprimée en fonction des deux résistances

$$q_u = \frac{T_L - T_f}{\frac{1}{h_{fi}\pi d_i} + \frac{1}{c_b}} \quad (32)$$

Où  $d_i$  est le diamètre intérieur du tube et  $h_{fi}$  est le coefficient de transfert thermique entre le fluide et la paroi du tube. La conductibilité du lien  $C_b$  peut être estimée à partir de la connaissance de la conductivité thermique du lien  $k_b$ , de l'épaisseur moyenne du lien  $\gamma$ , et de la largeur du lien  $b$ .

$$c_b = \frac{k_b b}{\gamma} \quad (33)$$

Pour obtenir une expression de la quantité de chaleur utile en fonction des dimensions connues, des paramètres physiques, et de la température de fusion locale, on élimine  $T_L$  de l'équation (29) en la substituant dans l'équation (30), on peut trouver alors la formule suivante :

$$q_u = w\dot{F} [S + h_c(T_m - T_a) - (U_{t1} + h_c)(T_L - T_a)] \quad (34)$$

Où

$$F' = \frac{1/(U_{t1} + h_c)}{\left[ \frac{1}{(U_{t1} + h_c)[(w-d)F + d]} + \frac{1}{h_{fi}\pi d_i} + \frac{1}{c_b} \right]} \quad (35)$$

$F'$  : facteur d'efficacité du capteur, il a des valeurs plus basses que celui d'un capteur plan normal parce que le coefficient thermique  $(U_{t1} + h_c)$  est dix fois plus grand que  $U_L$  pour un CPN. Cependant, il doit y avoir un compromis entre le stockage et la captation ; la diminution de  $F'$  est compensée par l'énergie stockée calculée pour une épaisseur  $X_m$  de la zone de fusion.

Selon l'équation (32) forme modifiée de l'équation de HWB exprimant le rendement instantané  $\eta$  du capteur stockeur employant le NANO-MCP [15], nous pouvons écrire en effectuons l'approximation suivante de la température moyenne du fluide :

$$\bar{T}_f \approx \frac{T_{f0} + T_{fi}}{2}$$

La formule qui suit :

$$\eta = \dot{F} \left[ 1 - \frac{(U_{t1} + h_c)(\bar{T}_f - T_a)}{S + h_c(T_m - T_a)} \right] \quad (36)$$

### 2.7.2. Transfert thermique dans le NANO-MCP:

Nous pouvons évaluer les constantes  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_n$  et  $A_{n1}$  de l'équation (12), on prends en considération les conditions aux limites qui sont données dans les équations (10) et (11) sous la forme suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} A_0 = \frac{(k_s + h_a L) h_s T_m - (h_s X_m - k_s) h_s T_{a0}}{h_s (k_s + h_a L) - h_s (h_s X_m - k_s)} \\ A_1 = \frac{h_a h_s (T_{a0} - T_m)}{h_s (k_s + h_a L) - h_s (h_s X_m - k_s)} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ A_n = \frac{h_a T_{an} (h_s + k_s \alpha_n) \exp(-\alpha_n X_m)}{(h_s - k_s \alpha_n)(k_s \alpha_n - h_a) + (h_s + k_s \alpha_n)(h_a + k_s \alpha_n)} \\ \text{et} \\ A_{n1} = \frac{h_a T_{an} (h_s + k_s \alpha_n) \exp(\alpha_n X_m)}{(h_s - k_s \alpha_n)(k_s \alpha_n - h_a) + (h_s + k_s \alpha_n) \exp(\alpha_n (X_m - L))} \end{array} \right. \quad (37)$$

En combinant entre la valeur de  $T$  de la solution de l'équation (7) et  $T_s(y, t)$  de l'équation (12), on obtiendra une équation non-linéaire de  $X_m$  [eq. (8)]. Donc, l'équation (8) est résolue en employant une approche itérative et en supposant que  $(k_s \delta T_s / \delta y)|_{y=X_m} = h_s (T_m - T_s|_{y=X_m}) = cst$  pour un temps infinitésimal. Les constantes  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_n$ ,  $A_{n1}$  sont les premières à être calculées en prenant  $X_m = 0$  ; la résolution de l'expression qui donne  $T_s$  [eq. (12)] est substituée dans l'équation (8) d'où on peut trouver la valeur de  $X_m$ . Avec cette valeur de  $X_m$ ,  $T_s$  est de nouveau calculé ; cette procédure est répétée jusqu'à ce qu'on obtienne deux valeurs consécutives de  $X_m$  avec un intervalle de 1% [15]. L'expression générale de  $X_m$  peut être mise sous la forme suivante :

$$X_m(T_n) = X_m(T_{n-1}) + [h_s(T - T_m) + C]t / H\rho l \quad (38)$$

### 2.7.3. Distribution de la température dans le sens de l'écoulement de l'eau :

En introduisant l'équation (28) dans l'équation (12) et en résolvant l'équation différentielle résultante avec  $T_f = T_{fe}$  (à  $z = 0$ ) et  $T = T_{fs}$  (à  $z = l$ ) on obtient le rapport entre la température d'entrée et la température de sortie avec  $A_c = n_t w l$  tel que  $w$  est la distance entre deux tubes et  $l$  la longueur du tube [15].

$$\frac{t_s}{t_e} = \frac{T_{fs} - T_a - \frac{S + h_c(T_m - T_a)}{U_{t1} + h_c}}{T_{fe} - T_a - \frac{S + h_c(T_m - T_a)}{U_{t1} + h_c}} = \exp\left(\frac{-(U_{t1} + h_c)FA_t}{\dot{m}c_p}\right) \quad (39)$$

Et en suivant la procédure de Duffie et Beckman [4], on peut déduire facilement

$$\eta = F_R \left[ 1 - \frac{(U_{t1} + h_c)(T_{f1} - T_a)}{S + h_c(T_m - T_{f0})} \right] \quad (40)$$

Le coefficient  $F_R$  appelé facteur de conductance du capteur, étant donné par :

$$F_R = \frac{\dot{M}c_p}{(U_{t1} + h_c)} \left[ (T_{f1} - T_{f0}) / \left\{ \frac{S + h_c(T_m - T_a)}{(U_{t1} + h_c)} - (T_{f0} - T_a) \right\} \right] \quad (41)$$

Où

$$\dot{M} = \frac{\dot{m}}{A_c}$$

Est le débit massique par unité de surface.

Les équations (36) et (40) sont analogues à la famille d'équations de HWB si nous remplaçons le terme du rayonnement solaire  $S$  par le terme  $S + h_c(T_m - T_a)$ , l'énergie totale responsable du transfert thermique tout au long de l'ailette [15].

Le coefficient  $F_R$  croît avec  $M$  et il tend vers sa valeur supérieure :

$$F_R = F'$$

Lorsque  $\dot{M}$  tend vers l'infini. En effet la température de sortie de l'eau est alors proche de la température d'entrée ( $t_s \sim t_e$  selon l'éq. 39) ; la quantité de chaleur extraite du capteur est alors maximale [15].

A blue horizontal scroll graphic with rounded ends and a slight 3D effect, containing the chapter title.

## CHAPITRE 03 : RESULTATS ET DISCUSSION

### 3.1. Introduction :

Nous pouvons formuler une analyse du capteur stockeur utilisant le NANO-MCP à partir des équations (28) et (35), qui sont similaires aux équations HWB du capteur de plan normal. Les équations équivalentes de HWB dépendent de la température de fusion du NANO-MCP et du coefficient de transfert de chaleur ( $h_c$ ) entre la plaque absorbante et le liquide NANO-MCP.

La formulation suivante peut remplacer celle-ci : nous avons utilisé Matlab pour tracer les courbes des figures suivantes Nous avons modifié le facteur d'efficacité du capteur stockeur pour différentes valeurs de  $K\delta$  et avons également fait varier  $h_c$ , qui est le coefficient de transfert thermique entre l'absorbeur et le NANO-MCP. Nous avons fixé  $h_{fi}=350\text{W/m}^2.\text{K}$ .

Nous avons observé l'influence de cette variation sur le facteur d'efficacité dans trois modes différents en fonction des types d'écoulement, à savoir le mode laminaire, turbulent et très turbulent.

### 3.3. Influence du mode d'écoulement sur le facteur d'efficacité du capteur stockeur :

Nous avons fait varier le facteur d'efficacité du collecteur de stockage en fonction de  $W$  pour différentes valeurs de  $K\delta$  en faisant varier  $h_c$  le coefficient de transfert thermique entre l'absorbeur et le NANO-PCM .Pour comprendre l'influence du mode d'écoulement sur le facteur d'efficacité du collecteur de stockage , on prend les trois cas d'écoulement, laminaire ,turbulent et très turbulent.

#### 3.3.1. Ecoulement laminaire :

Dans le cas d'un écoulement laminaire en prenant  $h_{fi}=100\text{W/m}^2.\text{K}$ , la figure 1 (a, b, c et d) montre la variation du facteur d'efficacité du collecteur de stockage en fonction de  $W$

Pour différentes valeurs de  $K\delta$  pour les valeurs de a)  $h_c = 15\text{W/m}^2.\text{k}$ ,

b)  $h_c = 45 \text{W/m}^2.\text{K}$  , c)  $h_c = 75\text{W/m}^2.\text{K}$ , d)  $h_c = 90\text{W/m}^2.\text{K}$ .

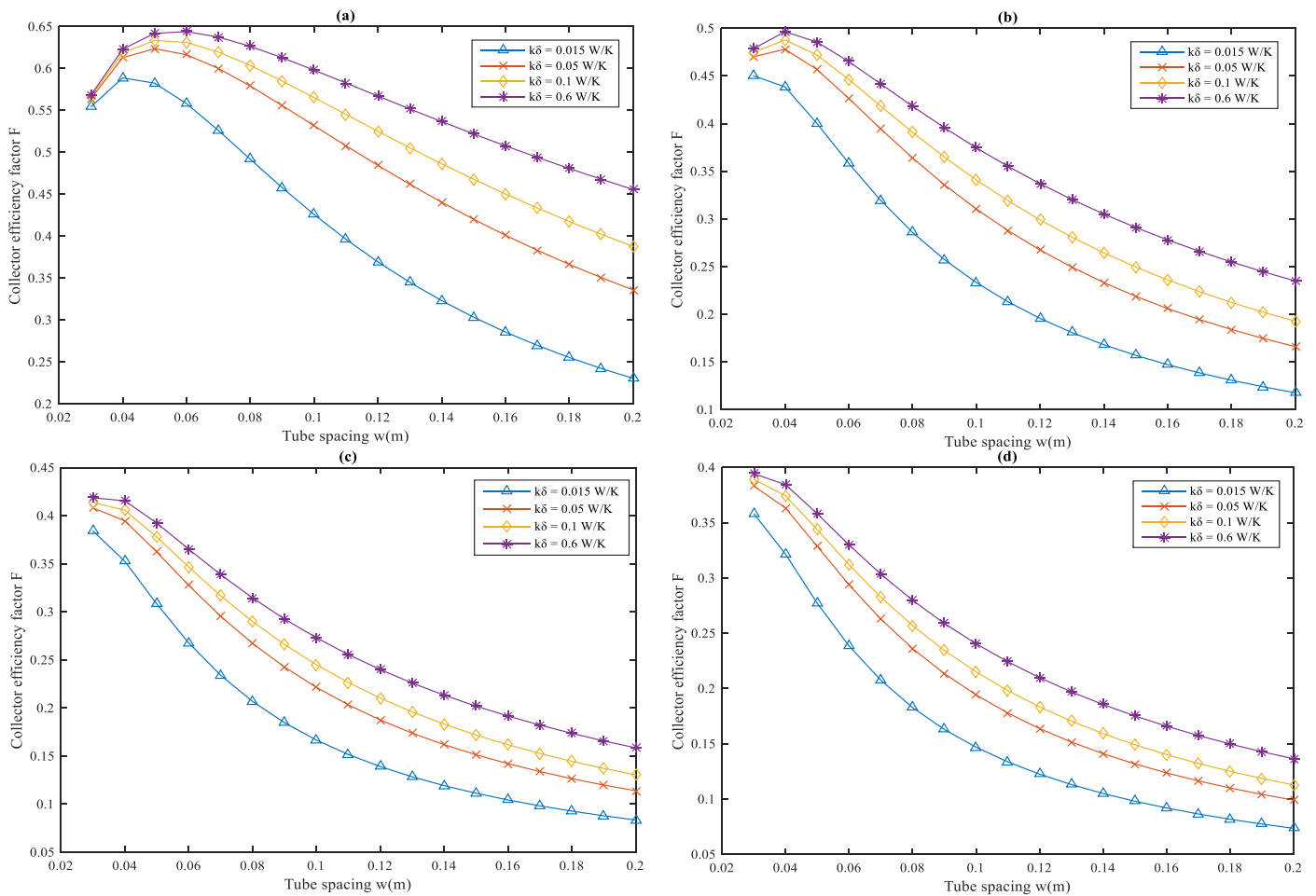


Figure 3.1 : Variation du facteur d'efficacité du collecteur de stockage en fonction de l'emplacement des tubes  $W$  pour différentes valeurs de  $K\delta$  avec a)  $h_c=15$ W/m<sup>2</sup>.K , b)  $h_c= 45$  W/m<sup>2</sup>.K , c)  $h_c = 75$ W/m<sup>2</sup>.K , d)  $h_c= 90$ W/m<sup>2</sup>/K.

La figure 1 nous montre que le coefficient de performance s'améliore avec la diminution du transfert de chaleur coefficient entre l'absorbeur et NANO- PCM.

On voit que la valeur du facteur d'efficacité du collecteur de stockage  $F'$  diminue avec la valeur de  $h_c$ , pour obtenir à les valeurs maximales de facteur d'efficacité du collecteur de stockage les valeurs de  $W$  comprise entre 0.03 et 0.06 m.

Alors,  $F'$  diminue progressivement avec l'espacement entre les tubes mais contrairement à les valeurs  $K\delta$ . Pour cela il faut toujours garder les tubes trop près les uns des autres même en utilisant une plaque absorbante à haute conductivité.

On voit clairement que la valeur du facteur d'efficacité du collecteur de stockage diminue lorsque le coefficient de transfert de chaleur entre l'absorbeur et le NANO-PCM augmenter.

3.3.2. Ecoulement turbulent :

Concernant le mode turbulent on prend  $h_{fi} = 300 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  ; la figure 2(a, b, c et d) montre la variation du facteur d'efficacité du collecteur de stockage en fonction  $W$  pour différentes valeurs de  $K\delta$  pour les valeurs de a)  $h_c = 15 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  , b)  $h_c = 30 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  ,

c)  $h_c = 60 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  , d)  $h_c = 90 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ .

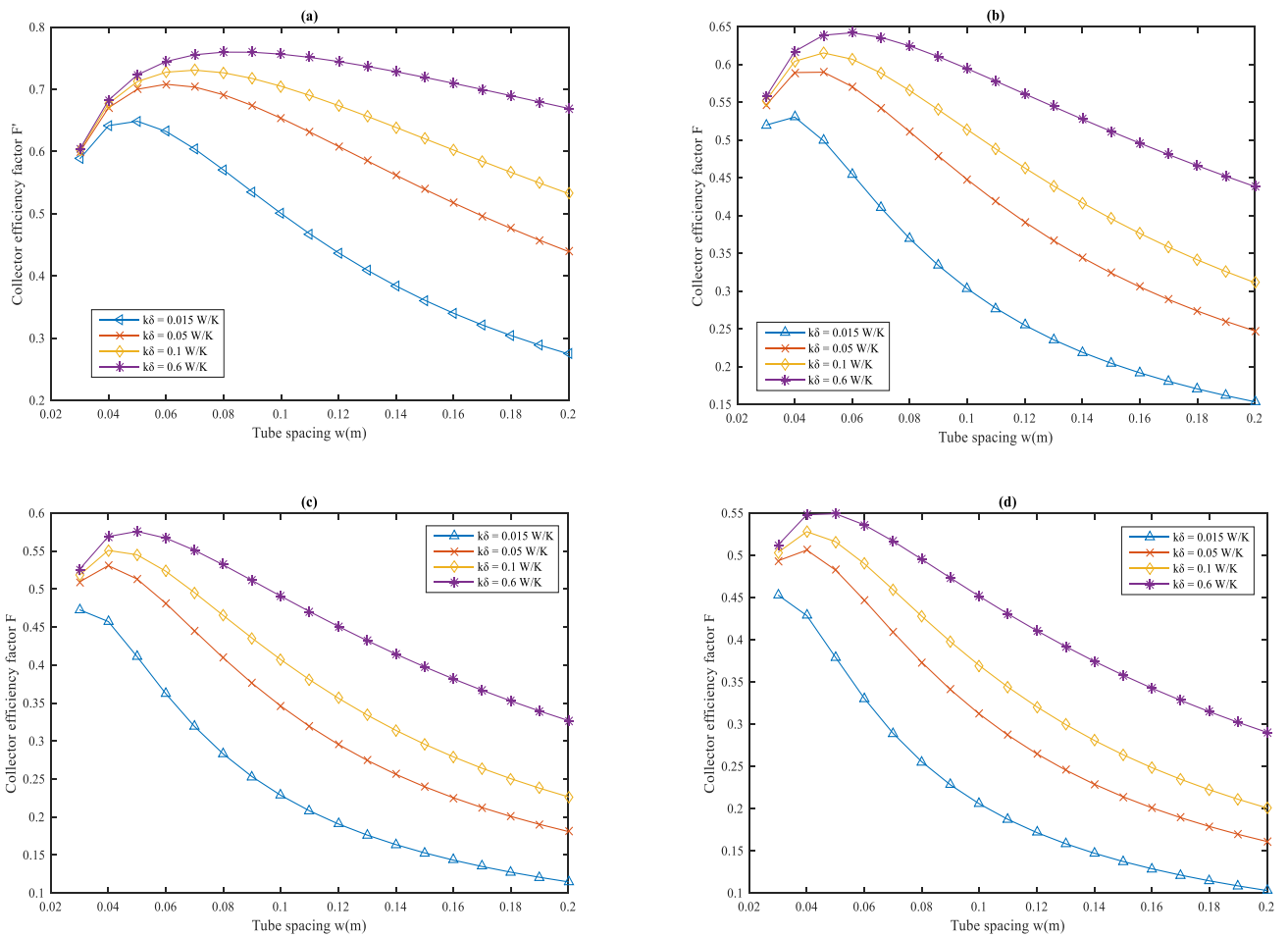


Figure 3.2 : Variation du facteur d'efficacité du collecteur de stockage en fonction de l'espacement de tubes  $W$  pour différentes valeurs de  $K\delta$  avec a)  $h_c = 15 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  , b)  $h_c = 30 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  , c)  $h_c = 60 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  , d)  $h_c = 90 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ .

On regard toujours que la valeur du facteur d'efficacité du collecteur de stockage  $F'$  diminue avec la valeur  $h_c$ . Dans ce cas, on obtient des valeurs maximales de  $F'$  pour les valeurs de  $W$  comprise entre 0.04 et 0.08 m.

Nous avons toujours à  $F'$  diminue avec les valeurs de  $W$  l'espacement des tubes mais contrairement avec les valeurs de  $K\delta$ .

Dans ce cas d'écoulement turbulent, on observe que le facteur d'efficacité diminue lentement avec l'évolution progressif des tubes d'espacement  $W$  également, le coefficient  $h_c$  augmente avec la diminution de valeur de facteur d'efficacité  $F'$ .

### 3.3.3. Ecoulement très turbulent :

Arrivé le cas d'un écoulement très turbulent en prenant  $h_f = 1000 \text{ W/m}^2\text{K}$  ;les figures 3(a ,b,c et d) montrent variation du facteur d'efficacité du collecteur de stockage en fonction de  $W$  pour différentes valeurs successives de a)  $h_c=15\text{W/m}^2.\text{K}$ , b)  $h_c= 30 \text{ W/m}^2.\text{K}$ , c)  $h_c=60\text{W/m}^2.\text{K}$  , d)  $h_c=90\text{W/m}^2.\text{K}$ .

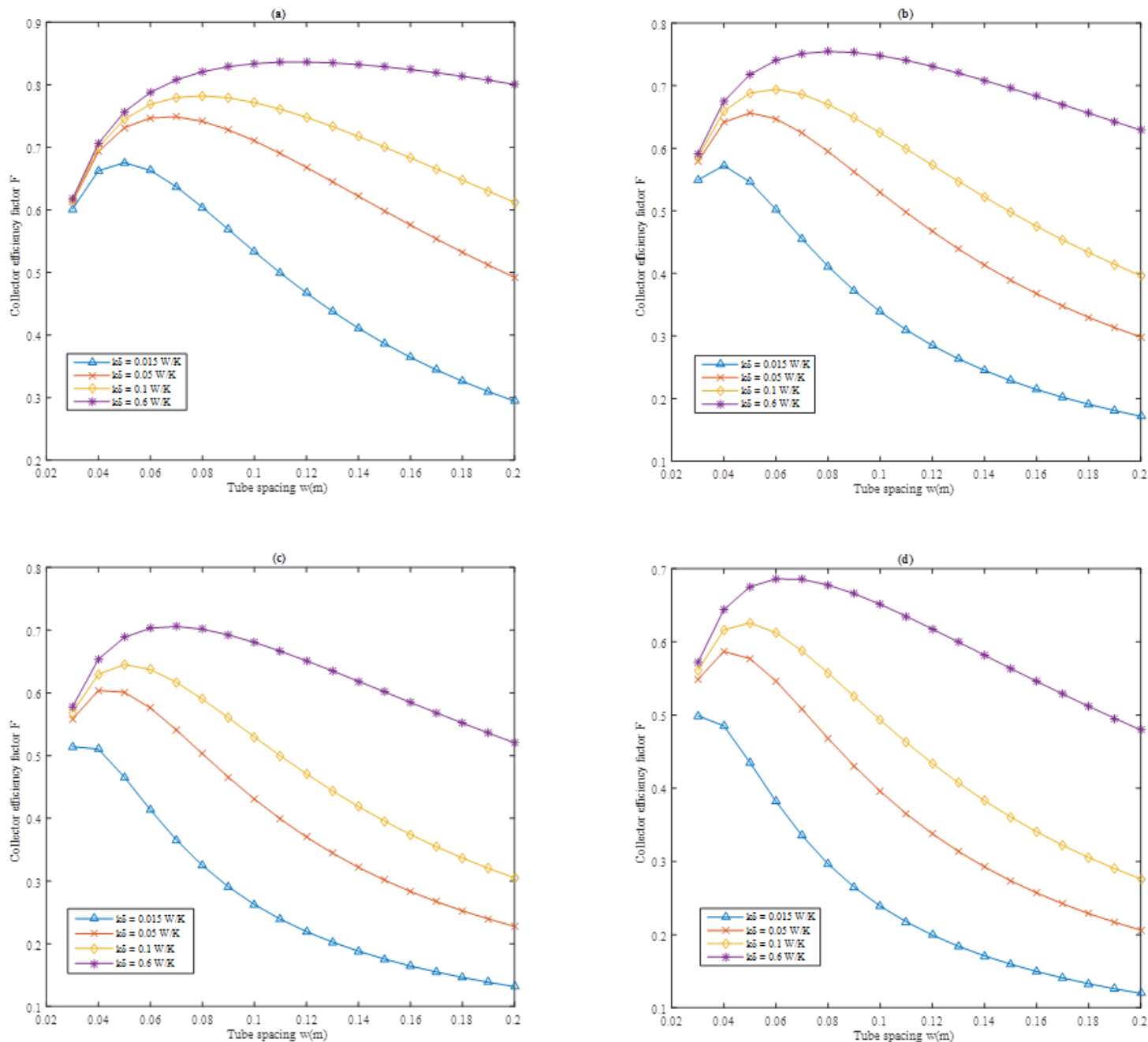


Figure 3.3 : Variation du facteur d'efficacité du collecteur de stockage en fonction de l'espacement des tubes  $W$  pour différentes valeurs de  $K\delta$  avec a)  $h_c=15 \text{ W/m}^2.k$  ,  
 b)  $h_c=30\text{W/m}^2.K$  , c)  $h_c=60 \text{ W/m}^2.K$  , d)  $h_c=90\text{W/m}^2.K$ .

Dans le cas d'un écoulement très turbulent, on Remarque que  $F'$  augmente le colis avec l'augmentation de valeur  $K\delta$  mais contrairement avec l'espacement des tubes.

En résumé, nous pouvons conclure que  $F'$  le facteur d'efficacité du collecteur de stockage diminue également avec l'augmentation de  $h_c$  du coefficient de transfert de chaleur entre l'absorbeur le NANO-PCM liquide.

La diminution en  $F'$  est dû au fait que  $h_c$  représente une perte d'énergie thermique qui récupérée par le NANO-PCM, mais cette diminution est compensée par l'augmentation de la chaleur emmagasinée qui sera utilisée pendant le mode de décharge.

### 3.4. Comparaison entre le mode de charge et le mode de décharge:

Nous avons comparé le mode de charge et le mode de décharge pour le meilleur cas

Laminaire, turbulent et très turbulent où  $h_c = 15W/m^2.K$

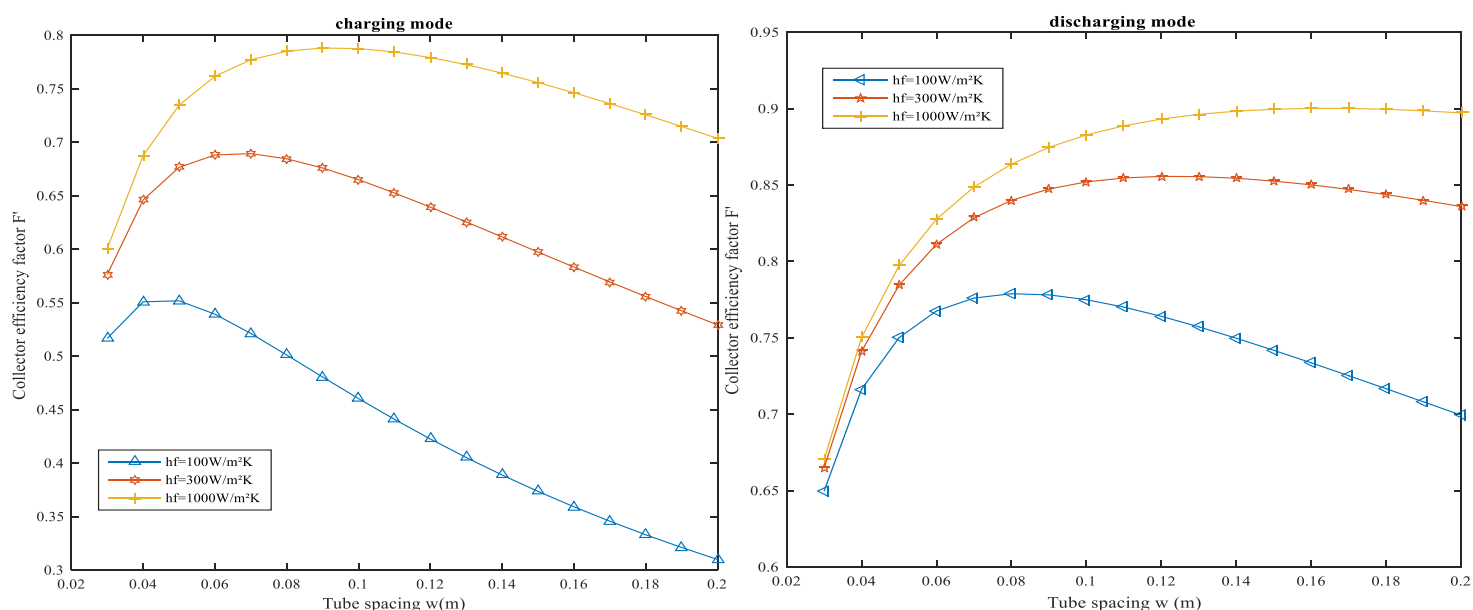


Figure 3.4 : Variation de l'efficacité du collecteur de stockage facteur d'efficacité en fonction de l'espacement des tubes  $W$  pour différents modes de débit avec  $h_c = 15W/m^2.K$ ; modes de charge et de décharge.

En mode de décharge, le facteur d'efficacité du collecteur de stockage augmentera avec l'augmentation de l'espacement des tubes. Lorsqu'il s'agit d'un écoulement très turbulent, le facteur d'efficacité atteint 0,9 pour le collecteur de stockage. Cependant, en mode décharge, on remarque que  $F'$  dépasse celui en mode charge en raison de l'énergie récupérée par le NANO-PCM, qui transformée en chaleur stockée et utilisée pendant le mode de décharge.

### 3.5. Conclusion :

Le présent travail donne une analyse thermique du capteur de stockage solaire à base de NANO-PCM.

- Les résultats montrent que les meilleures performances sont obtenues pour un espacement de 0,04 à 0,06 mm entre les tubes.
- Le facteur d'efficacité du collecteur de stockage diminue également avec l'augmentation du coefficient de transfert de chaleur entre l'absorbeur et le liquide NANO-PCM.
- Cela est dû au fait que le coefficient de transfert de chaleur représente une perte d'énergie thermique récupérée par le NANO-PCM, mais cette diminution est compensée par l'augmentation de la chaleur stockée qui sera utilisée pendant le mode de décharge.
- L'utilisation de NANO-PCM avec une chaleur spécifique élevée a conduit à l'augmentation de la densité d'énergie thermique, permettant une diminution de la taille du stockage d'énergie système thermique et une réduction du nombre de soudures.
- Minimiser la taille du TES réduit les coûts du système TES.
- En outre, le facteur d'efficacité en mode de décharge dépasse celui en mode de charge, car l'énergie récupérée par le NANO-PCM est transformée en chaleur stockée utilisée pendant le mode de décharge.



## CONCLUSION GENERALE

## CONCLUSION GENERALE

Nous avons analysé le capteur stockeur solaire à partir des équations (28) et (35) où elles sont similaires aux équations HWB du capteur plan. Les équations équivalentes de HWB dépendent de la température de fusion du nano-MCP et du coefficient de transfert de chaleur ( $h_c$ ) entre la plaque absorbante et le nano-MCP liquide. Dans les équations HWB modifiées, le terme du rayonnement solaire  $S$  a été remplacé par le terme  $[S + h_c (T_m - T_a)]$ .

Pendant la décharge il a été remplacé par le terme  $(C_1 T_m - C_2 T_a)$ , où  $C_1$  et  $C_2$  relient les coefficients de transfert de chaleur et de conduction dans l'air entre la zone de fusion et la zone de congélation. Dans l'équation (7) du capteur stockeur, le coefficient des pertes totales de chaleur ( $U_L$ ) pour un capteur plan normal a été remplacé par  $(U_{il} + h_c)$ , qui est la combinaison des effets de perte de chaleur au-dessus de la plaque absorbante et le gain de chaleur du nano-MCP.

Le facteur d'efficacité de l'ailette  $F$  et le facteur d'efficacité  $F'$  du capteur stockeur ont des valeurs plus basses que dans un capteur plan [ équations (23) et (27) ] pour cela on doit toujours gardés les tubes trop près l'un à l'autre même en utilisant une plaque absorbante d'une conductibilité élevé. D'une façon générale le volume d'un MCP diminue quand la congélation se produit, une cavité d'air est alors formée entre l'absorbeur et la couche solide du MCP. Le rôle du capteur solaire thermique est d'absorber un maximum d'énergie solaire avec le moins de pertes par refroidissement possible, puis de faire passer cette chaleur dans le MCP, qui chauffera ensuite l'eau sanitaire ; pour cela il faut réduire l'espace d'air produit à l'issue de la congélation du MCP en mode de décharge.

## Résumé :

Le capteur stockeur solaire est un dispositif qui consiste à collecter et emmagasiné l'énergie thermique solaire à l'aide d'un matériau à changement de phase. Ce capteur est formé de trois zones stratifiées dans la nuit et deux zones stratifiées dans la journée. Le but du présent travail est de calculer le facteur d'efficacité du capteur stockeur dans plusieurs cas d'où on doit déterminer le profil vertical de la température dans une couche donnée du capteur stockeur en fonction du temps d'échauffement de celui-ci. Le modèle mathématique adopté dans ce travail est basé sur l'équation de la conduction de la chaleur avec une source d'énergie extérieure au système (soleil). L'intensité de la source a été évaluée statistiquement sur une période des dix dernières années à partir des données météorologiques de la station des salines de la ville d'Annaba. L'approche de résolution numérique du modèle mathématique adopté repose sur la discrétisation de l'équation de la chaleur en utilisant la méthode des différences finies avec des conditions initiales et aux limites appropriées.

**Mots clés :** matériau à changement de phase, capteur stockeur solaire, distribution de la température, discrétisation, convergence.

## Abstract:

The solar basin is a basin made of the phase-changing materials that collects and stores thermal solar energy by its organic and inorganic properties and eutectics. It consists of three regions at night and two regions during the day. The aim of this research is to calculate the efficiency coefficient of this solar collector that stores thermal energy, and this is done by finding the vertical distribution of temperature in a certain layer of the basin in terms of the time of heating the basing. The mathematical model used in this research is based on the differential equation of heat transfer with the presence of an external heat source for the studied system, which is the sun note that a statistical estimate of the intensity of solar illumination (formed by the heat source) was made using meteorological data located in the city of Annaba during the last ten years. The numerical solution of the differential equation for temperature depends on the use of appropriate initial and boundary values.

**Keywords:** phase change materials, solar collector cum storage, thermal distribution , shredding , stability cohesion.

## ملخص

إن الحوض الشمسي هو عبارة عن حوض مصنع من مواد متغيرة المرحلة وهو يقوم بجمع وتخزين الطاقة الشمسية الحرارية بواسطة خواصه العضوية والغير العضوية وسهولة الانصهار. وهو يتكون من ثلاثة مناطق ليلا ومنطقتين نهارا الهدف من هذا البحث هو حساب معامل الفعالية لهذا الملتقط الشمسي المخزن للطاقة الحرارية وذلك بإيجاد التوزيع العمودي لدرجة الحرارة في طبقة معينة من الحوض بدلالة زمن تسخين الحوض. النموذج الرياضي المتبع في هذا البحث مرتكز على المعادلة التفاضلية للنقل الحراري مع وجود مصدر حراري خارجي للنظام المدروس وهو الشمس. علما انه تم التقدير الإحصائي لشدة الإضاءة الشمسية (المشكلة للمصدر الحراري) باستخدام معطيات الأرصاد الجوية الكائنة بمدينة عنابة خلال العشر سنوات الأخيرة. الحل العددي للمعادلة التفاضلية للحرارة يعتمد على استخدام القيم الابتدائية والحدية المناسبة.

**الكلمات المفتاحية :** مواد متغيرة المرحلة-الحوض الشمسي- الملتقط الشمسي المخزن للطاقة الحرارية -التوزيع الحراري-التقطيع-الاستقرار- التماسك