



Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd
Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique



Thèse

Présentée pour l'obtention du diplôme de :
Doctorat en Sciences en Génie Mécanique
Option : Energétique

Sous le Thème :

**Contribution à l'étude des Transferts Thermiques lors de la
Solidification d'un Liquide dans un Capteur Solaire**

Présentée par :

GUERRAICHE Djemaa

Devant le jury composé de :

M. BENMOUSSA Houcine	Prof.	Université de Batna2	Président
M. BOUGRIOU Cherif	Prof.	Université de Batna2	Rapporteur
M. MEBARKI Ghazali	MCA.	Université de Batna2	Examineur
M. DJOUIMAA Siham	Prof.	Université de Batna1	Examinatrice
M. KHALDI Fouad	Prof.	Université de Batna1	Examineur
M. RAHMANI Kouider	MCA.	Université de Djelfa	Examineur

2020

Dédicace

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

Ma très chère mère, cette femme qui m'a donnée tous dans ma vie, l'amour, le courage, et la volonté. 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; son sacrifice illimité ; son réconfort moral.

Mes deux anges : Wassim et Soundouce.

Mes très chères sœurs : Fatiha, Samia et Hadda.

Mes chers frères : Khelifa, Hachemi, Mohamed Hachemi, Djamel, Mourad, Hamza et mes belles sœurs.

Mes nièces : Zeineb, Boutheina, Kanza, Amina, Khouloud, Houda, Kawla, Imen, Halima, Ikram, Basma, Amouna, Djouri, Hanene, Hanine, Sousou, Soumia, Meriem, Loulou, Amani, Soujoud, Fariha, Nour, Asma, Hidaya, Amani, Malak, Ilheme, Inssaf, Tesnime, Assil et Mélina.

Mes neveux : Mohamed, Naiime, Houcem, Achraf, Fouad, Anis, , Seif, Taha, Yahia, Youcef, Aymen, Amine, Khaled, Raouf, Islem, Aboudi, Ahmed, Ayoub, Oussama, Moncef, hamoudi, Anes, Khalil, Zakaria et Djaoued.

A toute ma grande famille sans exception.

Remerciements

Je remerciés Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage, la force et la volonté pour réaliser ce travail.

L'aboutissement de cette thèse a été rendu possible grâce à la contribution de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner ma profonde gratitude. Le projet de recherche en doctorat a été entièrement une occasion enrichissante de rencontre et d'échanges avec de nombreux intervenants. Ces personnes, à qui je dois beaucoup, ont apporté une majeure contribution et une orientation dans le bon sens à mes recherches.

Je remercie particulièrement mes deux enfants, Wassim et Soundouce, qui m'ont tant encouragé et soutenu, qui ont su être patients tout au long de l'acheminement de cette thèse, et qui ont supporté mon absence et mes occupations loin d'eux.

Je voudrais adresser toute ma gratitude à mon directeur de thèse, le Professeur Bougriou Cherif, pour sa disponibilité, sa patience et surtout sa confiance en mes capacités. Je le remercie sincèrement pour avoir dirigé mes travaux avec intérêt et passion, pour que j'ai pu mener mes recherches à terme dans des conditions très enrichissantes et satisfaisantes.

Je tiens à remercier sincèrement le Professeur, Loreto Valenzuela Gutiérrez, Chef de l'unité de recherche des systèmes de concentration solaire de plate-forme solaire d'Almería (Espagne), d'avoir partagé ses connaissances scientifiques. Grâce à ses conseils techniques et scientifiques et ses idées claires et enrichissantes ont permis d'apporter une contribution positive et une amélioration majeure à la qualité de ce travail.

Je désire aussi remercier fortement mon frère Dr Guerraiche khelifa pour son aide et son accompagnement son soutien morale, ses conseils qui m'ont fourni les outils en génie nécessaires à la réussite.

Mes remerciements à mon cher frère: Djamel qui a participé à la réalisation du dispositif expérimental et qui a mis à ma disposition tout les outils nécessaires au sein de son atelier.

Mes remerciements à monsieur Pr.Zied DRISS Professor at National School of Engineers of Sfax avec qui j'ai eu la chance de pouvoir travailler. Sa rigueur, sa capacité d'analyse des problèmes et ses très nombreuses connaissances m'ont permis de progresser. Merci aussi pour ses nombreuses relectures et corrections de mon anglais désastreux durant la rédaction de l'article. Il a toujours répondu présent, même dans les cas les plus désespérés. Merci.

Je tiens à adresser mes plus sincères reconnaissances et remerciements aux membres du jury, Monsieur BENMOUSSA Hocine, Professeur au département de Mécanique de l'université Batna2, Monsieur MEBARKI Ghazali, Docteur à l'université Batna2, madame DJOUIMAA Siham Professeur au département de physique de l'université Batna1, Monsieur KHALDI Fouad, Professeur au département de physique de l'université Batna1 et Monsieur RAHMANI Kouider, Docteur à l'université Djelfa de m'avoir fait l'honneur d'assister à la soutenance.

Je tiens à remercier tout particulièrement ma très chère amie BAKHOUCHE Fatiha de m'avoir commandé et livré le miroir réflecteur via le site internet. Merci.

Je dois également un très grand remerciement au Dr Naoune de département de Mécanique université Batna2 d'avoir mis à notre disposition les tubes en pyrex, qui nous a facilité la tâche afin de réaliser les tubes absorbeurs.

Mes remerciements à monsieur HACENE.A, technicien au CUB et aux étudiants de M2 monsieur DABECHI Rabeh et monsieur BOUTAHRA Ayoub et mademoiselle OUAZENE Hasna.

Mes remerciements vont également aux nombreuses personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail et à tous ceux qui m'ont enrichi de leur connaissance, je voudrais leurs exprimer ici toute ma sympathie.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : MATERIAUX DE CHANGEMENT DE PHASE ET LEURS APPLICATIONS DANS LES CAPTEURS SOLAIRES	
1.1. Introduction	5
1.2. Stockage d'énergie:.....	5
1.2.1 Types de stockage d'énergie	5
1.2.1.1 Stockage par chaleur sensible	6
1.2.1.2 Stockage par chaleur latente	7
1.2.2 Stockage thermochimique	7
1.2.3 Stockage chimique	8
1.2.4 Comparaison des différents types de stockage	8
1.3 Classification des matériaux à changement de phase.....	10
1.3.1. MCP inorganique	11
1.3.1.1. Sels hydratés.....	11
1.3.1.2. Métaux	12
1.3.2 MCP Organiques	13
1.3.3 MCP eutectiques	13
1.3.4 Etude comparative des composés organiques et inorganiques	15
1.4 Domaines d'applications des MCP	16
1.4.1 Transport de produits alimentaires	16
1.4.2 Applications médicales	16
1.4.3 MCP dans Textile.....	16
1.4.4 MCP en réfrigérateur domestique	17
1.4.5 Le MCP en refroidissement des composants électroniques	18
1.4.6 Rafraichissement d'air à l'aide des MCP	20
1.4.7 Stockage de l'énergie solaire par MCP	20
1.4.8 Isolation des bâtiments	21
1.4.9 Préchauffer les moteurs à combustion	21
1.5. Différentes formes des conteneurs de PCM	22
1.5.1. Méthodes de conditionnement des MCP dans les applications de stockage thermique	23
1.6. Aperçu bibliographique sur les MCP dans les capteurs solaires.....	26
1.7. Théorie des concentrateurs cylindro-paraboliques.....	37
1.7.1. Introduction	37
1.7.2 Modes de captations	38
1.7.2.1 Comparaison entre les deux modes de captation	39
1.7.3 Importance de la concentration solaire.....	40
1.7.4 Types des concentrateurs solaires	40
1.7.5 Description et principe de fonctionnement du concentrateur (CCP)	43
1.7.5.1 Collecteur	43
1.7.5.2. Couverture transparente (le verre).....	43
1.7.5.3. Réflecteur	44
1.7.5.4. Tube absorbeur	44
1.7.5.5. Fluide caloporteur HTF	46
1.7.6. Modes d'orientation d'un CCP	46
1.8. Capacité globale des CSP à installer sur la période 2015-2021 en Algérie	48
1.9. Promesses et avenir des concentrateurs solaires Cylindro paraboliques.....	50

CHAPITRE 2 : THEORIES ET MODELISATION DES PROBLEMES DE LA SOLIDIFICATION /FUSION.....	
2.1. Introduction	52
2.2. Changement de phase solidification/fusion	52
2.2.1. Processus du changement de phase solidification/fusion	53
2.3. Forme d'interface solide/liquide	54
2.4. Physique du problème de changement de phase	55
2.4.1 Température de fusion	55
2.4.2 La chaleur latente de changement de phase	55
2.4.3 Solidification-fusion d'un produit pur	56
2.4.4 Solidification-fusion d'un mélange homogène	57
2.5 Phénomène de changement de phase (coté hermique).....	57
2.5.1 Thermodynamique du changement de phase	57
2.5.2 Cinétique du changement de phase	58
2.5.2.1 Problèmes liés au changement de phase (solidification/fusion).....	59
2.5.3 Problème de Stefan 1D (transfert purement conductif)	60
2.5.3.1 Mise en équations	60
2.6 Méthode de résolution	62
2.6.1 Introduction	62
2.6.2 Méthodes analytiques	63
2.6.2.1 Solution exacte	63
2.6.2.2 Solutions approchées	64
2.6.3 Méthodes numériques	66
2.6.3.1. Méthodes suivant l'interface	66
2.6.3.2. Méthodes à domaine fixe	68
2.7 Modélisation de la solidification par différences finies	73
2.7.1 Introduction	73
2.7.2 Modélisation physique du problème	73
2.7.2.1 Hypotheses	74
2.7.3 Matériaux de changement de phase utilisés	76
2.7.4 Formulation Mathématique, Approche 1D	76
2.7.5 Méthode de résolution.....	78
2.7.5.1 Méthode analytique	78
2.7.5.2 Méthode numérique	80
2.7.6 Procédure de résolution	85
2.7.6.1 Algorithme et stratégie de résolution	82
2.8. Résultats et interprétation	87
2.8.1 Front de solidification en fonction de temps	87
2.8.2 Evolution des températures dans le maillage	89
2.8.3 L'évolution des températures dans le cylindre en fonction de temps	87
Conclusion	
CHAPITRE 3 : SIMULATION NUMERIQUE DU STOCKAGE DE L'ENERGIE THERMIQUE PAR CHALEUR LATENTE	
3.1. Introduction	92
3 .2. Problématique.....	92
3 .2.1 <i>Simulation</i> d'une unité de stockage thermique (LHS) double concentrique tube	93
3.3. Modèle physique	94
3 .3.1. Hypothèses générales	96
3.3.2. Conditions aux limites	96
3. 4. Modèle mathématique	96
3.5. Principales étapes pour définir le problème en CFD	99

3.5.1. Présentation du logiciel ANSYS	99
3.5.2. Créer un système d'analyse fluide Flow 3D	93
3.6. Effet des paramètres physiques et géométriques sur les performances de stockage	103
3.6.1. Cas de tube horizontal	103
3.6.1.1. Effets de la température d'entrée du fluide caloporteur HTF	103
3.6.1.2. Effets de débit du fluide caloporteur (HTF)	107
3.6.1.3. Effets du diamètre de tube	110
3.6.2. Cas de tube vertical	110
3.6.2.1. Effet de gravité	110
3.6.3. Analyse des fronts de fusion (position horizontale et verticale)	112
3.7 Simulation de l'unité de stockage de chaleur à triple tube concentrique tubes.....	114
3.7.1. Modèle physique	114
3.7.2. Méthodologie de calcul	115
3.7.3. Matériaux utilisés	115
3.7.3.1 Matériau à changement de phase	115
3.7.4 Processus de transfert de chaleur en MCP	116
3.7.4.1. Processus de changement de phase	116
3.7.4.2. Conductivité thermique variable avec changement de phase	116
3.7.4.3. Masse volumique variable avec la température	116
3.7.4.4. Conditions initiales et aux limites	116
3.7.4.5. Paramètres de la solution convergée	117
3.7.4.6. Choix du maillage	118
3.7.5. Résultats et interprétations	119
A. Cas de charge (fusion).....	119
B. Cas de décharge (solidification)	128

CHAPITRE 4 : ÉTUDE EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE D'UN COLLECTEUR SOLAIRE UTILISANT LE MATERIAU A CHANGEMENT DE PHASE

4.1. Introduction	137
4.2. Objectif.....	137
4.3. Prototype du concentrateur cylindro-parabolique (PTC)	137
4.3.1. Dimensionnement de la courbe	138
4.4. Etapes de réalisation du prototype CCP	141
4.4.1. Réalisation du réflecteur.....	141
4.4.2. Structure de support	141
4.4.3. Conception du tube absorbeur	145
4.4.4. Choix du MCP.....	147
4.4.5. Acquisition des données et instruments de mesures	148
4.5. Déroulement de l'expérience	152
4.5.1. Réglage du système	152
4.5.2. Affichage des résultats	154
4.6. Model numérique et formulation mathématique	155
4.6.1. Analyse thermique.....	155
4.6.1.1. Bilan énergétique	155
4.6.2. Évaluation des performances optique et thermique du CCP.....	158
4.6.2.1. Modélisation optique (Méthode de Monte-Carlo (ray tracing) (MCRT))	159
4.6.2.2. Présentation de code SolTrace	159
4.6.2.3. Méthodologie et étapes d'application du SolTrace	160
4.6.3. Résultat optique.....	163
4.6.4. Exploitation des résultats du code Soltrace.....	165

4.6.5. Etude thermique (Modélisation CFD).....	.167
4.7. Résultats et discussions168
4.7.1. Résultats expérimentaux168
A. Distribution des températures du PCM et de l'eau168
B. Efficacité du système.....	.173
4.7.2. Résultats de la modélisation CFD176
A. Progrès du front de la fusion et variation de température178
B. Effet de la température d'entrée de l'eau (HTF)178
4.8 Validation du modèle	174
CONCLUSION GENERALE	

LISTES DES TABLEAU :

CHAPITRE 1		
Tableau 1. 1	Sels hydratés les plus prometteurs	12
Tableau 1. 2	Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques métalliques.	13
Tableau 1. 3	Propriétés thermiques de certains MCP	14
Tableau 1. 4	Caractéristiques de quelques MCP inorganiques	14
Tableau 1. 5	Caractéristiques de quelques MCP organiques	15
Tableau 1. 6	Avantages et inconvénients des MCP	15
Tableau 1. 7	Comparaison entre capteur solaire plan et un concentrateur solaire	40
CHAPITRE 2		
Tableau 2. 1	Valeurs de nombre de Stefan pour différents MCP	62
Tableau 2. 2	Différents modèles numériques classés en deux catégories modèles suivant l'interface et modèles avec domaine fixe	66
Tableau 2. 3	Caractéristiques physiques des MCP utilisés	76
CHAPITRE 3		
Tableau 3. 1	Caractéristiques géométriques	94
Tableau 3. 2	Propriétés de l'eau	95
Tableau 3. 3	Propriétés du cuivre (tube intérieur)	95
Tableau 3. 4	Propriétés de l'aluminium (tube extérieur)	95
Tableau 3. 5	Caractéristiques physiques des MCP utilisés	95
Tableau 3. 6	Les étapes nécessaires pour une simulation dans ANSYS (Workbench)	99
Tableau 3. 7	Mise en données en Fluent	101
Tableau 3. 8	Caractéristiques géométriques	114
Tableau 3. 9	Configuration pour la simulation FLUENT	115
Tableau 3. 10	Propriétés thermophysiques de l'eau et MCP	115
Tableau 3. 11	Temps de la fusion et de la solidification pour les deux types de MCP	133
CHAPITRE 4		
Tableau 4. 1	Données géométriques du capteur cylindro-parabolique	138
Tableau 4. 2	Caractéristiques géométriques du réflecteur	141
Tableau 4. 3	Caractéristiques optiques du réflecteurs (S-Reflect)	144
Tableau 4. 4	Caractéristiques physiques du matériau du réflecteur	144
Tableau 4. 5	Caractéristique optique du réflecteur	144
Tableau 4. 6	Paramètres Géométriques du collecteur et du tube absorbeur	146
Tableau 4. 7	Propriétés du matériau de changement de phase sélectionné	147
Tableau 4. 8	Propriétés optiques du concentrateur de notre étude	161
Tableau 4. 9	Erreur moyenne absolue en pourcentage (MAPE) pour l'énergie utile et la température de sortie	172
Tableau 4. 10	Rendement thermique journalier du système avec et sans PCM	173
Tableau 4. 11	MAPE CDF et expérimentale de l'énergie stockée	183

LISTE DES FIGURES:

Chapitre1

Figure1.1	Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état	06
Figure1.2	Techniques de stockage de l'énergie thermique	08
Figure1.3	Volume requis pour le stockage de 6,7 MJ	09
Figure1.4	Densité énergétique pour les différents types de stockage	10
Figure1.5	Classification des PCM suivant les matériaux de stockage de chaleur	10
Figure1.6	MCP dans le transport de produits alimentaires	16
Figure1.7	Récipient pour transporter le sang et les organes contiennent MCP	16
Figure1.8	Principe du textile avec MCP	17
Figure1.9	(a) Réfrigérateur normale, (b) Réfrigérateur avec (MCP)	18
Figure1.10	Exemple d'un processeur refroidi par un MCP	19
Figure1.11	Schéma de principe de la gestion thermique d'une puce électronique avec MCP	19
Figure1.12	Echangeur de chaleur à MCP	20
Figure1.13	Stockage de l'énergie dans un capteur solaire utilisant un MCP	21
Figure1.14	Exemple d'utilisation d'un MCP dans les bâtiments	21
Figure1.15	Préchauffer les moteurs à combustion utilisant un MCP	22
Figure1.16	Conteneurs de MCP et la configuration du MCP par rapport HTF.(a) tube et calandre ; (b) récipient cylindrique; (c) récipient rectangulaire	22
Figure1.17	Conditionnement des MCP	23
Figure1.18	Procédé micro encapsulés	24
Figure1.19	Photographies de macro encapsulation de diverses géométries	25
Figure1.20	Schéma du capteur solaire et de ses parties	27
Figure1.21	Représentation schématique de l'appareil expérimental	28
Figure1.22	Unité de stockage par changement de phase	29
Figure1.23	Schéma d'un collecteur solaire avec PCM	29
Figure1.24	Schéma de principe du dispositif	29
Figure1.25	Schéma du système utilisant	30
Figure1.26	Schéma d'une unité collecteur/stockage	31
Figure1.27	Panneaux photovoltaïques (PV) avec MCP	31
Figure1.28	Concept et géométrie	32
Figure1.29	Description du système avec et sans PCM	32
Figure1.30	Schéma de la géométrie du récepteur	33
Figure1.31	Vue du récepteur d'essai avec et sans PCM	33
Figure1.32	Absorbeur d'une batterie thermique	34
Figure1.33	Distillateur solaire couplé avec un capteur solaire avec MCP	34
Figure1.34	Réflecteur parabolique couplé à un distillateur solaire	35
Figure1.35	Configuration de chauffage solaire de l'air	35
Figure1.36	Capteur plan	38
Figure1.37	Type des concentrateurs solaires	39
Figure1.38	Mode direct	39
Figure1.39	Mode indirect	39
Figure1.40	Concentrateur parabolique	41
Figure1.41	Central à tour	41
Figure1.42	Principe de captation du rayonnement du cylindre-parabolique	43
Figure1.43	Composants d'un concentrateur cylindro-parabolique	38

Figure1.44	Miroir cylindro parabolique	44
Figure1.45	Structure de l'absorbeur	45
Figure1.46	Schéma d'un élément du tube absorbeur	45
Figure1.47	Transfert thermique entre les différentes parties de l'absorbeur	46
Figure1.48	Les modes de poursuite solaire d'un CCP	47
Figure1.49	Centrale hybride de Hassi R'mel	49

Chapitre 2

Figure 2.1	Différentes microstructures de l'interface liquide/solide	54
Figure 2.2	Evolution de la chaleur en fonction de la température pour un corps pure	55
Figure 2.3	Solidification d'une substance pure dans un milieu semi infini	56
Figure 2.4	Solidification d'un produit homogène	57
Figure 2.5	Processus de fusion/solidification	58
Figure 2.6	Solidification et surfusion	59
Figure 2.7	Evolution de l'interface liquide-solide, problème température de paroi imposée	64
Figure 2.8	Evolution de l'interface dans un cylindre soumis à une température de la paroi externe constante	65
Figure 2.9	Géométrie du problème	74
Figure 2.10	Caractéristiques physiques de MCP	75
Figure 2.11	caractéristiques physiques de MCP	77
Figure 2.12	Représentation de front de solidification $S(t)$	78
Figure 2.13	Discrétisation du maillage	82
Figure 2.14	Condition à la limite à $X=0$	74
Figure 2.15	Condition à la imite à $X=L$	74
Figure 2.16	Schéma fonctionnel de l'algorithme de résolution	86
Figure 2.17	Evolution du front de solidification de paraffine	88
Figure 2.18	Evolution du front de solidification de d'ErythroL	88
Figure 2.19	Variation de la température de paraffine	89
Figure 2.20	Variation de la température d'Erythrol	89
Figure 2.21	Variation de la température en fonction du temps de la Paraffine	90
Figure 2.22	Variation de température en fonction du temps de l'Erythrol	90

Chapitre3

Figure 3.1	Position horizontale et la position verticale du double tube concentrique	93
Figure 3.2	Unité de stockage	94
Figure 3.3	Conditions aux limites	96
Figure 3.4	Interface DesignModeler (workbench)	99
Figure 3.5	Interface ANSYS Meshing	100
Figure 3.6	Interface ANSYS Fluent	101
Figure 3.7	Interface Fluent exécution	96
Figure 3.8	Interface CFDPost	102
Figure 3.9	Positions axiales et radiales de suivi du front fusion /solidification	103
Figure 3.10	Contours axiaux de la fraction massique de MCP durant le processus de charge pour : $T_{ini}=80^{\circ}\text{C}$, $T_{ini}=75^{\circ}\text{C}$ et $T_{ini}=70^{\circ}\text{C}$, $m=0.024\text{kg/s}$	104

Figure 3.11	Contours radiaux de la fraction massique de MCP processus charge : (a) $T_{ini}=80^{\circ}\text{C}$, (b) $T_{ini}=75^{\circ}\text{C}$ et (c) $T_{ini}=70^{\circ}\text{C}$, $m=0.024\text{kg/s}$	105
Figure 3.12	Evolution temporelle de la température, positions axiales et radial, charge l'horizontale pour: (a),(b) $T_{inl}=85^{\circ}\text{C}$, (c),(d) $T_{inl}=75^{\circ}\text{C}$ et (e), (f) $T_{inl}=70^{\circ}\text{C}$	106
Figure 3.13	Evolution temporelle axiale de la température, pour la positions l'horizontale pour $T_{inl}=85^{\circ}\text{C}$: (a) $m=0.088\text{ kg/s}$ et (b) $m=0.12\text{ kg/s}$ cas de décharge	107
Figure 3.14	Contours radiaux de la fraction massique de PCM durant le processus de charge et décharge	109
Figure 3.15	Variation de temps de charge et de décharge en fonction de débit	109
Figure 3.16	Effet du diamètre de tube sur le temps de fusion du PCM	110
Figure 3.17	Contours radiaux de la fraction de masse et la température du PCM durant le processus charge $T_{inl}=85^{\circ}\text{C}$ $m=0.12\text{ kg/s}$	111
Figure 3.18	Le model physique en 3D	114
Figure 3.19	Le model physique en 2D	114
Figure 3.20	Schéma de l'unité de stockage	117
Figure 3.21	Maillage quadrilatéral structuré à multi blocs	118
Figure 3.22	Position des points 1,2 et 3	119
Figure 3.23	Contours de la température pour $\dot{m}=0.024\text{ Kg/s}$ et $T_{in}=50^{\circ}\text{C}$ (Charge) (RT35)	120
Figure 3.24	Contours de la température pour $\dot{m}=0.024\text{ kg/s}$ et $T_{in}=50^{\circ}\text{C}$ (charge) (RT50)	120
Figure 3.25	Contours de la masse fraction pour $\dot{m}=0.024\text{ Kg/s}$ et $T_{in}=50^{\circ}\text{C}$ (charge) (R35)	121
Figure 3.26	Contours de la masse fraction pour $\dot{m}=0.024\text{ Kg/s}$ et $T_{in}=50^{\circ}\text{C}$ (charge) (RT50).	121
Figure 3.27	Variation de la température (RT35) pour $T_{in}=50^{\circ}\text{C}$ et $\dot{m}=0.024\text{Kg/s}$ charge).	123
Figure 3.28	Variation de la température (RT50) pour $T_{in}=50^{\circ}\text{C}$ et $\dot{m}=0.024\text{Kg/s}$ (charge).	123
Figure 3.29	Variation de la fraction massique du MCP (RT50) en fonction du temps pour $T_{in}=50^{\circ}\text{C}$ et $\dot{m}=0.024\text{Kg/s}$ (charge)	124
Figure 3.30	Variation de la Fraction massique du (RT35) en fonction du temps pour $T_{in}=50^{\circ}\text{C}$ et $\dot{m}=0.024\text{Kg/s}$ (charge)	124
Figure 3.31	Temps de fusion pour différents températures d'entrée	125
Figure 3.32	Temps de fusion pour différents débits d'entrée : $\dot{m}=0.024\text{Kg/s}$	125
Figure 3.33	Evolution temporelle de l'énergie moyenne absorbée par (RT35), pour: $T_{int}=50^{\circ}\text{C}$, 60°C et 70°C , $\dot{m}=0,024\text{ kg / s}$, processus de charge.	126
Figure 3.34	Evolution de Nu moyenne du MCP (RT35) : $T_{int}=50^{\circ}\text{C}$, 60°C et 70°C , $\dot{m}=0,024\text{ kg / s}$ (charge)	127
Figure 3.35	Contours de la température $\dot{m}=0.024\text{ kg/s}$ $T=34^{\circ}\text{C}$ (RT35) décharge	128
Figure 3.36	Contours de la température $\dot{m}=0.024\text{ Kg/s}$ $T_{in}=34^{\circ}\text{C}$ (RT50) décharge	129
Figure 3.37	Contours de la masse fraction $\dot{m}=0.024\text{ kg/s}$ $T_{in}=34^{\circ}\text{C}$ (RT35) décharge	129
Figure 3.38	Contours de la masse fraction $\dot{m}=0.024\text{ kg/s}$ $T_{in}=34^{\circ}\text{C}$ (RT50) décharge	130
Figure 3.39	Comparaison entre les deux types de MCP:(a) pour RT35 et(b) RT50	130
Figure 3.40	Variation de la température du MCP (RT35) en fonction du temps pour $T_{in}=34^{\circ}\text{C}$ et $\dot{m}=0.024\text{ kg/s}$ (décharge)	132
Figure 3.41	Variation de la température du MCP (RT50) en fonction du temps	132

	pour $T_{in}=34^{\circ}\text{C}$ et $\dot{m}=0.024\text{ kg/s}$ (décharge)	
Figure 3.42	Variation de la fraction massique du MCP (RT35) en fonction du temps pour $T_{in}=34^{\circ}\text{C}$ et $\dot{m}=0.024\text{ kg/s}$ (décharge)	132
Figure 3.43	Variation de la fraction massique du MCP (RT50) en fonction du temps pour $T_{in}=34^{\circ}\text{C}$ et $\dot{m}=0.024\text{ kg/s}$ (décharge)	133
Figure 3.44	Fraction liquide pour les systèmes : double triple concentrique tube	135
Figure 3.45	Profil d'énergie totale stockée pour les systèmes de stockage à tube	135

CHAPITRE 4

Figure 4.1	Model du capteur solaire cylindro parabolique proposé	138
Figure 4.2	Interface du logiciel Parabolacalculator	139
Figure 4.3	Géométrie du concentrateur cylindro-parabolique	140
Figure 4.4	Géométrie du concentrateur cylindro-parabolique (a) schéma avec paramètres principaux (b) conception graphique	142
Figure 4.5	(a) Miroir S-ReflecT, (b) Différentes couches qui composent le miroir	143
Figure 4.6	Capteur solaire cylindro-parabolique avec le miroir S-ReflecT	144
Figure 4.7	(a) Récepteur à tube concentrique (b) Récepteur a simple tube	146
Figure 4.8	Architecture d'une carte Arduino	149
Figure 4.9	Structure d'un programme Arduino	150
Figure 4.10	Kit thermocouple et capteur de Température MAX6675	142
Figure 4.11	Schéma de conception du système de contrôle	151
Figure 4.12	Schéma de montage du système de visualisation	152
Figure 4.13	La carte d'accusation développée	152
Figure 4.14	Tache solaire	153
Figure 4.15	(a) Positions des thermocouples dans le tube absorbeur (b) Dispositif expérimental	153 154
Figure 4.16	Affichage des températures via la carte d'accusation développée	154
Figure 4.17	Bilan énergétique du tube absorbeur	155
Figure 4.18	Approche de PillBox	161
Figure 4.19	Fenêtre descriptive pour l'introduction des propriétés optiques du concentrateur	162
Figure 4.20	Fenêtre descriptive pour l'introduction des propriétés optiques de l'absorbeur	162
Figure 4.21	Fenêtre de déclaration des paramètres géométriques	163
Figure 4.22	Intersection des rayons avec : (a) le récepteur et (b) le réflecteur	164
Figure 4.23	Vue tridimensionnelle de la distribution du flux de chaleur sur la surface extérieure du tube absorbeur en considérant ($I_b=1000\text{W/m}^2$)	165
Figure 4.24	Flux de chaleur sur la surface extérieure du tube absorbeur (2D)	166
Figure 4.25	Fonctions polynomiales représentant le flux solaire	166
Figure 4.26	Maillage en 3D du tube absorbeur	167
Figure 4.27	Etapas utilisées pour notre simulation	167
Figure 4.28	Profil du rayonnement solaire direct et la température	168
Figure 4. 9	Profil rayonnement solaire direct et la température Tout	170
Figure 4.30	Température du PCM dans les trois positions des thermocouples 21 Octobre 2017	170
Figure 4.30	Température du PCM dans les trois positions des thermocouples 21 Juillet 2017	171
Figure 4.31	Profile énergie stockée pour: 21 Juillet et 21 Octobre 2017	172
Figure 4.32	Rendement instantané du PTC avec et sans PCM : 21 Juin	174

Figure 4.33	Rendement instantané du PTC avec et sans PCM: 21 Octobre	174
Figure 4.34	Energies utile du PTC avec et sans PCM: 21 Juillet et 21 Octobre 2017	175
Figure 4.35	Distribution de température de la surface externe absorbeur	176
Figure 4.36	Répartition de la température dans le domaine de l'eau	176
Figure 4.37	Résultats de la simulation CFD: (a) Distribution de la température de l'eau de sortie (b) Température moyenne de sortie de l'eau	177
Figure 4.38	Fraction liquide du domaine PCM pour $T_{in}=20^{\circ}C$ et débit massique $=0.005kg/s$: (a)/(b) après 30 min; (c)/(d) après 40 min; (e) après 1h10 min; (f) après 1h 40 min; (g) après 2h40min; (h) après 3h00min; (i) après 3h20min; and (j) après 3h40min	179
Figure 4.39	Contour de la température: domaine MCP, $T_{in}=30^{\circ}C$ et $T_{in}= 0.005 kg/s$	180
Figure 4.40	Contour de la température: domaine PCM pour $T_{in}=40^{\circ}C$ et $m=0.005kg/s$: (a) après 30min; (b) après 40 min; (c) après 1h00 min; (d) après 1h20 min;	181
Figure 4.41	Contour de la température: domaine PCM pour $T_{in}=40^{\circ}C$ et $T_{in} = 0.005 kg/s$: (a) après 30min; (b) après 40 min; (c) après 1h00 min; (d) après 1h20 min;	182
Figure 4.42	Contour de température : domaine PCM pour $T_{in}=50^{\circ}C$ $T_{in}=0.005kg/s$: (a) après 40min; (b) après 1h; (c) après 1h20min; and (d) après 1h40min	183
Figure 4.43	Température moyenne du PCM : trois positions des Thermocouples	183
Figure 4.44	Température de sortie pour le tube l'absorbeur avec PCM pour le 21 Juillet, 2017	184
Figure 4.45	Expérimentales et CFD résultats : énergie stockée pour PTC avec tube absorbeur tubes avec PCM pour le 21 Juillet, 2017	184

Nomenclature

Lettres latines

Symbole	Désignation	Unité
Q	energie	J
$E_{\text{stockée}}$	Energie stockée	J
m	masse du matériau	Kg
\dot{m}	Débit massique	Kg/s
C_p	Chaleur spécifique	J/kg.K
h_i	enthalpie massique initiale	J.kg ⁻¹
h_f	enthalpie massique finale	J.kg ⁻¹
T	temperature	K
T_i	température initiale	K
T_o	fluid outlet temperature	K
T_f	température finale	K
T_m	Température de fusion	K
T_a	Température ambiante	kg/s
T_l	Température de la phase liquide	K
T_s	Température de la phase solide	K
ΔV	Variation de volume à la transition	
P	Pression	Pa
g	gravité	m./s ²
L	chaleur latente	J. Kg ⁻¹
S(t)	abscisse du front de fusion	m
h_{LS}	Enthalpie massique de fusion	
x, y, z	coordonnées cartésiennes	
f_l	fraction liquide	
C	Constante de darcy	
t	variable du temps	s
Δt	Pas de temps	s
u	vitesse suivant x	m.s ⁻¹
v	vitesse suivant y	m.s ⁻¹
w	vitesse suivant z	m.s ⁻¹
h	profondeur (hauteur)	m
W_a	diamètre d'ouverture	m
f	distance focale du collecteur	m
L	Longueur du collecteur	m
I _b	l'intensité du rayonnement solaire	W/m ²
\dot{Q}_{st}	PCM heat stored,	W
Q_u	energie utile dans le récepteur	W
\dot{Q}_i	énergie solaire incidente à l'ouverture concentrateur	W
\dot{Q}_r	énergie atteignant la surface du récepteur	W

Symboles Grecs

Symboles	Notation	Unités
α_s	diffusivité du solide	
α_s	diffusivité du liquide	
φ	Angle d'ouverture	rad
α	absorptivity of the receiver	
η	efficacité thermique instantanée	
η_0	efficacité optique	
θ	incidence angle of the solar radiation	
ρ	reflectivity	
τ	transmitivity of the receiver	
β	Coefficient de dilatation thermique	K^{-1}
μ	viscosité dynamique	$Kg.m^{-1}.s^{-1}$
λ	conductivité thermique	$W.m^{-1}.K^{-1}$

Indice :

s : Solide

ℓ : Liquide

Abbreviations

HTF heat transfer fluid

PCM phase change material

PTC parabolic through collector

Introduction générale

Depuis le commencement des âges, l'énergie a été toujours indispensable pour nos activités économiques et dans les multiples aspects de notre vie quotidienne. Cette énergie est principalement utilisée dans trois secteurs principaux : habitat, transport et l'industrie. Dans chaque secteur l'énergie est consommée essentiellement sous forme thermique (chaleur ou froid) ou sous forme d'électricité. Dans le contexte actuel de la demande en énergie croissante, la dépendance aux énergies fossiles conduira à une crise énergétique dans un futur proche.

Les dernières années marquent un changement climatique remarquable, et les nouveaux rapports sur l'environnement précisent que les activités entropiques jouent un rôle dominant sur les changements climatiques à cause surtout des émissions de dioxyde de carbone CO₂ dues à la consommation d'énergie. Une réduction significative des émissions de CO₂ est nécessaire. En même temps, l'approvisionnement en sources d'énergies fossiles comme le charbon, l'huile, et le gaz naturel devient moins fiable. On accepte aujourd'hui que nous devions réduire l'utilisation des combustibles fossiles pour réduire les émissions de CO₂. L'utilisation des sources d'énergie renouvelables et l'efficacité énergétique sont les stratégies principales pour atteindre ce but.

Actuellement, l'énergie solaire montre une attractivité spécifique : elle est abondante sur terre, inépuisable et gratuite. En effet, l'énergie solaire reçue au niveau de la terre est de l'ordre de 1300 W/m². L'atmosphère réfléchit et absorbe une partie de ce flux d'énergie, en moyenne la terre reçoit au niveau de sol 1000 W/m² à midi [1]. L'énergie solaire peut être convertie par les capteurs non-concentrés (capteur plan) en énergie thermique, pour des besoins résidentiels ou tertiaires à basse température. L'inconvénient de la faible intensité de rayonnement solaire peut être surmonté en utilisant des systèmes solaires à concentration pour des applications à hautes températures comme la production d'électricité (par turbine à gaz par exemple) ou pour des besoins industriels. Les concentrateurs solaires tels que les concentrateurs cylindro-paraboliques offrent un rendement thermique d'environ 12 % plus élevé que les capteurs solaire plans en travaillant à des températures beaucoup plus élevées que les capteurs solaires plans [2]. Il existe aussi la transformation photovoltaïque du rayonnement solaire. Dans cette dernière voie, le rayonnement solaire est transformé en électricité. La transformation photovoltaïque requière des installations plus sophistiquées et

plus coûteuses que la conversion thermique. De plus, le rendement des panneaux photovoltaïques est actuellement modeste; il est autour de 12% à 15% [3].

La conversion de l'énergie solaire en énergie thermique même si elle ne pose pas de problèmes scientifiques nouveaux, elle représente une absence de rentabilité à court terme. Cependant, l'inconvénient majeur de l'énergie solaire est qu'il s'agit d'une source intermittente (nuit, soleil occulté par les nuages) et qui est parfois en inadéquation avec les besoins d'un point de vue spatial, temporel, en puissance ou en température. Elle a recours à une technologie plus élaborée, un développement important pour parvenir au produit industrialisable. L'effort dans ce secteur est donc nécessairement international. Il ne vise pas la satisfaction d'un besoin immédiat mais l'étude et l'évaluation de techniques susceptibles d'occuper une place importante dans l'avenir. Bien que les ressources de cette énergie renouvelables soient utilisées à grande échelle, l'acceptabilité sociale reste un défi à relever à cause de la faible densité du rayonnement solaire à la surface terrestre et ses fluctuations.

La solution est donc de stocker la chaleur produite par l'énergie solaire pour répondre aux besoins énergétiques au moment et à l'endroit où ceux-ci se manifeste. Des progrès technologiques tel que les techniques de captation directe d'une partie de l'énergie solaire sont nettement améliorées afin de rendre les systèmes solaires plus fiables, efficaces et rentables. Au cours des dernières années, une grande attention a été accordée à la possibilité de réduire le coût de l'énergie solaire et l'amélioration de l'efficacité des systèmes solaires thermique et photovoltaïques par l'introduction d'un moyen de stockage d'énergie solaire par chaleur latente.

Le stockage de l'énergie est devenu un des principaux thèmes de recherche développé en énergétique. Il est aussi un des moyens les plus adaptés à la modulation d'une source variable comme c'est le cas avec le soleil. Le stockage est un moyen très important pour une gestion optimale de l'énergie thermique. Il permet en effet d'adapter la production aux besoins et de créer les conditions les plus favorables à cette gestion en réalisant une relation constante entre l'énergie demandée et l'énergie fournie.

Pour stocker de l'énergie thermique, deux types de systèmes de stockage ont été mis au point. Le premier est le système de stockage par chaleur sensible et l'autre est le système de stockage par chaleur latente. Par rapport à un stockage d'énergie par chaleur sensible, le stockage par chaleur latente est plus avantageux grâce à la grande capacité de stockage et le comportement isotherme pendant le mode de fusion [4].

L'étude des phénomènes de stockage et de déstockage de la chaleur dans les matériaux à changement de phase solide-liquide a suscité depuis déjà plusieurs décennies et suscite encore de nos jours beaucoup d'intérêts 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 la dissipation de chaleur par chaleur latente dans les systèmes passifs de refroidissement de composants électroniques.

Depuis plusieurs années, l'amélioration des capteurs solaires s'est traduite par l'augmentation des performances et de fiabilité. Cette amélioration n'a été rendue possible que par les progrès importants qu'ont connus les différents composants des capteurs solaires et l'introduction sur des unités importantes de systèmes de régulation et de contrôle performants par intégration des systèmes de stockage.

Actuellement des nouvelles technologies avancées concernant les matériaux à changement de phase (PCM) et leur intégration avec différents types de capteurs solaires ont donné de meilleurs résultats. Actuellement, trois méthodes différentes ont été testées pour intégrer le PCM dans le système solaire thermique : PCM intégré à l'intérieur du réservoir, ajout du PCM dans un système qui relie le collecteur et le réservoir de stockage, et intégration du PCM directement dans la cavité de l'absorbeur [5]. L'intégration de PCM dans le récepteur (absorbeur) d'un capteur solaire en tant que composant unique élimine le besoin de réservoirs de stockage conventionnels, minimisant ainsi l'espace et les coûts et améliore l'efficacité en réduisant les pertes de chaleur significatives lorsque le collecteur solaire est à son plus haute température de fonctionnement.

Dans ce mémoire, le travail effectué présente en premier lieu une étude numérique des problèmes de la fusion et de la solidification des matériaux à changement de phase (MCP), complété par une application expérimentale qui consiste à la réalisation d'un capteur solaire (concentrateur cylindro-parabolique) stockeur. Le but de cette étude est d'évaluer les performances thermiques d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique, sans et avec intégration des matériaux à changement de phase. Ce modèle perfectionné concerne un capteur solaire cylindro-paraboliques concentrique dans lesquels un Matériaux à Changement de Phase PCM (Phase Change Materials) est serré entre deux tubes concentriques. Le fluide caloporteur peut ainsi circuler dans le tube central ou dans le passage annulaire. Le PCM absorbe l'énergie solaire incidente captée par le capteur cylindro-parabolique pendant la journée et fournit un flux de chaleur stationnaire au fluide caloporteur pour éviter les

fluctuations dues aux changements climatiques et le passage des nuages pour stocker l'énergie solaire afin de l'utiliser dans les heures peu ou non ensoleillées.

Les calculs de simulation ont été conduits moyennant la méthode numérique des volumes finis mise en œuvre sur le code de calcul CFD "Fluent" en utilisant un modèle en régime instationnaire et une distribution non uniforme du flux solaire au niveau de tube absorbeur, permettant d'approcher au mieux le cas réel.

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

Le premier chapitre est consacré premièrement à une présentation générale des matériaux à changement de phase (PCM) ensuite à une revue bibliographique sur l'intégration des PCM dans les systèmes des capteurs solaire et les travaux de recherche sur les systèmes de stockage thermique.

Le second chapitre porte sur l'étude théorique du problème de la solidification/Fusion des matériaux à changement de phase basée sur les connaissances les plus récentes suivi d'une modélisation numérique (1D) du problème de la solidification /Fusion à l'aide de la méthode des différences finies utilisé pour développer un programme en Fortran 90.

Le troisième chapitre est destiné à une modélisation (3D) des phénomènes liés aux transferts thermiques et au processus de stockage et de déstockage de la chaleur dans les matériaux à changement de phase pour deux types d'unités de stockage thermique (LHS) à double et triple tube concentrique tubes pour différents paramètres de fonctionnement, orientations (horizontale/verticale), débit et température d'entrée du fluide caloporteur . Le modèle CFD tridimensionnel à l'aide du logiciel CFD Ansys Fluent17.1 est aussi présenté.

La conception d'un modèle expérimental consiste à réaliser un nouveau concentrateur solaire cylindro-parabolique avec un absorbeur à tubes concentrique où le PCM est inséré dans l'espace annulaire instrumenté par 5 thermocouples liés à une unité d'acquisition développée à l'aide d'une carte arduino est donnée. Dans **le quatrième chapitre**. Un modèle CFD de l'ensemble du système est présenté. Les résultats numériques sont comparés aux résultats expérimentaux effectués avec et sans matériau à changement de phase dans le tube récepteur.

Cette présente thèse de doctorat est enfin clôturée par une conclusion générale qui fait état des principaux résultats obtenus confrontés à la problématique définie au départ pour cette étude. Les perspectives à notre contribution sont aussi récapitulés.

CHAPITRE I

Matériaux à changement de phase et leurs applications dans les capteurs solaires

1.1. Introduction

Depuis quelques années des techniques ont été réalisées pour estimer les paramètres utilisés pour la caractérisation des matériaux à changement de phase MCP lors du passage de l'état liquide à l'état solide. L'avancement de ces techniques est dû principalement au progrès des outils informatiques et au développement des nouvelles méthodes capables de représenter avec bonne précision, les divers processus des transferts thermiques (conduction, convection, changement de phase, etc.). La caractéristique fondamentale du procédé de la fusion et de la solidification est la présence d'une frontière mobile entre les phases solide et liquide. Ce problème de changement de phase connu sous le nom de problème de Stefan [6], est fortement non-linéaire. Le déplacement de l'interface solide-liquide dépend du taux de transfert de chaleur au sein des phases solide et liquide. En retour, ce taux dépend de la position et du déplacement de l'interface. Dans ce chapitre on présente un bref historique du problème des Matériaux à Changement de Phase (MCP).

1.2. Stockage d'énergie

Le stockage de l'énergie thermique consiste à emmagasiner une quantité d'énergie durant laquelle celle-ci est abondante ou moins coûteuse, en un lieu donné afin de la restituer ultérieurement lorsqu'elle est rare ou plus chère. A titre d'exemple, il est nécessaire pour les énergies renouvelables intermittentes, telles que le solaire ou l'éolien, de stocker l'énergie immédiatement disponible car celle-ci est variable avec le temps. Ainsi, le principal intérêt d'une unité de stockage est la réduction de la consommation d'énergie.

1.2.1 Types de stockage d'énergie [7]:

Les différents types de stockage ont donc été développés afin d'emmagasiner de l'énergie pendant une période où elle est abondante et/ou moins coûteuse pour l'utiliser pendant une période durant laquelle elle est rare ou plus chère. Les types existants se différencient selon l'application visée (bâtiments, usages industriels, transports) mais aussi par les réactions Physico-chimiques (stabilité chimique, absence de décomposition et corrosion.) et thermodynamiques (température de fusion, capacité calorifique, conductivité thermique, etc.) inhérentes aux capacités des matériaux utilisés à cette fin. Les différents types de stockage sont présentés dans la sous section suivante afin de sélectionner ensuite le système de stockage à modéliser. La figure 1.2 montre les méthodes possibles de stockage.

1.2.1.1 Stockage par chaleur sensible

Dans le stockage par chaleur sensible, l'énergie thermique transférée fait varier la température du matériau Figure 1.1. La variation de la quantité de chaleur Q échangée par le matériau lorsqu'il passe d'un état initial noté avec l'indice i à un état final noté avec l'indice f est donnée par l'équation :

$$Q = m (h_f - h_i) \text{ en [J]} \quad (1.1)$$

Où : m : masse du matériau [kg],
 h_i : enthalpie massique initiale [J.kg^{-1}],
 h_f : enthalpie massique finale [J.kg^{-1}].

Si la capacité thermique massique du matériau C_p (chaleur spécifique massique) est supposée constante dans un certain intervalle de température, l'expression de l'enthalpie massique permet d'écrire :

$$Q = m C_p (T_f - T_i) \text{ en [J]} \quad (1.2)$$

Où : T_i : température initiale [K],
 T_f : température finale [K]

Il est donc utile d'utiliser des matériaux à forte capacité thermique qui emmagasineront un maximum d'énergie. Mais ces matériaux doivent avoir d'autres propriétés comme la stabilité à long terme lors des cycles thermiques, la compatibilité avec le récipient de stockage et également un coût raisonnable.

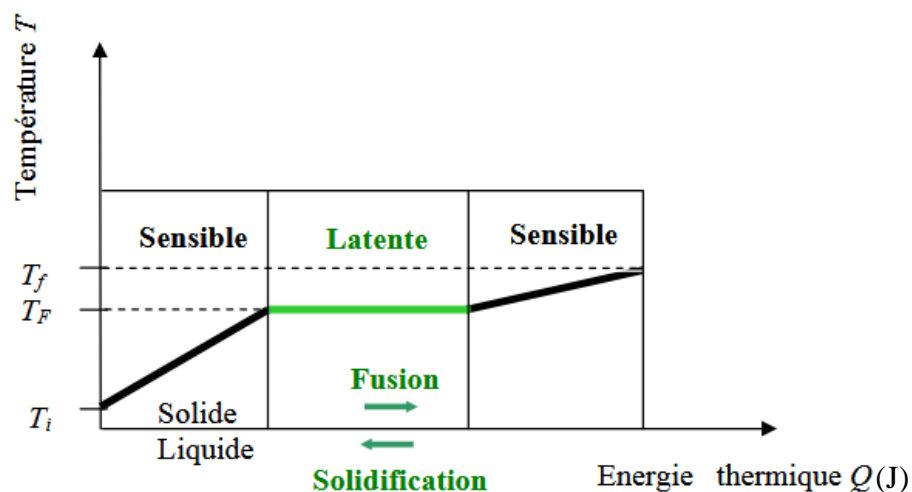


Figure 1.1: Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état [7]

Le classement du type de stockage par chaleur sensible dépend du milieu de stockage, en particulier de son état physique. On définira ainsi :

- le stockage par un fluide (l'eau, l'huile, les sels fondus).
- le stockage par un solide (pierre, métaux, etc.).

1.2.1.2. Stockage par chaleur latente

Afin de parvenir à stocker une quantité appréciable d'énergie, cette méthode doit faire intervenir des écarts de température très élevées. Ceci provient du fait que les chaleurs spécifiques de la plupart des matériaux sont relativement faibles ($\leq 3 \text{ kJ.kg}^{-1}$). Par ailleurs, il faut beaucoup plus d'énergie pour faire fondre un matériau (e.g. de la glace) sans pour autant que sa température augmente notablement. L'énergie est alors stockée sous forme de chaleur latente (chaleur de fusion).

Donnons un ordre de grandeur, dans un kilogramme de brique réfractaire, il est possible de stocker environ 1kJ pour chaque degré centigrade d'élévation de température. En faisant fondre un kilogramme de paraffine, environ 250 kJ (335 kJ pour la glace) sont absorbés.

En effet :

$$(E_{\text{stockée}})_{\text{brique}} = m c_p \Delta T \approx 1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.k}} . m \Delta T , \text{ (chaleur sensible)}$$

$$(E_{\text{stockée}})_{\text{paraffine}} = mL \approx 250 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} . m , \text{ (chaleur latente)}$$

Cependant le stockage latent implique également des difficultés techniques supplémentaires (encapsulation des matériaux, variation de volume et de pression...) qui, couplées au prix des matériaux, rendent cette solution moins accessible économiquement que le stockage sensible pour de petites installations comme le chauffage d'eau.

1.2.2. Stockage thermochimique

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



Le matériau AB absorbe de la chaleur ce qui engendre l'apparition des deux composants A et B, distincts, pouvant être stockés séparément. Ce phénomène endothermique est appelé la

charge, phase de stockage de chaleur. Inversement, la mise en contact des composants A et B provoque la formation d'un composant AB et la libération de chaleur.

1.2.3. 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 [8].

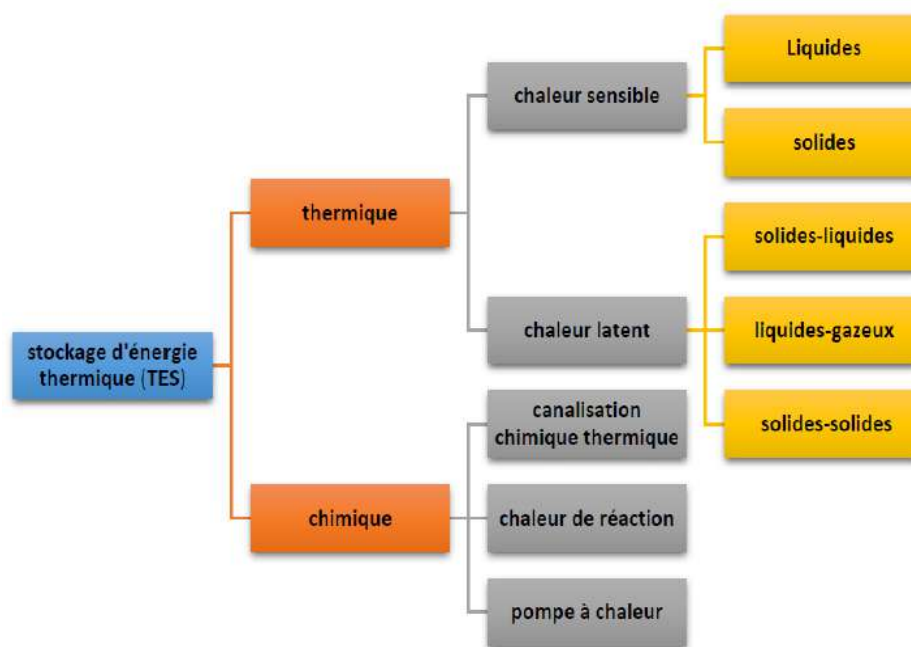


Figure 1.2 : Techniques de stockage de l'énergie thermique [8]

1.2.4. Comparaison des différents types de stockage

D'un point de vue économique, l'évaluation nécessite de prendre en compte le coût d'investissement mais aussi les coûts d'exploitation, de maintenance et de recyclage d'un système de stockage. Les différents types de stockage ont été comparés grâce au calcul des volumes de stockage nécessaires pour emmagasiner une énergie de 6,7 MJ. La Figure 1.3, illustre cette comparaison. Les entrants en jeu dans le stockage par chaleur sensible sont faibles. Les volumes sont donc grands comme le montre la Figure 1.3. Ceci est un inconvénient pour l'application visée.

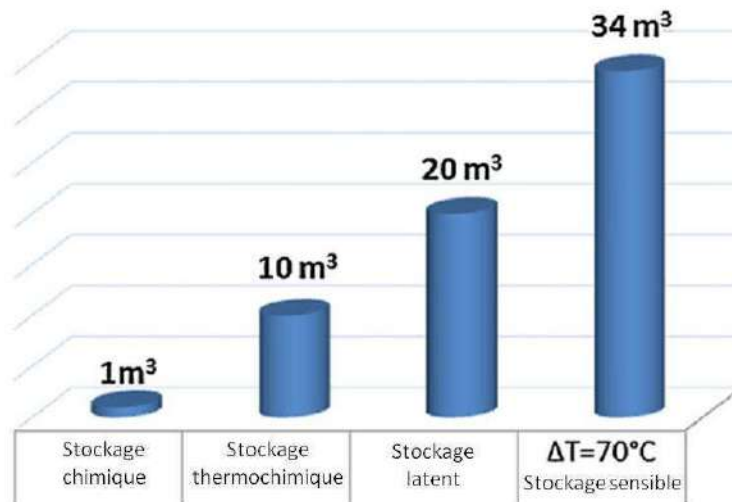


Figure 1.3 : Volume requis pour le stockage de 6,7 MJ [8]

Comparativement au stockage par chaleur sensible, la capacité de stockage de l'énergie thermique des MCP est plus grande et donc nécessite moins de volume. Le stockage thermique par changement de phase est efficace pour des différences de températures faibles et si les périodes de charge et de décharge se succèdent à température constante. Par contre, il présente un coût d'investissement plus élevé. Par ailleurs, la faible conductivité thermique des matériaux implique des phases lentes de charge et de décharge, en particulier pour les MCP organiques. Ils présentent également un risque de perte de stabilité de la solution.

La Figure 1.4 présente la densité énergétique en fonction de la température pour les différents types de stockage existants [8]. Ce graphe permet de corroborer nos propos précédents. En effet, les stockages par chaleur sensible et latente sont réversibles mais leurs densités de stockage sont inférieures à celles des stockages thermochimique et chimique. Théoriquement, le stockage chimique est le plus performant en termes de densité énergétique de stockage. Cependant, il présente des inconvénients rédhibitoires:

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

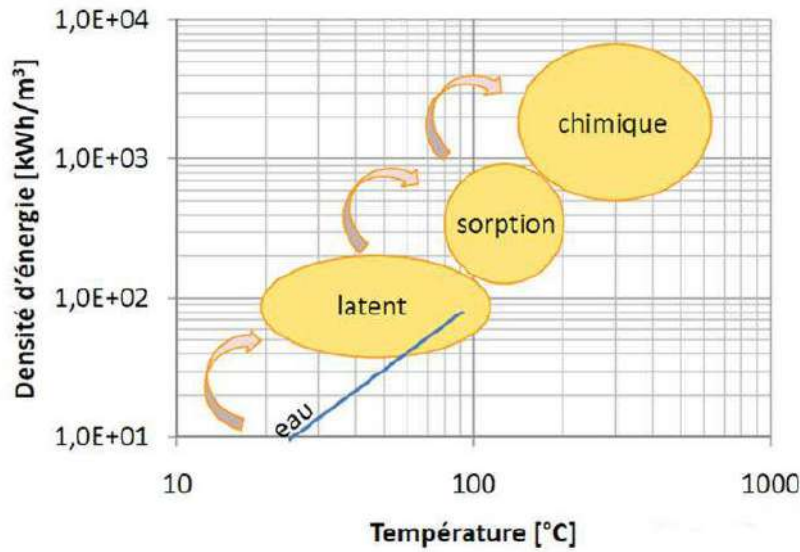


Figure 1.4: Densité énergétique pour les différents types de stockage [8]

Parmi les types de stockages présentés précédemment, le stockage par chaleur latente semble être le plus adapté pour stocker l'énergie thermique. Les matériaux utilisant ce type de stockage sont qualifiés de Matériaux à Changement de Phase (MCP).

1.3. Classification des matériaux à changement de phase

De nombreuses substances ont été étudiées comme des MCP potentiels, mais seuls quelques-unes sont commercialisées en tant que telles [9]. La figure 1.5 représente une classification des MCP parmi les matériaux de stockage d'énergie thermique. Parmi les MCP subissant cette transformation, nous avons trois groupes de matériaux : les inorganiques, les organiques et les eutectiques.

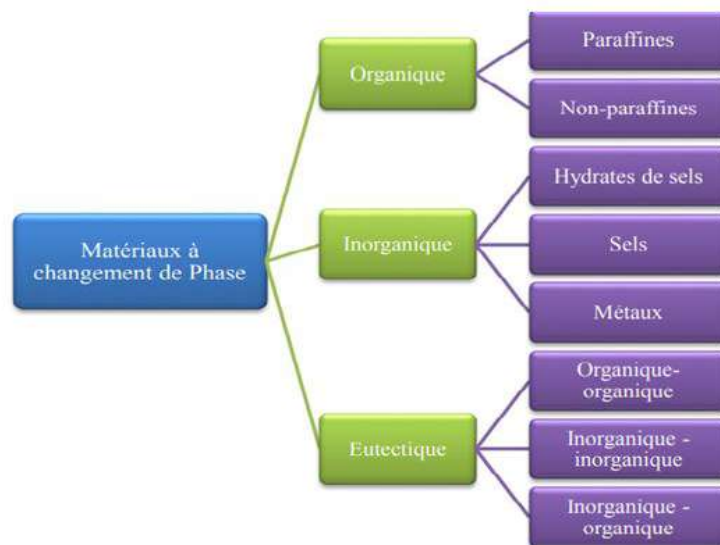


Figure 1.5: Classification des MCP suivant les matériaux de stockage de chaleur [9]

1.3.1. MCP inorganiques

Les substances inorganiques ont une température ou une plage de températures de fusion comprise entre -100°C et $+1000^{\circ}\text{C}$. Les plus utilisés sont : l'eau (température de fusion 0°C), les solutions aqueuses de sel (température de fusion inférieure à 0°C), les sels hydratés (température de fusion comprise entre 5°C et 130°C), les mélanges de sels, les mélanges de métaux (température de fusion supérieure à 150°C). Ils ont plusieurs avantages : ils ont une chaleur latente importante et une conductivité thermique élevée. 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 voir Tableaux 1.1 et 1.2.

1.3.1.1. Sels hydratés

Ils peuvent être considérés comme des alliages de sels inorganiques et de l'eau formant un solide cristallin typique de formule générale $\text{AB}_n\text{H}_2\text{O}$. Les sels hydratés sont le groupe qui a été largement étudié pour leurs utilisations en tant que MCP dans les systèmes thermiques de stockage de la chaleur car ils présentent de nombreux avantages tels que :

- Forte chaleur latente de fusion par unité de volume (diminution de la taille du système de stockage) ;
- Conductivité thermique élevée (augmentation du transfert de chaleur) ;
- Faible variation de volume lors du changement de phase;
- Faible pouvoir corrosif;
- Compatibilité avec les conteneurs en plastiques;
- Faible coût.

Le principal problème qui se pose lors de l'utilisation des hydrates de sels est leur fusion non congruente, ce qui veut dire que le sel n'est pas totalement soluble dans l'eau d'hydratation au niveau du point de fusion. Ainsi, au moment de la fusion, il peut se former une solution aqueuse saturée en sel et le surplus de solide peut se déposer au fond du container par sa différence de masse volumique, ce qui empêche la solidification suivante [10]. Différentes solutions ont été proposées, comme par exemple: l'agitation mécanique, l'encapsulation du MCP, l'utilisation d'un excès d'eau pour éviter la saturation de la solution ou encore l'ajout d'additifs [11].

Un autre inconvénient des hydrates de sel est la surfusion. Pour résoudre ce problème un agent de nucléation peut être ajouté; il permet de fournir un noyau où la cristallisation peut commencer. Une autre option est la rétention dans une petite région froide de cristaux qui serviront comme noyaux [12].

Certains hydrates de sel peuvent montrer des problèmes de corrosion des structures métalliques des systèmes de stockage comme il est présenté par Cabeza et al [13]. Liu et al. [14], ont énuméré plusieurs composites de sel inorganiques comme application potentielle de stockage de PCM en raison de leur densité énergétique plus élevée, de la chaleur de fusion et du coût relativement inférieur. Parmi eux NaNO_3 , NaOH , KNO_3 , KOH et Na_2CO_3 ont été largement utilisés à des fins de recherche. En termes de coût le KOH s'est avéré être le meilleur choix et en termes de densité énergétique NaNO_3 s'est avéré être le meilleur choix pour produire de la vapeur à haute pression autour de 100 bar. Citons par le biais du tableau I.4, quelques exemples de sels hydratés les plus prometteurs, Sharma et al. [15] :

Tableau 1.1: Sels hydratés les plus prometteurs [15]

Hydrates Sel	Point de fusion °C	Chaleur de fusion, kJ/kg	Masse volumique kg/m^3	Capacité Calorifique kJ/kg.K	Conductivité thermique K	Expansion thermique K^{-1}
$\text{KNO}_3/\text{NaNO}_3$ (60%/40%) (Solar Salt)	217	105	2180		0.8	n.a
KNO_3/KCl	320	116	2100	1.49	0.5	n.a
$\text{MgCl}_2/\text{KCl}/\text{NaCl}$	380	400	1800	0.96	n.a	n.a
KNO_3	330	266	2110	1.22	0.5	200×10^{-6}
NaNO_3	310	172	2260	1.82	0.5	40×10^{-6}

1.3.1.2. Métaux

Quelques auteurs se sont attardés sur l'utilisation de métaux en tant que MCP, notamment Kotzé et al. [16] ou encore LI et al [17]. On peut citer notamment le Potassium ($T_{\text{fusion}} = 63.2^\circ\text{C}$), le $\text{Bi}_{58}\text{Sn}_{42}$ ($T_{\text{fusion}} = 138^\circ\text{C}$) ou encore le Lithium ($T_{\text{fusion}} = 186^\circ\text{C}$).

a) Avantages

Les avantages que présentent les métaux sont leur conductivité thermique bien plus grande que les autres types de MCP, leur chaleur latente très élevée mais également leur stabilité à long terme. Toutes ces caractéristiques permettent un stockage rapide de la chaleur avec une faible expansion volumique.

b) Inconvénients

Leur utilisation est encore à un stade de recherche et ils ne sont pas encore sérieusement envisagés pour une application industrielle en raison de la contrainte de masse. De plus, ils présentent aussi des problèmes de corrosion. Les quelques MCP envisagés sont le gallium ou encore le plomb-bismuth.

Les principaux points communs entre ces trois groupes sont:

- Température de fusion élevée
- Grande chaleur latente
- Conductivité thermique plus élevée, surtout pour les métaux.

Les plus prometteurs des métalliques sont donnés par Tableau 1.2, [18].

Tableau 1.2: Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques métalliques [18].

Les métalliques		
Matériau	Température de mélange (°C)	Chaleur latente de fusion (kJ·kg ⁻¹)
Gallium	30	80,3
Cerrobend eutectique	70	32,6

1.3.2. 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 diffusion plus faible, ils sont inflammables voir Tableau 1.3. 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 [19].

1.3.3. 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).

- Principaux avantages :
 - Ils ont un point de fusion net similaire à une substance pure
 - Leurs chaleurs latentes volumétriques sont légèrement supérieures à celle des composés organiques purs.
- Principaux inconvénients :
 - On a peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux.
 - Ils sont peu utilisés au niveau des systèmes industriels.

Tableau 1.3: Propriétés thermiques de certains MCP [19]

Matériaux		Température de fusion (°C)	Enthalpie de fusion (kJ/kg)
MCP Organique	Eau	0	333.6
	Stéarate de butyle	19	140
	Acide caprique-Aurique	21	143
MCP Inorganique	KF.4H ₂ O	18.5	231
	Mn(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	25.8	125.9
	Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O	32	251
MCP Eutectique	66,6% CaCl ₂ .6H ₂ O+33,3%MgCl ₂ O.6H ₂ O	25	127
	48%CaCl ₂ +4,3%NaCl+47,3%H ₂ O	26.8	188
	47%Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O+53%Mg(NO ₃) ₂ 6H ₂ O	30	136

Tableau 1.4: Caractéristiques de quelques MCP inorganiques [19].

Type de substance	Composé	Température de fusion (C°)	ΔH_{fusion} (kJ/kg)	Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Masse volumique (kg .m ⁻³)
Substance Inorganique	H ₂ O	0	333	0.612 liq.20°C	998 liq.20°C 917 sol.0°C
	CaCl ₂	29	190.8	0.540 liq.38.7°C 1.088sol.23.7°C	1562 liq.32°C 1802 sol.24°C
	Mg(NO ₃) ₂ 6H ₂ O	89	162.8	0.490 liq.95°C 0.611 sol.37°C	1550 liq.94°C 1636 sol.25°C
	MgCl ₂ . 6H ₂ O	117	168.6	0.570 liq.120°C 0.694 sol.90°C	1450 liq.120°C 1569 sol.20°C
Eutectique organique	58.7% Mg(NO ₃) ₂ 6H ₂ O +41.3% MgCl ₂ . 6H ₂ O	59	132.2	0.565 liq.85°C 0.678 sol.38°C	1550 liq.50°C 1630 sol.24°C
Mélange non eutectique de substance inorganique	50% Na(CH ₃ coo).3 H ₂ O+50%HCO ONH ₂	40.5	255	n.d	n.d

Liq: liquide ; sol : solide ; n.d: non disponible

Tableau 1.5: Caractéristiques de quelques MCP organiques [20].

Type de substance	Composé	Température de fusion (°C)	ΔH_{fusion} (kJ/kg)	Conductivité thermique ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Masse volumique ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
Substances organiques	Paraffine C ₂₁ -C ₅₀	66-68	189	0.21 sol	0.830 liq.70°C 0.930 sol.20°C
	Naphtalène	80	147.7	0.132 liq.83.3°C 0.341 sol.49.9°C	976 liq.84°C 1145 sol.20°C
Eutectique organique	67.1% Naphtalène +32.9% Acide benzoïque	67	123.4	0.130 liq.100°C 0.282 sol.38°C	n.d
Acides gras	Acide caprique	32	152.7	153 liq.38.5°C	878 liq.45°C 1004 sol.24°C
	Acide stéarique	69	202.5	172 liq.70°C	848 liq.100°C 965 sol.24°C

Liq: liquide ; sol : solide ; n.d: non disponible

1.3.4. Etude comparative des composés organiques et inorganiques :

Nous allons présenter sous forme de tableau les avantages et inconvénients des matériaux à changement de phases organiques et inorganiques, voir Tableau 1.6.

Tableau 1.6: Avantages et inconvénients des MCP [20].

		Inconvénients
Organiques	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de ségrégation de phase • Chimiquement stable • Surfusion est négligeable • Facilement incorporés aux systèmes de stockage de chaleur • Sobriété écologiques • 100% recyclables • Peu sensible aux cycles de fusion/solidification 	<ul style="list-style-type: none"> • Faible conductivité thermique (0.18-0.25 W/m.K) • Dilatation volumique élevé • Inflammables • Cout élevé par rapport aux sels Hydratés
Inorganique	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilité • Grande chaleur de fusion • Conductivité thermique élevé • Faible dilatation volumique • Bon marché • Ininflammables 	<ul style="list-style-type: none"> • Ségrégation • Perte d'efficacité liée aux cycles de fusion /solidification • Surfusion • Corrosivité • Déshydratation liée aux cycles thermiques
Eutectiques	<ul style="list-style-type: none"> • Point de fusion net similaire à une substance pure • Chaleur latente légèrement supérieure à celle des composés organiques 	<ul style="list-style-type: none"> • Peu de données disponibles sur les propriétés de ces matériaux • Peu utilisés au niveau des applications industrielles

1.4. Domaines d'applications des MCP

L'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) pour le stockage d'énergie thermique a suscité un regain d'intérêt ces dernières années [20]. 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.

1.4.1 Transport de produits alimentaires

Les MCP sont utilisés dans l'industrie agroalimentaire, pharmaceutique et médicale pour limiter au maximum les variations de température que subissent les aliments, les médicaments ou les composants sensibles par exemple le cas du transport du sang. Ils se présentent principalement sous la forme de petits sacs en plastiques contenant le matériau choisi disposé au plus près du produit à conserver, voir figure 1.6.



Figure 1.6 : MCP dans le transport de produits alimentaires [20]

1.4.2 Applications médicales

Dans le secteur médical, une des applications principales est le transport de sang et d'organes Figure 1.7. D'autres applications médicales peuvent être des coussinets chauds ou froids pour traiter la douleur locale dans le corps.



Figure 1.7 : Récipient pour transporter le sang et les organes contenant du MCP [20]

1.4.3. MCP dans Textile

Dès l'introduction des vêtements perméables et imperméables, la fonctionnalité des textiles a pris de plus en plus d'importance. Par exemple, les vêtements de ski utilisent un MCP

incorporé dans le textile. Quand le sportif est en phase active, le MCP absorbe la chaleur de sa peau et le refroidit, alors que lorsqu'il n'est plus en phase active, le MCP émet de la chaleur et réchauffe le sportif. Les matériaux MCP sont utilisés sous forme de microcapsules placées au cœur des fibres, qui absorbent, stockent et libèrent l'énergie de façon réactive afin de réchauffer lorsqu'il fait froid ou de rafraîchir lorsqu'il fait chaud. Les MCP interviennent pour réguler les transferts de chaleur entre le corps humain et l'extérieur figure 1.8.

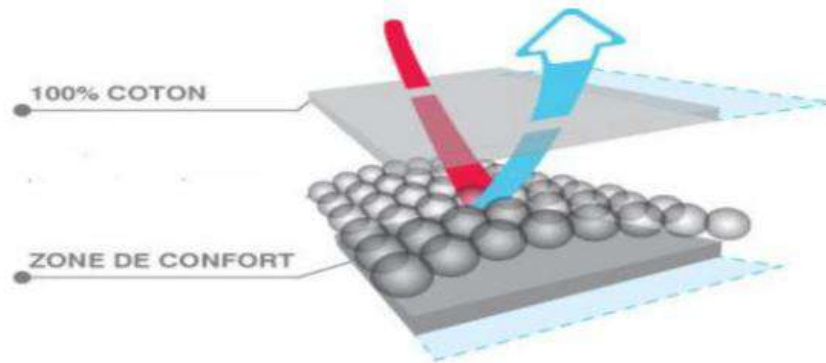


Figure 1.8: Principe du textile avec MCP [20]

1.4.4. MCP en réfrigérateur domestique

Actuellement des réfrigérateurs fonctionnant en permanence ont des médiocres performances énergétiques (coefficient de performance de l'ordre de 1) [20]. Ces appareils consomment 18 milliards de kWh ce qui équivaut à 20% de la consommation résidentielle d'électricité et contribuent ainsi à l'effet de serre à hauteur de 2,25 milliards de tonnes de CO₂/an. L'intégration de matériaux à changement de phase dans un réfrigérateur domestique est une solution technologique innovante et économique pour réduire cette consommation d'énergie et limiter les pics de puissance en électricité.

L'effet de la plus grande inertie thermique apportée par ces matériaux aura également pour conséquence de limiter le nombre d'arrêt démarrage (chaque démarrage étant caractérisé par une surconsommation électrique), de privilégier certaines heures de fonctionnement dans la journée et de stabiliser la température pour une meilleure conservation des aliments.

Afin d'estimer le comportement et la performance du nouveau système et établir un dimensionnement optimal d'un prototype qui permettra de démontrer la faisabilité de ce concept, ils ont développé une modélisation du fonctionnement du cycle à compression de vapeur en régime non établi couplé à un dispositif de stockage de froid. La figure 1.9 montre un exemple d'un réfrigérateur domestique contenant le matériau à changement de phase.

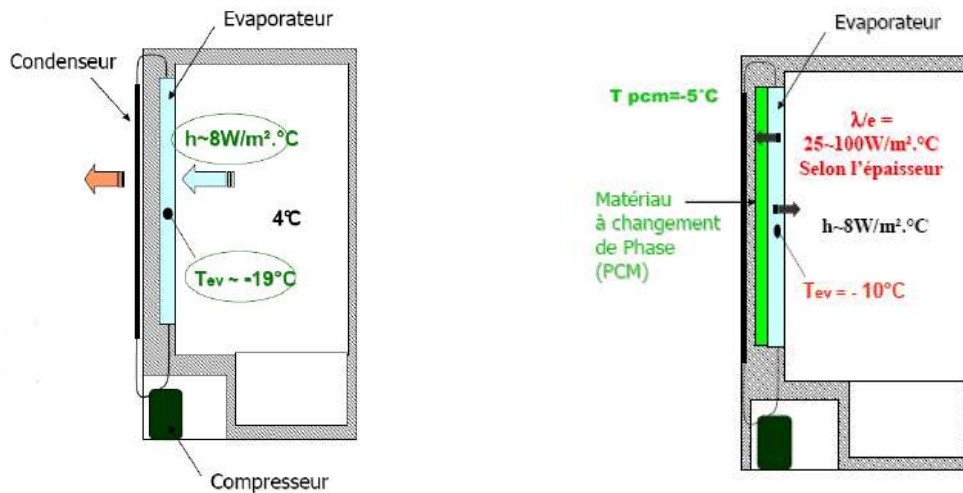


Figure 1.9.a: Réfrigérateur normale [21]

1.9.b: Réfrigérateur avec (MCP) [21]

1.4.5. MCP en refroidissement des composants électroniques

Dans un tout autre ordre d'idée, la miniaturisation croissante des circuits électroniques demande une dissipation de plus en plus efficace de la chaleur qui y est générée [21]. Il s'agit en fait d'un des principaux obstacles à surmonter afin d'augmenter la puissance des ordinateurs et de l'électronique en général. Pour sa simplicité, le système de refroidissement actuellement le plus courant est la convection (naturelle ou forcée) de l'air ambiant. Un MCP peut absorber une grande quantité de chaleur en fondant, ce qui en fait une alternative très intéressante pour dissiper l'énergie émanant des composants électroniques. Étant donné que le phénomène de fusion se produit à l'intérieur d'une plage de température étroite, il est alors possible de contrôler la température de ces composants. Il suffirait donc de juxtaposer à ces composants une enceinte de MCP qui permettrait de dissiper l'énergie produite par les sources de chaleur pour un temps d'utilisation donné. Ce système est particulièrement bien adapté à l'utilisation cyclique d'équipements électroniques. Le MCP peut alors céder sa chaleur (en se resolidifiant) pendant la période d'inactivité. La figure 1.10 montre un exemple d'un matériel électronique refroidi en utilisant un MCP.

Les MCP sont utilisés en électronique pour réduire la résistance thermique de contact aux interfaces puces/diffuseur d'extraction de la chaleur. Constitués par le matériau fusible seul ou couvrant les deux faces d'un film support isolant, les matériaux d'interface à changement de phase se présentent sous la forme de timbres ou de rubans extrêmement fins afin de minimiser leur résistance thermique interne propre. La variation volumique au changement d'état permet l'évacuation de microbulles d'air et un mouillage parfait des

surfaces en contact. La figure 1.10 montre un exemple d'un matériel électronique refroidi en utilisant un MCP.

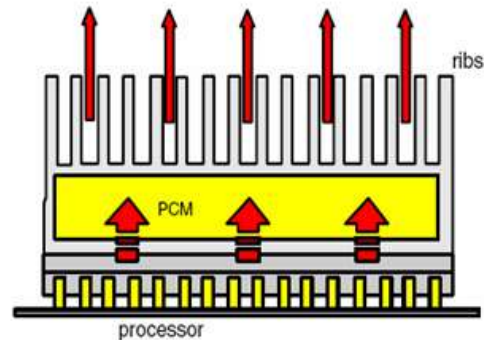


Figure 1.10: Exemple d'un processeur refroidi par un MCP [21]

Une autre application concerne essentiellement les industries de l'informatique et des télécommunications dans lesquelles il est crucial de ne pas interrompre l'alimentation en énergie électrique. En cas de rupture de l'alimentation, un dispositif vient se substituer au secteur. La transition se passe généralement avec production d'un pic d'intensité de courant lors de la connexion et/ou du démarrage du dispositif de substitution (groupe électrogène, batterie d'accumulateurs, pile à combustible, etc.). La puissance dissipée lors de ce pic est alors absorbée par le MCP qui se resolidifiera progressivement lors du retour au régime normal. Cette gestion de la puissance se fait soit au niveau du système soit au niveau du composant lui-même. Ce problème de pics thermiques se retrouve sur les transistors de puissances servant de commutateurs. Par exemple dans certains transistors de puissance en carbure de silicium le MCP est placé directement en contact avec le matériau du composant voir figure 1.11 [21].

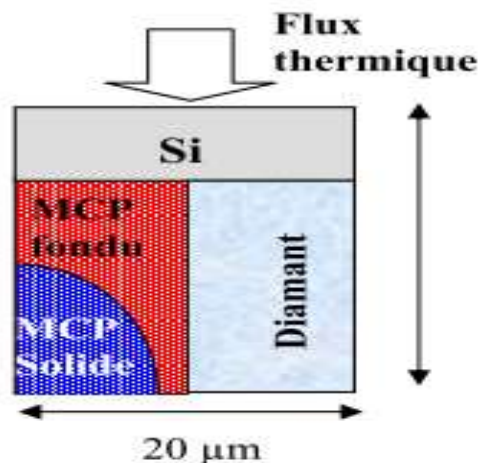


Figure 1.11: Schéma de principe de la gestion thermique d'une puce électronique avec un MCP [21]

1.4.6 Rafraîchissement d'air à l'aide de MCP

Une autre voie explorée est celle des échangeurs air/MCP sous forme de plaque. [Zalba et al \[22\]](#) ont expérimenté des caissons contenant des plaques de MCP et dans lesquelles l'air de ventilation est forcé pour être rafraîchi au contact des plaques. Le schéma du dispositif est montré dans figure 1.12.

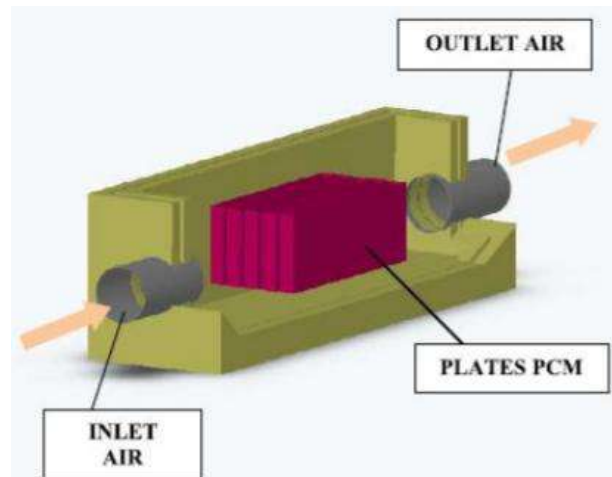


Figure 1.12: Echangeur de chaleur à MCP [22]

1.4.7. Stockage de l'énergie solaire par MCP

Actuellement l'énergie solaire est appelée à fournir une contribution importante au bilan énergétique mondiale spécialement dans les pays tropicaux, cela par la conversion de l'énergie noble (énergie solaire) en énergie thermique spontanément à température basse, moyenne ou élevée [23]. Cette énergie dépend du temps durant la journée qui est fonction de la saison, alors une énergie d'appoint est nécessaire pour assurer la continuité de fonctionnement des installations solaire. L'utilisation des matériaux à changement de phase pour stocker l'énergie est l'utilisée dans les périodes critiques était une solution inadéquate. L'une des applications les plus importantes de l'énergie solaire est le chauffage de l'eau. Cette application requiert deux composants : un capteur solaire et une unité de stockage thermique. Dans le but d'augmenter la capacité de stockage thermique, l'eau peut être remplacée par un matériau à changement de phase (MCP), caractérisé par une chaleur latente de fusion relativement élevée voir figure 1.13.

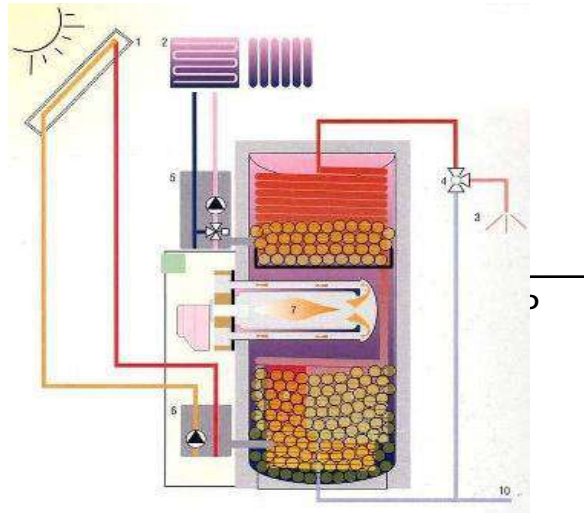


Figure 1.13: Stockage de l'énergie dans un capteur solaire utilisant un MCP [23]

1.4.8. Isolation des bâtiments

Une autre application des MCP est l'isolation des bâtiments [24]. L'énergie stockée dans les parois (enthalpie de fusion) n'est pas transmise à l'intérieur de l'édifice. En période de surchauffe, le MCP fond et la chaleur est emmagasinée ; lorsque le bâtiment se refroidit, le MCP se solidifie et l'énergie stockée est restituée. Dans une certaine gamme de température, le MCP accroît donc l'inertie thermique du bâtiment. Les MCP utilisés en isolation sont emprisonnés dans des briques, placés dans l'enveloppe du bâtiment voir figure 1.14.

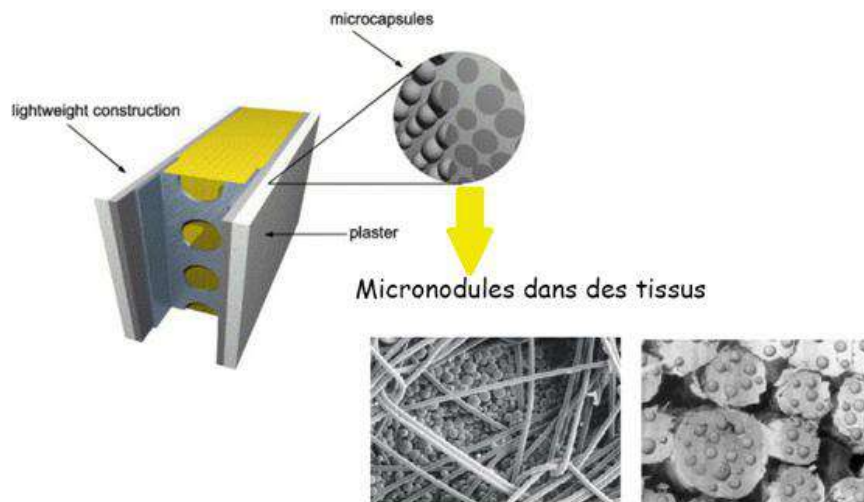


Figure 1.14 : Exemple d'utilisation d'un MCP dans les bâtiments [24]

1.4.9. Préchauffer les moteurs à combustion

Parmi les autres applications des MCP, préchauffer les moteurs à combustion interne comme les moteurs diesel avant l'allumage figure 1.15,[25]. Ce système fonctionne avec le

dégagement de la chaleur pendant le changement de l'état de liquide au solide du MCP. Cette opération évite un grand nombre d'effets négatifs dus au démarrage à froid du moteur comme l'augmentation de la consommation du gazole. Cette batterie est connectée au radiateur, où elle stocke une chaleur supplémentaire quand le moteur tourne à sa température de fonctionnement. Cette chaleur est utile pour le démarrage à froid suivant et pour une mise en température rapide du moteur. L'énergie peut être gardée pendant deux jours à une température de -20°C à l'extérieur.

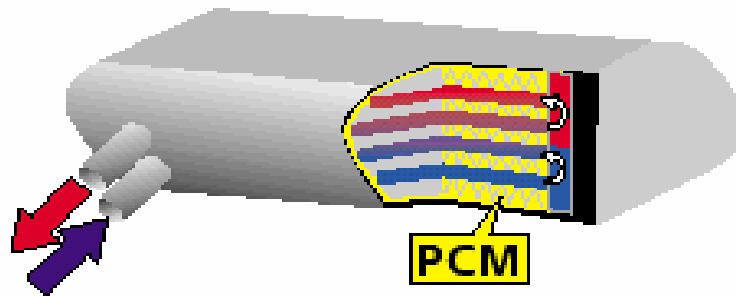


Figure 1.15: Préchauffer des moteurs à combustion utilisant un MCP [25]

1.5. Différentes formes des conteneurs de PCM

Il doit avoir un échange de chaleur efficace entre le MCP et le fluide caloporteur afin d'avoir un grand aller-retour pour l'efficacité du stockage d'énergie. Par conséquent, les MCP sont généralement contenus tels que la surface de transfert de chaleur ou le coefficient de transfert de chaleur par convection soit élevée entre Pack MCP et le fluide caloporteur. Les récipients de MCP peuvent être sous différentes formes : tube, cylindrique, rectangulaire, où le fluide caloporteur peut circuler autour d'eux, voir figure 1.16 [26].

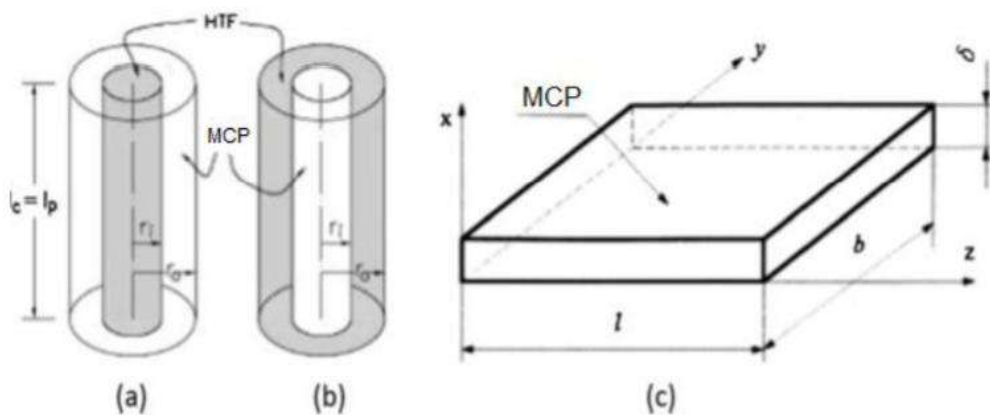


Figure 1.16: Types de configuration de Conteneurs de MCP: (a) tube et calandre, (b)Récipient cylindrique; (c) Récipient rectangulaire [26]

1.5.2. Méthodes de conditionnement des MCP dans les applications de stockage thermique

Le conditionnement des MCP pour leur application dans les dispositifs et systèmes de stockage thermique doit obéir à certaines exigences [27] :

- Le matériau du conteneur de conditionnement doit être compatible avec le MCP et ne doit subir ni oxydation, ni ramollissement ou toutes autres dégradations.
- Le conteneur de conditionnement doit assurer une parfaite étanchéité quand le MCP change de l'état solide à l'état liquide, le liquide ayant une faible viscosité le taux de fuite se trouvant fortement augmenté.
- Le conteneur doit pouvoir résister à la dilation et au changement de volume du MCP en phase liquide, ce changement peut casser le conteneur si celui absorbe le changement de volume. Il existe deux techniques pour conditionner les : Les MCP soit en micro encapsulation, soit en macro encapsulation. Ces derniers sont intégrés soit dans les matériaux de construction, soit dans les échangeurs de chaleur.

a) Macro encapsulation

La macro encapsulation est un dispositif où le MCP est emballé dans des contenants aux dimensions décimétriques à métriques (sachets, bouteilles de plastique, etc.). Ces MCP macro encapsulés peuvent être utilisés comme parties constituantes d'échangeur de chaleur. Ces MCP macro encapsulés sont généralement fabriqués pour chaque application visée. La faible conductivité thermique des MCP peut devenir dans le cas d'une macro encapsulation un problème de transfert de chaleur, voir Figure 1.17.

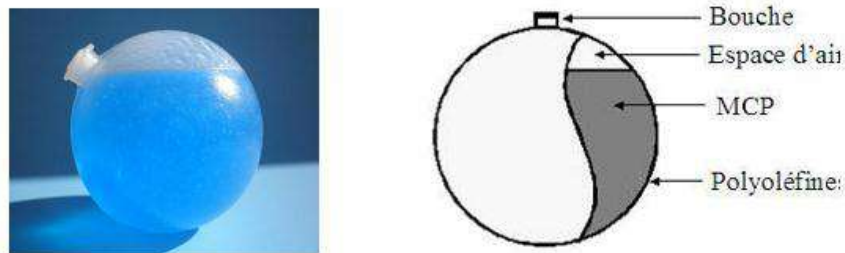


Figure 1.17: Conditionnement des MCP [27]

b) Micro encapsulation

La micro encapsulation est un procédé physique ou chimique qui permet d'emprisonner de petites gouttes solides ou liquides de MCP dans une coquille solide de 1 à 1000 μ m de forme sphérique ou cylindrique [28], voir Figure 1.18. Les MCP ainsi encapsulés peuvent être

ensuite utilisé dans un système de stockage d'énergie latente, l'avantage de cette géométrie interne de stockeur de MCP micro encapsulés est qu'elle offre une grande surface d'échange. D'autre part, la faible conductivité thermique n'est pas un facteur limitant des transferts du fait des petites dimensions des vésicules. L'autre avantage de micro encapsulés est qu'ils sont aisés à manipuler et que leur intégration est adaptable aisément à tout système passif tels que les matériaux de constructions de type béton en plâtre ou panneau en bois reconstitué ou système actif.

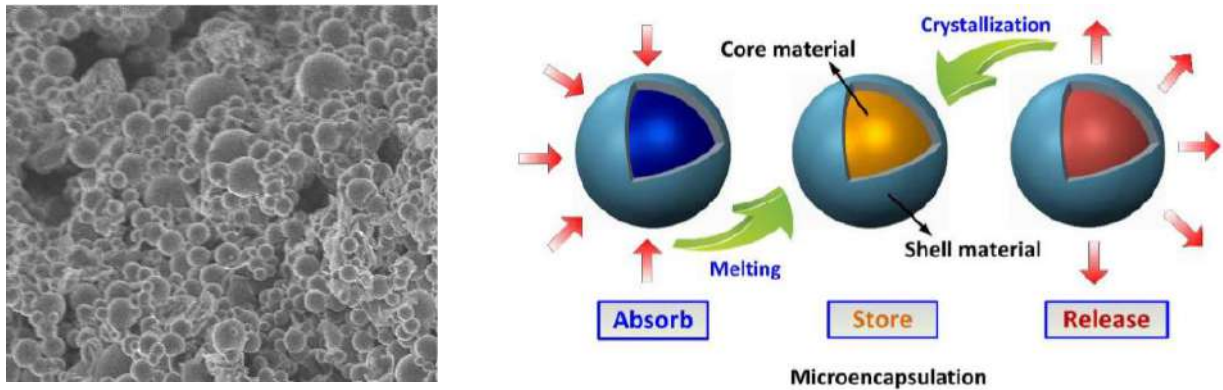


Figure 1.18: Procédé micro encapsulés [28]



Stainless steel ball capsule, EPS LTD



Cylindrical capsule, U.K.M (SERI)



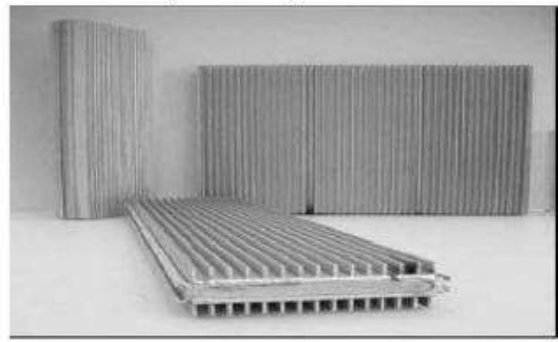
Stripe capsule (Dörken)



Spherical capsule



Bag capsule (Dörken)



Aluminum profiles with fins, (Climator)



Flat container (Kissmann)



Plate (Rubitherm Technologies GmbH)

Figure 1.19: Photographies de macro encapsulation de diverses géométries [29]

1.6. Aperçu bibliographique sur les MCP dans les capteurs solaires

Au cours des dernières années, une grande attention a été accordée à la possibilité de réduire le coût de l'énergie solaire et l'amélioration de l'efficacité de stockage de l'énergie solaire. Pour stocker de l'énergie thermique, deux types de systèmes de stockage ont été mis au point. Le premier est le système de stockage par chaleur sensible et l'autre est le système de stockage par chaleur latente. Par rapport à un stockage d'énergie par chaleur sensible, le stockage par chaleur latente est plus avantageux grâce à la grande capacité de stockage et le comportement isotherme pendant le mode de fusion. Le stockage thermique par changement de phase est une technologie innovante et prometteuse en matière d'économie d'énergie. Une des applications importantes de stockage de l'énergie solaire par chaleur latente en utilisant des matériaux à changement de phase, font l'objet de nombreux travaux.

Les capteurs solaires thermiques présentent certains problèmes et limitations, ils nécessitent des niveaux d'irradiation élevée afin d'avoir une efficacité thermique acceptable, ainsi que les problèmes des pertes thermiques élevés en travaillant à des hautes températures. Par conséquent, les installations solaires doivent être associées à des systèmes de stockage d'énergie thermique afin d'équilibrer la demande et l'offre de l'énergie.

La nouveauté tient aujourd'hui dans l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) dans le développement de la conception des capteurs solaires qui a pris une grande importance dans le monde pour mieux répondre aux besoins énergétique et thermiques. Sharmaa [30], a récapitulé des travaux de recherche sur ce sujet en examinant les systèmes de stockage avec MCP et leurs applications dans le domaine de solaire, de l'isolation des bâtiments et l'aérospatiale. Il a aussi présenté les techniques de mesure de la chaleur latente et de la température de fusion.

Actuellement, trois méthodes différentes ont été testées pour intégrer le PCM dans le système solaire thermique: PCM intégré à l'intérieur du réservoir stockage, ajout du PCM dans un système qui relie le capteur et le réservoir de stockage et PCM intégré directement dans la cavité qui forme l'absorbeur du capteur solaire [31].

L'intégration de PCM dans un capteur solaire en tant qu'un composant unique, supprime le besoin d'un réservoir de stockage conventionnel, minimisant ainsi l'espace et les coûts et améliore l'efficacité utile en réduisant les pertes de chaleur importantes lorsque le capteur

solaire est à sa température la plus élevée. Les PCM ont une grande capacité de stockage de chaleur sous forme de chaleur latente et leur comportement isotherme pendant la fusion des PCM prolonge avec succès la période de fonctionnement du capteur solaire.

Ces dernières années, de nombreuses recherches ont été menées sur l'utilisation des PCM pour l'énergie solaire. Plusieurs études expérimentales et numériques ont été étudiées dans lesquelles le PCM est intégré à des capteurs solaires, en particulier dans : les capteurs solaires plans, les panneaux solaires photovoltaïques (PV), les collecteurs paraboliques composés (CPC) et les concentrateurs cylindro-parabolique (PTC).

Kurklu et al [32], ont réalisé un nouveau type de capteur solaire qui présente deux sections, voir Figure 1.20, la première est rempli avec de l'eau et l'autre avec un matériau à changement de phase dont la température de fusion est située entre 45-50 °C. Les résultats expérimentaux ont montré que, pour une journée avec un ensoleillement élevé, la température du réservoir est maintenue à 30°C pendant toute la nuit. De plus les valeurs de l'efficacité thermique instantanée étaient entre environ 22% et 80%.

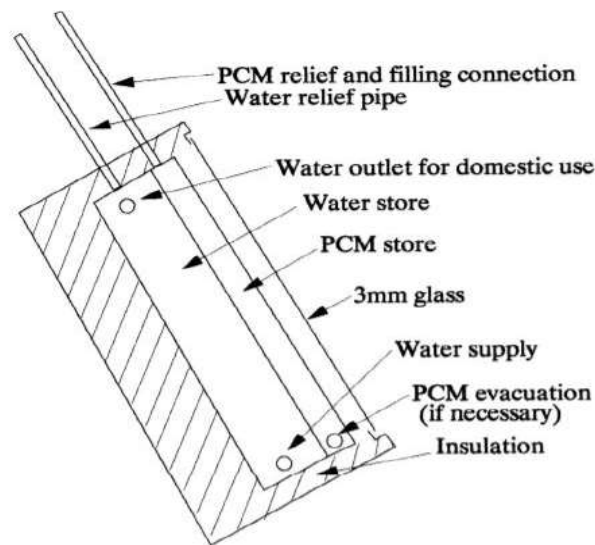


Figure 1.20: Schéma du capteur solaire et de ses parties [32]

Les premières études utilisant des PCM pour améliorer les performances thermiques du capteur solaire concernent le FPC. Le matériau à changement de phase PCM est placé sous la plaque d'absorption du collecteur.

Bellah et al [33], ont étudié expérimentalement la performance d'un matériau à changement de phase intégré à un capteur solaire plan, le matériau utilisé comme MCP est la cire de paraffine, l'absorbeur joue le rôle à la fois de l'absorption de l'énergie solaire et de stockage MCP, et a été déchargé à l'eau froide circulant dans les tuyaux situés à l'intérieur de la cire. Les résultats expérimentaux obtenus ont montré que, dans le processus de charge, la moyenne des coefficients de transfert de chaleur augmente fortement avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche fondue car la convection naturelle devient plus forte. Dans le processus de décharge, le gain de chaleur utile a augmenté à mesure que le débit augmente, voir Figure 1.21.

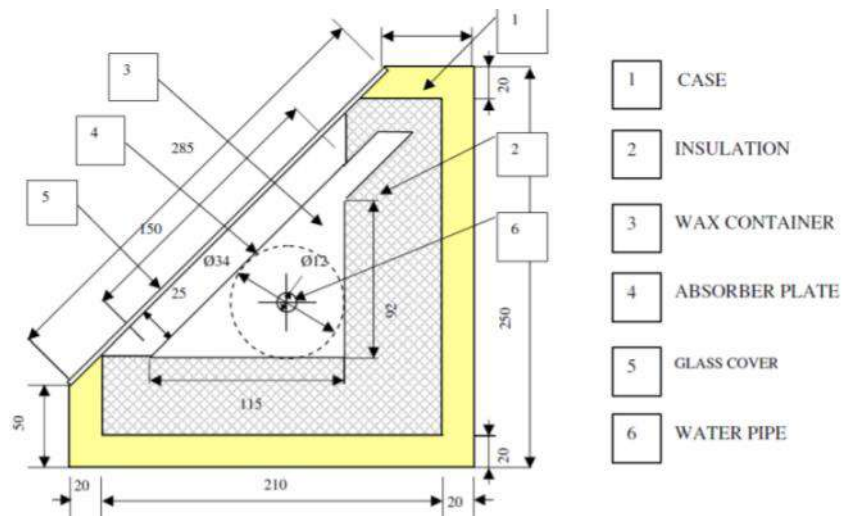


Figure 1.21: Représentation schématique de l'appareil expérimental [33]

Malvi et al. [34] ont étudié les performances des capteurs solaires plan avec différents débits du fluide caloporteur et ils ont montré l'effet du PCM sur le coefficient moyen de transfert thermique. Il a été observé qu'en utilisant le PCM, la valeur du facteur de transfert de chaleur FR diminue jusqu'à la valeur de 0,28, ce qui est inférieur à la valeur de FR sans le PCM. Cependant, l'utilisation du PCM a facilité le stockage de chaleur latente et a fourni du chauffage même en l'absence de la lumière solaire. Les résultats expérimentaux ont montré que le coefficient moyen de transfert thermique augmente avec l'épaisseur de la couche de paraffine fondue, qui est dû à la convection naturelle.

El Qarnia [35] a utilisé le PCM dans une unité de stockage d'énergie thermique séparée du capteur solaire. Les performances thermiques de cette unité de stockage de chaleur latente solaire ont été étudiées avec trois PCMs. Ils ont constaté que l'utilisation de n-octadécane

comme PCM n'est pas bénéfique car la température de sortie de l'eau chaude est inférieure à 28°C. Outre la cire de paraffine (P116), la température de sortie de l'eau chaude varie entre 36°C et 47°C. Les résultats ont également montré que l'acide stéarique offre une plage acceptable de la température de sortie de l'eau chaude, voir Figure 1.22.

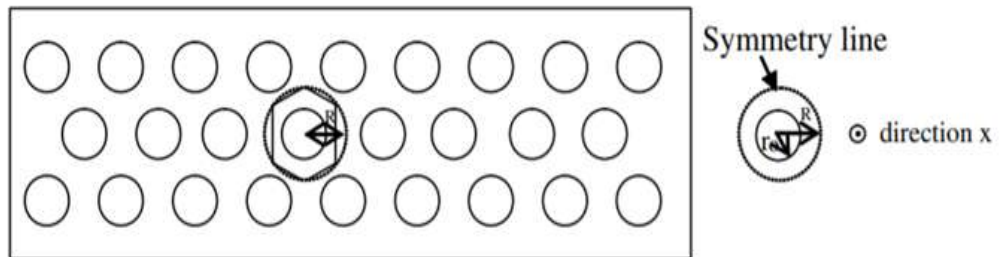


Figure 1.22: Unité de stockage par changement de phase [35]

Sandali et al. [36] a constaté que l'intégration de 1 cm de couche de PCM sous la plaque absorbante augmente le temps de fonctionnement quotidien des capteurs de 2 heures même après le coucher du soleil et la température de sortie de l'eau a été améliorée d'une valeur de 10°C, voir la figure 1.23.

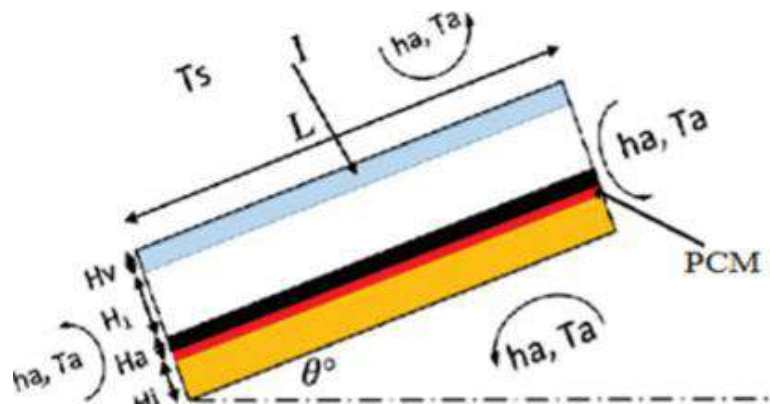


Figure 1.23: Schéma d'un collecteur solaire avec PCM [36]

Djim et al. [37], ont étudié analytiquement et expérimentalement l'évolution du front de fusion d'une plaque de paraffine (R52-R54) comme MCP soumise à l'ensoleillement. L'étude a été menée sur un capteur stockeur parallélépipédique, voir Figure 1.24.

Ils ont conclu que la confrontation des résultats numériques et expérimentaux a montré que la conduction est prépondérante dans la phase solide, la concordance est un peu net au début.

Par contre quand la fusion commence, la convection se développe rapidement et le modèle s'écarte nettement de la réalité.

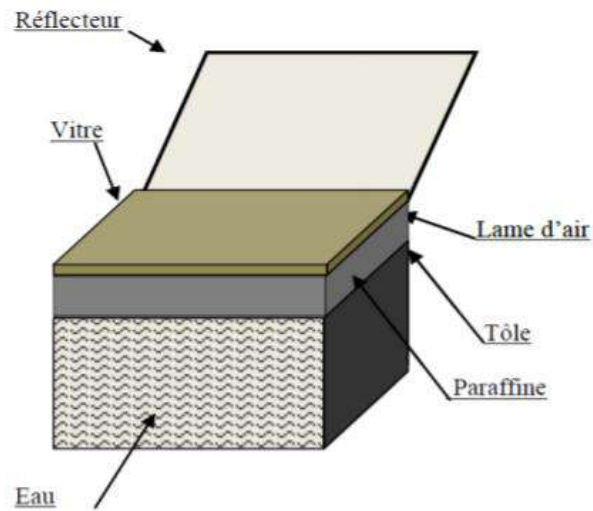


Figure 1.24 : Schéma de principe du dispositif [37]

Summers et al [38], ont optimisé un capteur solaire utilisé pour le cycle d'humidification-déshumidification avec intégration d'un matériau à changement de phase (paraffine wax) comme un système de stockage d'énergie, voir Figure 1.25.

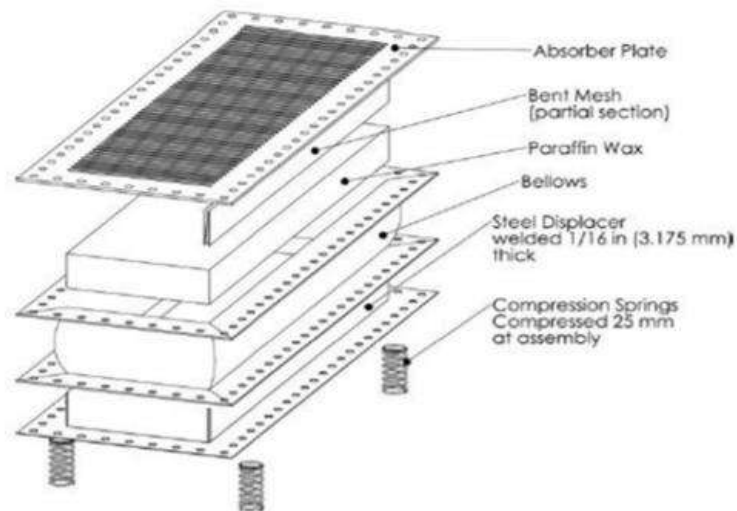


Figure 1.25 : Schéma du système utilisant [38]

Dans cette conception, comme le montre Figure.1.25, un matériau à changement de phase (PCM) est placé en dessous de la plaque d'absorbeur en contact direct avec l'absorbeur. Cela

permet à la chaleur d'être transférée directement à partir de la plaque d'absorption sur le support de stockage, puis directement à partir du support de stockage à l'air lorsque le soleil ne brille pas. L'utilisation d'un système de stockage intégré élimine également la nécessité d'une boucle de fluide de travail secondaire et l'augmentation inhérente de la complexité et de coût. Les résultats expérimentaux ont montré un bon accord avec le modèle dans tous les cas essayés.

Li et al. [39] ont proposé un nouveau système de collecteur solaire/stockage solaire utilisant un Matériau à Changement de Phase. Un MCP composé par Erythritol et Graphite en fraction de masse de 3% a été testé. Un modèle numérique a été établi et validé expérimentalement pour étudier les performances du système de stockage dans le processus de charge et de décharge sous différentes températures d'intraveineuse d'eau et vitesses de fluide.

Les résultats ont confirmé que le système de stockage composite MCP avait de bonnes performances de stockage thermique et que l'efficacité moyenne de stockage quotidien était de 39,98 %. Le MCP absorbe la chaleur excessive accumulée dans les modules photovoltaïque qui atteignent jusqu'à 80°C, voir la Figure 1.26.

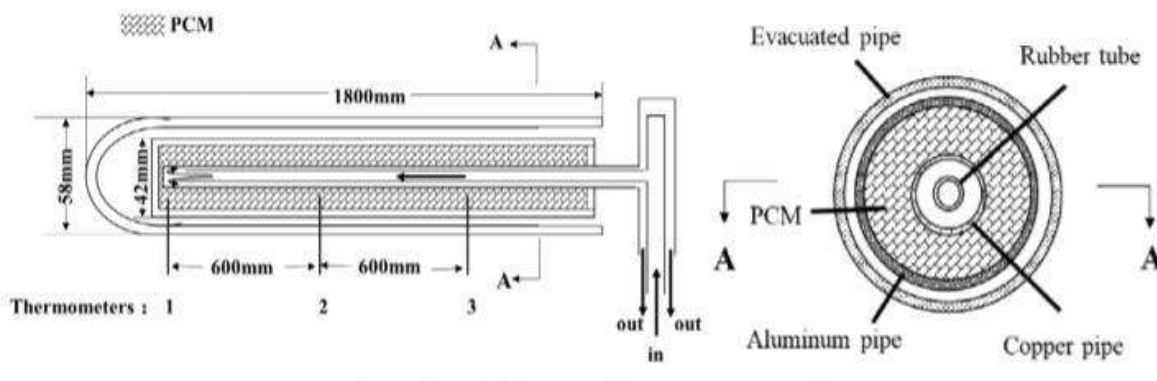


Figure 1.26 : Schéma d'une unité collecteur/stockage [39]

Hassan et al. [40], ont proposé un nouveau concept intégrant une couche de MCP liquide solide dans les panneaux photovoltaïques (PV) afin d'extraire l'excès de chaleur afin de maintenir une efficacité PV élevée et d'augmenter la durée de vie du PV en les maintenant à une température plus basse. L'énergie thermique stockée dans le MCP a été convertie en énergie électrique équivalente. Le MCP absorbe l'excès de chaleur et limite la température maximale de la cellule PV, augmentant ainsi l'efficacité, voir la Figure 1.27.

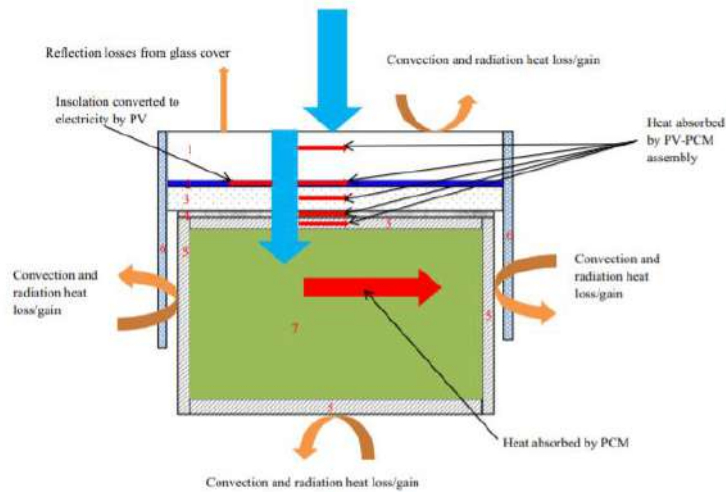


Figure 1.27: Panneaux photovoltaïques (PV) avec MCP [40]

Klemm et al.[41], ont proposé un nouveau concept de gestion thermique passive à évaluer en combinant un matériau de changement de phase avec des structures métalliques en fibre dans un module MCP pour avoir des propriétés personnalisées de transfert de chaleur. Le module a été monté à l'arrière d'un module solaire. Les résultats de la simulation ont prouvé que le pic de température du module solaire peut être réduit jusqu'à 20 K en appliquant un MCP avec un point de fusion à environ 54°C pour améliorer les performances des capteurs solaires thermiques voir la Figure 1.28.

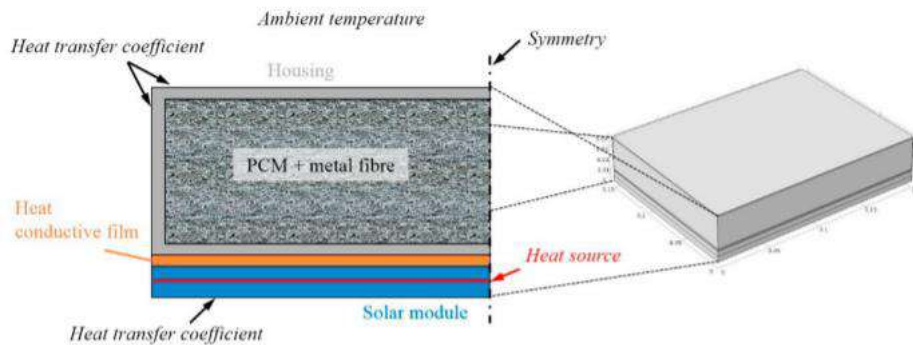


Figure 1.28: Concept et géométrie [41]

Serale et al. [42], ont proposé un nouveau fluide de transfert de chaleur basé sur l'exploitation de la chaleur latente de la fusion/solidification des particules en suspension appelées matériaux de phase à mousse. L'analyse numérique est présentée pour comparer les performances de cette technologie avec celle d'un simple capteur solaire thermique. Ils ont prouvé que l'efficacité instantanée et la conversion globale de l'énergie solaire du collecteur

augmentent quand un PCS est utilisé comme un fluide caloporteur pour les climats plus froids. La conversion d'énergie augmente de l'ordre de 4% à 6% pour les concentrations de

Chaabane et al. [43], ont étudié la performance thermique de l'intégration du MCP dans un système de concentration CPC. Ils ont utilisé un acide myristique et RT42-graphite comme MCP. Il a été placé dans le tube externe et l'eau dans le tube concentrique intérieur. Pour les deux MCP, la différence de température de l'eau de sortie a augmenté d'environ 12°C et le système a également présenté une augmentation de l'efficacité thermique pendant une plus longue période de temps pour les deux MCP considérés, voir la Figure 1.29.

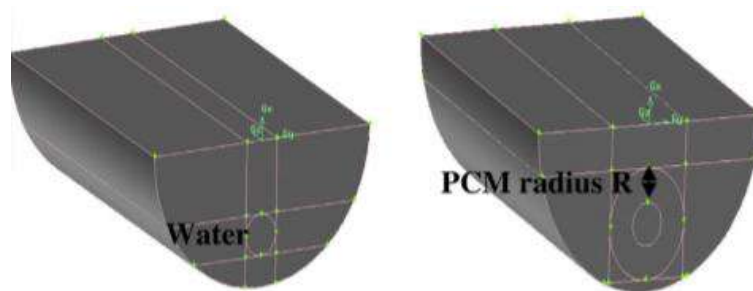


Figure 1.29 : Description du système avec et sans PCM [43]

Hailout et al. [44], ont présenté un modèle de PTC comprenant un système de stockage utilisant des matériaux composites placés à l'intérieur d'un tube à récepteur concentrique. Le matériau composite utilisé est basé sur des différents graphites. Ils ont développé un modèle numérique pour décrire le comportement du PCM lors du stockage de l'énergie thermique du rayonnement solaire et la décharge de cette énergie thermique lors du transfert de chaleur avec le fluide de transfert de chaleur (HTF).

Ils ont prouvé que ces MCP sont capables de stocker l'énergie solaire thermique sur une base quotidienne, ainsi que les matériaux composites utilisés ont permis d'atteindre un niveau élevé d'énergie thermique livré pendant le processus de déchargement.

Giovanelli et al. [45], ont conçu un nouveau capteur solaire plan intégré à un système de stockage à court terme basé sur les PCM afin d'éviter les variations soudaines de la température maximale du fluide de transfert de chaleur. La bonne inertie thermique du nouveau récepteur solaire pourrait empêcher les fluctuations pertinentes de la température du liquide de travail pendant 20min à 30min, afin de fournir une distribution de chaleur uniforme et un stockage de chaleur, voir figure 1.30.

Arunkumar et al.[48], ont étudié la performance d'un concentrateur solaire parabolique tubulaire concentrique contenant du MCP, couplé à un distillateur. Ils ont confirmé que, dans ce système, le MCP a augmenté la productivité de l'eau douce de 8 % par rapport à un distillateur solaire simple, voir figure 1.33.

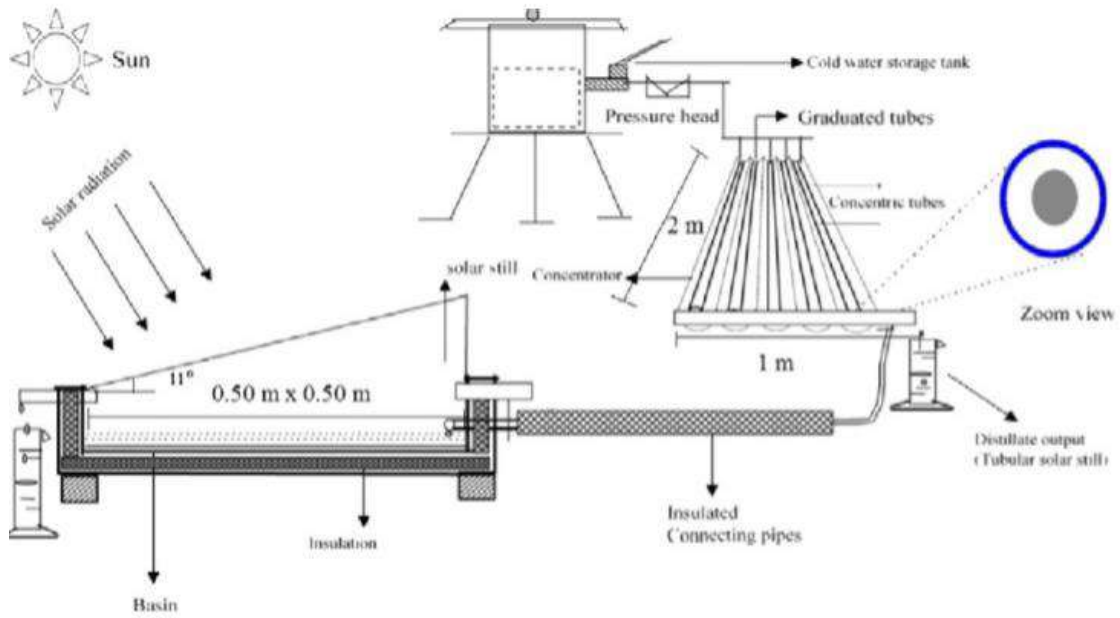


Figure 1.33 : Distillateur solaire couplé avec un capteur solaire avec MCP [48]

Senthil [49], a étudié l'utilisation des MCP organiques et inorganiques intégrés dans un la cavité du récepteur d'un concentrateur parabolique afin d'améliorer les performances thermiques. L'utilisation du PCM dans le capteur solaire a également produit une distribution uniforme de température dans le capteur.

Kuhe et al. [50], ont conçu un distillateur à simple étage, intégré avec le système de stockage d'énergie thermique par de la chaleur latente et couplé à un concentrateur parabolique. 14 kg de cire d'abeille ont été utilisés comme PCM sous la plaque d'absorption afin de garder l'eau distillée à une température relativement élevé même pendant les heures de coucher du soleil.

Les résultats expérimentaux ont montré que l'effet de stockage thermique augmentait la productivité de l'eau de 26% par rapport au distillateur sans PCM avec un rendement journalière de 85.3%, voir la Figure 1.34.

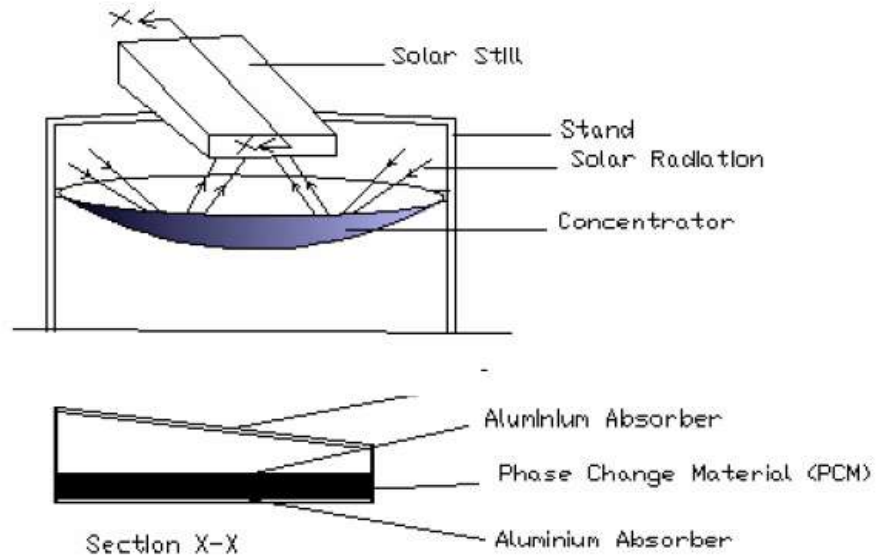


Figure 1.34 : Réflecteur parabolique couplé à un distillateur solaire [50]

Hassan et al. [51], on développé un système de chauffage solaire de l'air simple, intégré avec le système de stockage d'énergie thermique, comme indiqué sur la figure 1.35. Un ensemble de tubes en cuivre ont été remplis avec un matériau de stockage d'énergie thermique et placé comme absorbeur. Les résultats indiquent que l'élément chauffant rempli des MCP des températures de fusion 51°C et 43°C donne des meilleurs rendements avec un rendement journalière moyen variant entre 27% et 63% en fonction de la résistance à l'écoulement de l'air, de la température de fusion du MCP et de l'intensité du rayonnement solaire.

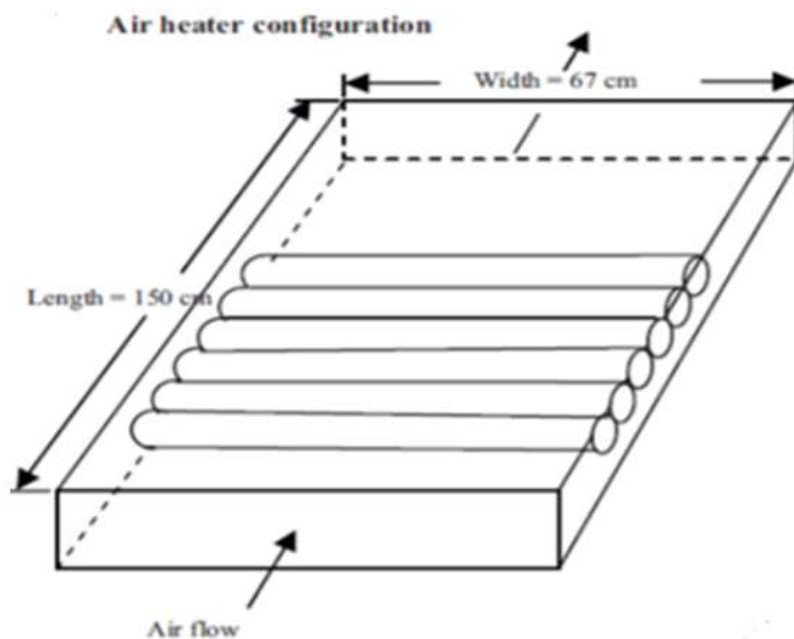


Figure 1.35: Configuration de chauffage solaire de l'air [51]

1.7. Théorie des concentrateurs cylindro-paraboliques

1.7.1. Introduction :

L'énergie solaire est à l'origine de toutes les énergies sur terre à l'exception de l'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie marémotrice. L'homme utilise l'énergie solaire pour la transformer en d'autres formes d'énergie: énergie cinétique, énergie thermique, énergie électrique ou énergie de la biomasse. L'énergie solaire peut être exploitée sous deux formes principales :

1. La conversion photothermique :

Cette conversion consiste en une transformation directe du rayonnement solaire en chaleur et la conversion photovoltaïque pour la production d'électricité. Nous traiterons dans le cadre de ce travail seulement la première voie de conversion. La conversion photothermique se fait à l'aide de collecteurs thermiques qui consistent en une transformation directe du rayonnement solaire en chaleur. Elle se fait selon deux manières : une captation avec concentration et sans concentration.

2. La conversion thermique :

La conversion thermique est appelée à fournir une contribution importante au bilan énergétique mondiale cela par la conversion de l'énergie noble (énergie solaire) en énergie thermique spontanément à température basse, moyenne ou élevée.

a) Conversion à basse température (inférieure à 80 °C) avec un rendement supérieur à 50% fait appel à des matériaux de type capteur plans pour le chauffage de l'eau sanitaire, l'eau des piscines, des locaux, et le séchage des produits agricoles. Ces capteurs fixes fonctionnent même par ciel couvert en captant le rayonnement solaire diffus. La plupart des techniques correspondantes sont considérées comme étant aujourd'hui techniquement et économiquement viables : elles sont au stade de la diffusion [70].

b) Conversion à moyenne température (de 80 à 200 °C) pour satisfaire à des besoins industriels (eau très chaude, vapeur) et la production de l'électricité avec un bon rendement, ce qui requiert des dispositifs particuliers pour capter et concentrer l'énergie solaire, mobiles soient-ils (pour suivre la course apparente du soleil). Ces capteurs ne fonctionnent pas que par ciel clair. Le rendement peut atteindre 60%, Les applications de ce genre d'installations sont surtout industrielles, leur inconvénient principal réside dans le fait qu'elles n'utilisent que le rayonnement solaire direct [71].

C) Conversion à haute température : Il s'agit des centrales thermoélectriques pour la production de la chaleur industrielle et la transformation chimique. La température atteinte est supérieure à 200°C, elle peut atteindre des niveaux plus élevés. Ces installations se composent d'une vaste surface d'héliostats qui réfléchissent le rayonnement solaire et le concentre sur un récepteur, ce dernier transmet le rayonnement solaire à un fluide (eau, air, métaux liquides) sous forme de chaleur qui sera transmise vers un circuit secondaire. Le rendement de ces installations est relativement bas, il est de 20% approximativement. Une installation de ce type a été expérimentée sur le site d'Odeillo [72].

1.7.2 Modes de captations :

On peut capter directement le rayonnement solaire au moyen des panneaux plans (capteurs plans) réceptifs, convenablement équipés dénommés insolateurs, au lieu de faire la captation directe on peut la faire à l'aide des concentrateurs, on les nomme capteurs solaires à concentration. Ces deux types de capteurs réagissent réciproquement avec les radiations solaires.

1) Mode direct (capteur plan) :

Un capteur solaire plan est un collecteur solaire, conçu pour recueillir l'énergie solaire transmise par rayonnement et la communiquer à un fluide caloporteur (gaz ou liquide) sous forme de chaleur voir Figure 1.36. Cette énergie calorifique peut ensuite être utilisée pour le chauffage de bâtiments, pour la production d'eau chaude sanitaire ou encore dans divers procédés industriels.



Figure 1.36 : Capteur plan [72]

2) Mode indirect (par concentration)

La conversion à moyenne et haute température concentre le rayonnement solaire au foyer d'un concentrateur optique, il est possible d'atteindre des températures élevées. Ce principe, connu depuis l'Antiquité, utilise des capteurs paraboliques, cylindro-paraboliques, ou des centrales dites à tour, voir figure 1.37.

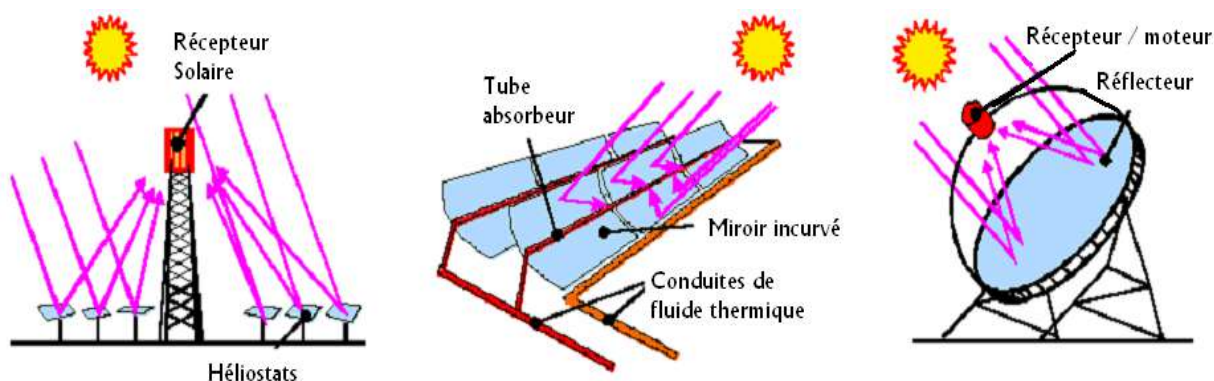


Figure 1.37 : Types des concentrateurs solaires [72]

1.7.2.1 Comparaison entre les deux modes de captation :

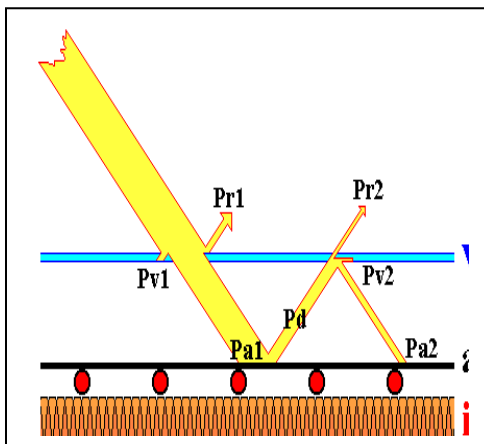


Figure 1.38 : Mode direct [72]

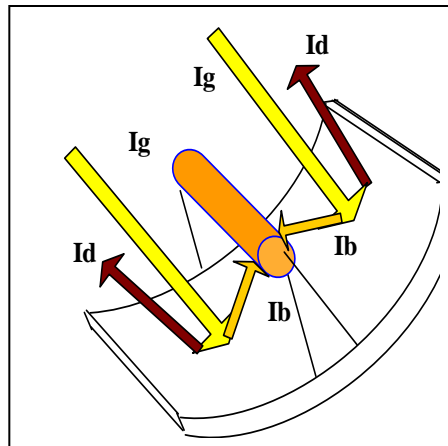


Figure 1.39 : Mode indirect [72]

Capteur plan : Le capteur plan est considéré comme un simple absorbeur des rayons solaires qui les transforme en chaleur, en absorbant les rayons solaires provenant de toutes les directions, voir Figure 1.38. Le rayonnement solaire est non seulement absorbé du ciel mais aussi de tout l'environnement. Cela veut dire qu'un capteur plan est relativement insensible aux conditions du ciel. Aussi, la réalisation d'un capteur plan ne demande pas une conception compliquée

Concentrateur Solaire : Le rayonnement solaire (**Ig**) n'est pas concentré entièrement, il y a une partie (**Id**) qui sera perdu définitivement et une partie (**Ib**) qui sera rerayonnée vers l'absorbeur, voir Figure 1.39. La concentration du rayonnement solaire permet de concentrer l'énergie solaire sur un récepteur où circule un fluide caloporteur. Cette concentration entraîne une augmentation de l'intensité du rayonnement solaire incident par conséquent les températures obtenues sur le récepteur (absorbeur) peuvent atteindre plusieurs centaines de degrés Celsius. Pour être efficaces, les concentrateurs doivent se déplacer pour suivre la course apparente du soleil.

1.7.3 Importance de la concentration solaire

Le tableau 1.7, résume les avantages et les désavantages des systèmes à concentration comparés aux capteurs plans.

Tableau 1.7 : Comparaison entre capteur solaire plan et un concentrateur solaire [73].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Réduction des surfaces réfléchissantes. • Réduction des pertes thermiques. • Densité d'énergie au niveau de l'absorbeur est grande donc le fluide caloporteur peut travailler à température plus élevée pour la même surface de captation d'énergie. • Les systèmes à concentration peuvent être utilisés à la production d'énergie électrique. • Le stockage est plus faible pour des systèmes à concentrateurs qu'à capteurs plans. 	<ul style="list-style-type: none"> • Le rayonnement diffus est très mal utilisé dans les systèmes à forte concentration, seul le rayonnement direct est concentré. • Les concentrateurs nécessitent un système de poursuite du soleil qui va augmenter le coût du système à installer. • Le pouvoir réflecteur des miroirs décroît dans le temps et il faut les réargenter ou le repolir. • L'absorbeur est soumis à de grandes variations de température lors des passages nuageux.

1.7.4 Types des concentrateurs solaires:

a) Concentrateur parabolique :

Cette filière est un peu la référence en ce sens qu'elle met en œuvre la meilleure surface réfléchissante possible : une parabole de révolution. Avec ce miroir, tout rayon incident parallèle à l'axe optique passe, après réflexion, par un même point, voir Figure 1.40. On appelle ce point

le (foyer). Pour fonctionner correctement, un tel miroir doit viser en permanence le soleil (dont l'image se forme alors au foyer). On y parvient en animant son axe d'une double rotation. Mais ceci implique, on s'en doute, une limitation de taille, la surface de collecte ne pouvant guère dépasser ici quelques centaines de mètres carrés dans des conditions économiques raisonnables.

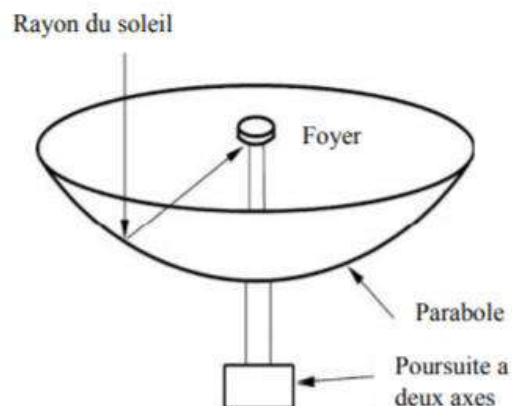


Figure 1.40 : Concentrateur parabolique [73]

b) Tour solaire (Miroirs de Fresnel) :

Un ensemble de miroirs, mobiles grâce à un système automatique, renvoie en permanence le rayonnement solaire à une chaudière située au sommet d'une tour. L'énergie reçue par la chaudière permet le fonctionnement d'une machine à vapeur qui entraîne une génératrice de courant, voir Figure 1.41.

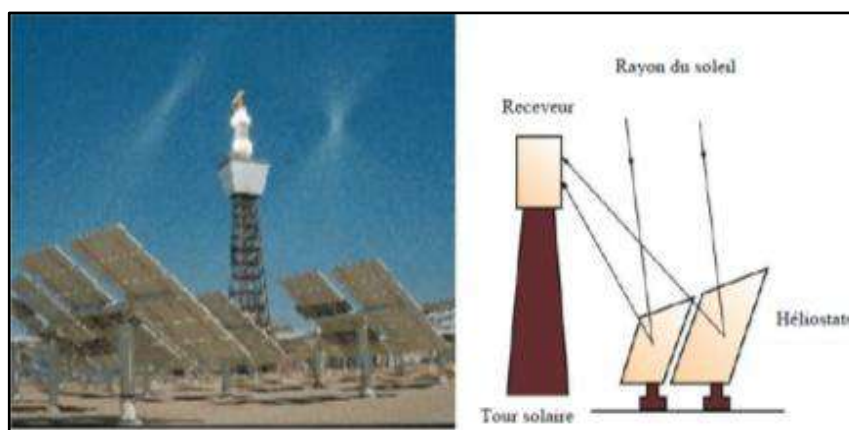
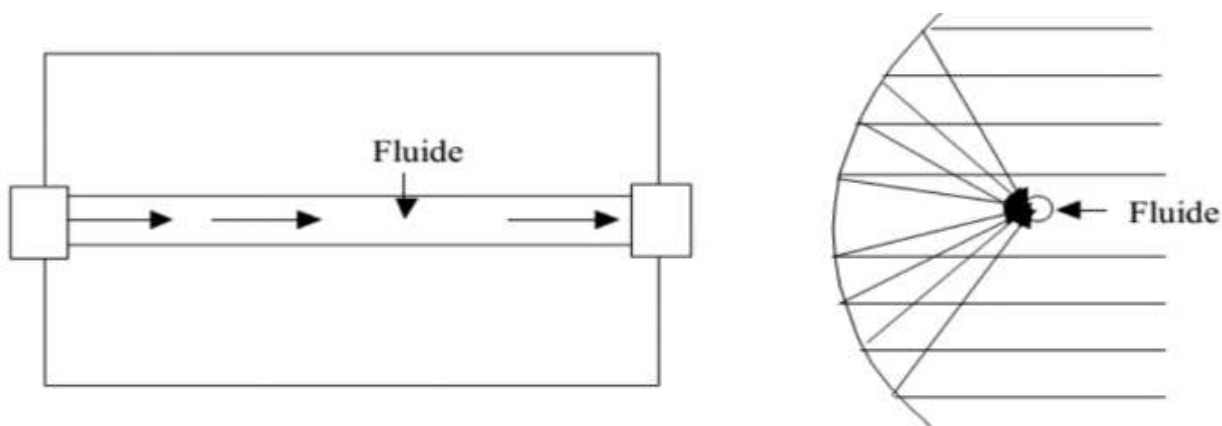


Figure 1.41 : Central à tour [73]

Les centrales solaires à miroir de Fresnel pourraient néanmoins devenir plus compétitives que leurs voisines : les centrales à réflecteurs paraboliques et cylindro-paraboliques. Le principe d'un concentrateur de Fresnel réside dans ses miroirs plans (plats) dits "Réflecteurs compacts linéaires". Chacun de ces miroirs peut pivoter en suivant la course du soleil pour rediriger et concentrer en permanence les rayons solaires vers un tube absorbeur. Un fluide caloporteur est chauffé jusqu'à 500°C en circulant dans ce tube horizontal. Cette énergie est transférée à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne une turbine qui produit de l'électricité. Principal avantage de cette technologie, les miroirs plats sont bien meilleur marché que les miroirs paraboliques.

C) Concentrateur cylindre-parabolique

Le concentrateur à surface cylindre-parabolique (CCP) se distingue par sa simplicité et représente un investissement relativement réduit, ainsi que ses performances dans la production de hautes températures, surtout dans le domaine de la production de la vapeur et la production de l'eau chaude. Le collecteur cylindre-parabolique est le plus préféré des capteurs pour la production de la vapeur d'eau à hautes températures qui peut être obtenue sans altération du rendement. Il se présente comme un module ayant un réflecteur (miroir ou matériau réfléchissant) de forme cylindro-parabolique, voir Figure 1.42. Cette géométrie permet de focaliser l'énergie solaire incidente selon une génératrice linéaire où est placé un tube absorbeur dans lequel circule un fluide caloporteur. Pour augmenter le principe de captation ainsi que le processus du transfert de chaleur, on a généralement recours à des surfaces sélectives. Une enveloppe transparente souvent en verre recouvre le tube absorbeur



1.7.5 Description et principe de fonctionnement du concentrateur (CCP)

Le concentrateur est constitué d'un long miroir en aluminium incurvé focalisant l'énergie solaire sur un absorbeur en cuivre, qui se trouve le long de la ligne focale, au dessus duquel est placée une couverture transparente, voir Figure 1.43. L'énergie solaire réfléchiée par les miroirs traverse la couverture transparente et se concentre sur le tube absorbeur. L'énergie absorbée n'est pas intégralement transmise au fluide caloporteur, puisqu'une partie est cédée par rayonnement et par convection par l'absorbeur à l'enveloppe en verre, qui à son tour échange de la chaleur par convection avec l'environnement et par rayonnement vers le ciel.

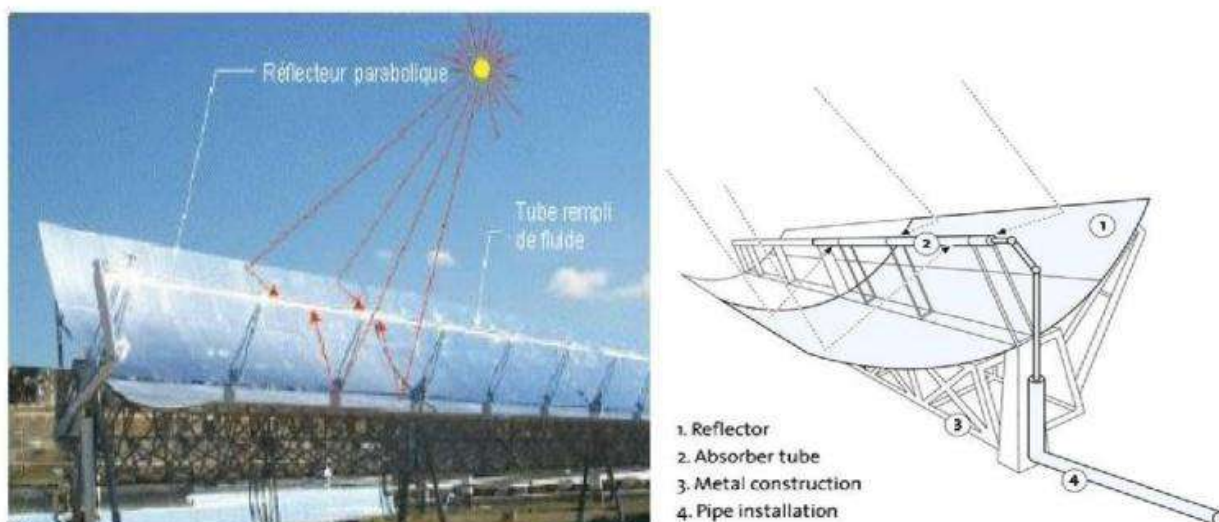


Figure 1.43 : Composants d'un concentrateur cylindro-parabolique [74]

1.7.5.1 Collecteur :

Le collecteur est la composante de base du champ solaire. Il est constitué d'un réflecteur cylindro-parabolique (miroir), d'une structure métallique (en acier), d'un tube récepteur et d'un système de poursuite solaire. La structure métallique du réflecteur doit être suffisamment solide pour résister aux importantes contraintes mécaniques liées au vent. Elle doit de plus être munie d'extrémités assurant la compatibilité entre les dilatations thermiques inégales de l'acier [75].

1.7.5.2. Couverture transparente (le verre)

Une couverture transparente est utilisée dans ce type de collecteurs solaire, du fait de sa transparence au rayonnement solaire visible et afin de réaliser le phénomène de l'effet de serre. Le type de verre utilisé est à faible teneur en oxyde de fer. II.4.3. Le fluide caloporteur : Un

fluide caloporteur est chargé de transporter la chaleur entre deux ou plusieurs sources de température. Il accumule l'énergie captée au niveau du tube. Une variété d'huile est généralement utilisée et permet d'atteindre une température de l'ordre de 400°C.

1.7.5.3. Réflecteur :

Les réflecteurs d'un CSP étaient généralement en miroir ou autre métal réfléchissant. Les miroirs sont composés de verre pauvre en fer, ce verre est recouvert d'une pellicule d'argent en sa partie inférieure et d'un enduit spécial de protection. Le matériau réfléchissant le mieux indiqué est l'aluminium pur, l'acier inoxydable a été expérimenté mais il n'est pas conseillé parce que son pouvoir de réflexion est insuffisant. Pour pouvoir choisir un réflecteur cylindre-parabolique. On aura toujours intérêt à adopter la géométrie idéale pour obtenir une bonne concentration géométrique Figure.1.44. Un réflecteur de bonne qualité peut réfléchir 97% du rayonnement incident.



Figure 1.44 : Miroir cylindro parabolique [75]

1.7.5.4. Tube absorbeur :

L'absorbeur est le principal composant dans le concentrateur cylindro-parabolique voir la figure 1.45, il représente généralement 30% du coût de la construction. Les pertes par échanges convectifs et radiatifs à l'extérieur sont très importantes, afin de les limiter, une enveloppe en verre recouvre l'absorbeur et permet en faisant le vide dans l'espace annulaire d'éliminer les pertes thermiques par convection entre le tube absorbeur et l'enveloppe du verre. Les pertes de

chaleur peuvent être réduites aussi en réduisant l'émissivité dans l'infrarouge du tube absorbeur (cuivre ou aluminium) à l'aide des surfaces dite sélectives. Ces surfaces sont de couleur foncée afin d'absorber le maximum de rayonnement solaire en émettant très peu d'infrarouges, de nos jours les fabricants emploient des revêtements utilisent des oxydes de chrome, de nickel ou de titane réalisé par plusieurs méthodes (projection sous vide, électrolyse, action chimique...).

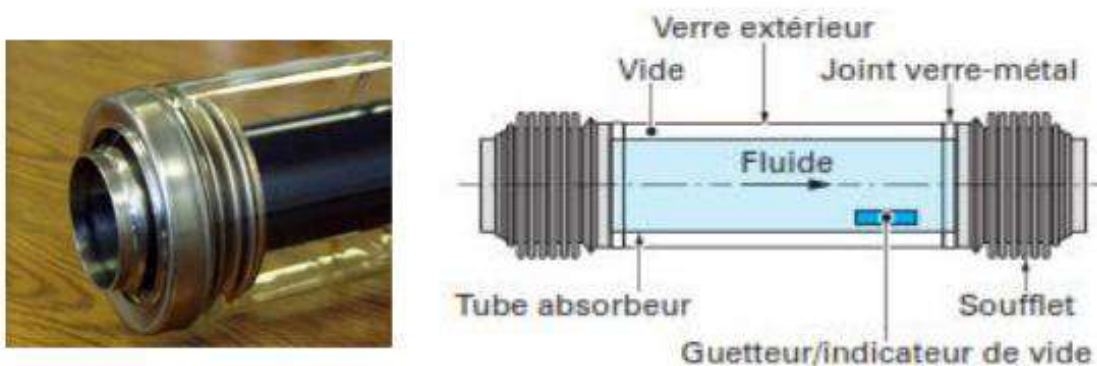


Figure 1.45 : Structure de l'absorbeur [75]

- Le tube absorbeur dans le quel circule le fluide caloporteur à l'intérieur. Le tube absorbeur est souvent en cuivre recouvert d'une couche sélective (peinture noire) appropriée et entouré d'un tube en verre, comme il est représenté dans la figure 1.46, il est placé le long de la ligne focale du Concentrateur cylindro-parabolique.

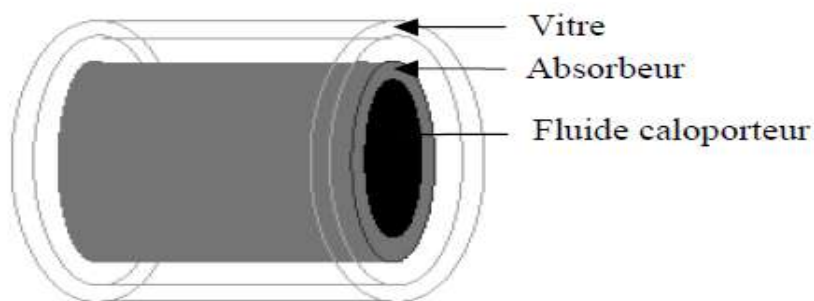


Figure 1.46 : Schéma d'un élément du tube absorbeur [75]

- Les échanges thermiques existant dans le système concentrateur ont lieu entre les trois éléments : le fluide caloporteur, l'absorbeur et la vitre, tel que représenté dans la figure

(1.47). Le rayonnement solaire incident réfléchi par les miroirs paraboliques tombe sur l'absorbeur, après passage à travers la vitre.

- Cette énergie solaire incidente absorbée, n'est pas entièrement transmise au fluide caloporteur, où une partie est dissipée sous forme de perte de chaleur entre l'absorbeur et la vitre d'une part, la vitre et le milieu ambiant d'autre part.

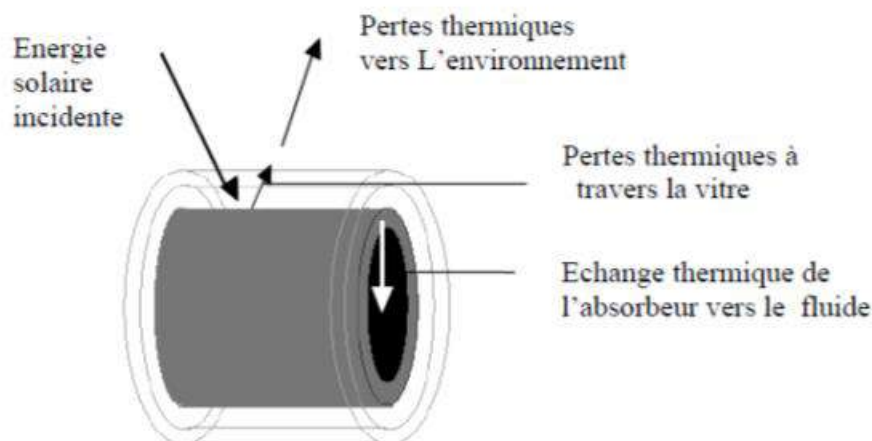


Figure 1.47 : Transfert thermique entre les différentes parties de l'absorbeur [76]

1.7.5.5. Fluide caloporteur HTF :

Le type de fluide de transfert de chaleur dans le domaine solaire et ses caractéristiques thermiques sont primordiales pour le bon fonctionnement du système solaire. En raison de la stabilité thermique du Therminol VP-1 est seulement tenu à des températures de 400°C. Le Therminol VP-1 est un fluide synthétique à base d'hydrocarbure, il se compose d'un mélange 75% d'oxyde diphényle et de 25% de diphényle [76]. Dans notre étude on utilise l'eau comme fluide caloporteur dans le but de production de la vapeur d'eau directement sur le tube absorbeur.

1.7.6. Modes d'orientation d'un CCP:

Il s'agit là d'un problème important dans l'utilisation des capteurs à rayonnement concentré, puisque la position apparente du soleil par rapport à un point de captation est constamment variable, nous serons donc obligés de modifier constamment la position du capteur pour tenir compte de celle du soleil. Alors on peut augmenter le flux d'énergie absorbé au niveau de l'absorbeur par une orientation optimale du système. Les concentrateurs solaires sont affectés par le rayonnement direct, c'est pour cela que l'orientation des concentrateurs est relative à la

direction de la propagation du rayonnement direct, ceci exige une poursuite continue du soleil. Plusieurs mécanismes d'orientation ont été conçus pour orienter le mouvement du concentrateur, ce mouvement est nécessaire pour conjuguer la conception du système optique.

Le rôle du mécanisme de poursuite est d'adapter l'inclinaison du concentrateur de manière à ce que la radiation solaire incidente soit toujours perpendiculaire au plan d'ouverture du concentrateur (angle d'incidence nulle). Pour un système cylindrique, il faut tourner le système autour d'un seul axe de rotation Nord-Sud ou Est-Ouest figure 1.46 ou incliné et parallèle à l'axe de terre (dans ce cas le taux de rotation est de $15^\circ/h$)

La poursuite solaire peut être sur un seul axe ou autour de deux axes. Dans le premier cas le mouvement peut être de trois manières :

- Est-Ouest horizontal, le tube récepteur du concentrateur est parallèle à l'axe Nord-Sud.
- Nord-Sud horizontal, le tube récepteur du concentrateur est parallèle à l'axe Est-Ouest.
- Est-Ouest polaire, le mouvement doit être suivant l'axe de la terre avec une inclinaison égale à la latitude du lieu

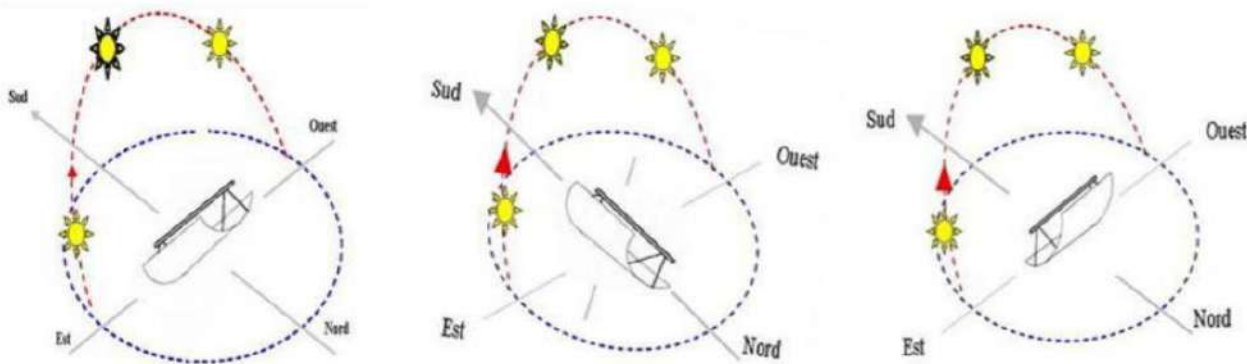


Figure 1.48 : Les modes de poursuite solaire d'un CCP [76]

1.8. Capacité globale des CSP à installer sur la période 2015-2021 en Algérie

La capacité mondiale installée des technologies relatives aux énergies renouvelables est en nette augmentation. Cet intérêt particulier aux énergies renouvelables est dicté essentiellement par les problèmes environnementaux, suite à l'utilisation irrationnelle des combustibles fossiles. Ces formes d'énergies, en particulier le solaire, présentent une réelle opportunité pour l'Algérie pour diversifier ses formes de consommation énergétique, qui étaient basées exclusivement sur le pétrole et le gaz, par un nouveau mix énergétique. Avec un bon ensoleillement, l'Algérie présente les conditions favorables au développement des technologies solaires.

L'Algérie possédant un gisement solaire important, la puissance solaire maximale en tout point de notre pays est d'environ 1Kw/m^2 . L'énergie journalière maximale moyenne (ciel clair, mois de juillet) dépasse les 6Kw/m^2 et l'énergie annuelle maximale en Algérie est de l'ordre de 2500KW/m^2 [77]. Par sa position privilégiée, l'Algérie dispose d'un grand solaire du bassin méditerranéen. La durée moyenne d'ensoleillement du territoire algérien dépasse les 2000 heures annuelles, pour atteindre près de 3500 heures d'ensoleillement dans le désert du Sahara. Aujourd'hui, nous captons l'énergie solaire pour chauffer les maisons, l'eau et pour produire de l'électricité, et cela au moyen de trois différentes méthodes et technologies: Le solaire passif, Le solaire actif et l'électricité solaire. En 2017 l'Algérie est classée juste 18e en Afrique en termes de capacité installée en énergies renouvelables, selon un rapport publié par l'Agence internationale des énergies renouvelables (Irena).

L'Algérie compte relancer le gigantesque projet Desertec qui entend faire du désert algérien, une énorme ressource d'énergie solaire. L'Algérie pourra produire 40 % de sa consommation d'électricité d'ici 2025 à partir des énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire à concentration (CSP) [77]. Les experts prédisent que l'Algérie pourrait couvrir à très long terme la majorité de ses besoins en électricité à partir de l'énergie solaire à concentration.

Les potentialités de l'Algérie en la matière sont certainement beaucoup plus importantes par rapport aux perspectives de développement affichées dans le cadre du programme de développement des énergies renouvelables (EnR) adopté récemment par le gouvernement. En effet, les objectifs tracés dans le cadre de ce programme sont réalistes et réalisables à l'horizon affiché (2030), en tenant compte des technologies actuelles disponibles sur le marché et des

moyens financiers à consacrer. Bien évidemment, si les conditions essentielles seront réunies, c'est-à-dire si les moyens financiers, humains et organisationnels sont mis en œuvre, les objectifs de ce programme seront atteints à l'échéance fixée.

La première centrale hybride solaire-gaz en Algérie a été inaugurée le 14 Juillet 2011. Située à Hassi R'mel, cette centrale a été dénommée SPP I, du nom de l'entreprise qui l'a réalisée, Solar Power Plant One. La centrale SPP1 est située à 494.5 km au sud de la capitale Alger, Elle est implantée sur un terrain qui s'étend sur une superficie de 130 hectares.

La centrale SPP1 de Hassi R'mel (Figure 1.49) est hybride. On entend par là qu'elle fonctionne au gaz naturel et à l'énergie solaire. Elle produit 150 MW (puissance nette ISO) avec un apport solaire de 20% de la puissance nominale, soit 30 MW.



Figure 1.49 : Centrale hybride de Hassi R'mel [77]

SONELGAZ a initié d'autres programmes de développement de la production d'électricité d'origine renouvelable, notamment le solaire à concentration afin de diversifier ses sources d'énergie, sur la période 2011–2021[78].

Les sites identifiés pour accueillir des centrales CSP (zones considérées les plus aptes à y recevoir), sont les sites de Naama, Béchar, M'Ghaier, Ghardaïa, Laghouat, Ouargla, El Oued et Adrar. La puissance totale à installer au niveau du Réseau Interconnecté National (RIN) sur la

période 2015-2021 est de l'ordre de 300 MW en 2015 et 1975 MW à l'horizon 2021. Cette puissance est répartie par site et par année comme suit :

Tableau 1.8 : Programme de développement des CSP par site sur la période 2015-2021[78].

Sites	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Totale 2015-2021
Bechar	150						150	300
Naama	150		150					150
ElOued				200				150
M'Ghair					150			200
Ghardaïa						500		300
Ouargla							200	500
Laghouat								200
Adrar					175			175
Totale (MW)	300	0	150	20	325	500	200	1975

I.9. Promesses et avenir des concentrateurs solaires Cylindro paraboliques

La technologie de réflecteurs cylindro-paraboliques est la plus fréquente. Actuellement, elle est utilisée par les plus puissantes centrales solaires au monde. L'utilisation des concentrateurs cylindro-parabolique est particulièrement intéressante, puisque ces concentrateurs qui sont très développés dans les dernières années, notamment pour la production de la vapeur surchauffée pour alimenter des turbines à vapeur qui peuvent servir à assurer l'énergie nécessaire au fonctionnement des installations. L'amélioration du transfert de chaleur est l'objet principal de plusieurs travaux scientifiques, un grand nombre de chercheurs ont mené une multitude d'essais numériques et expérimentaux portant sur la description des phénomènes gérant le transfert thermique dans le tube absorbeur, l'effet de la nature des systèmes dans lesquels elle a lieu (géométrie spécialement), et les propriétés des fluides caloporteurs impliqués (propriétés physico-chimiques).

Les méthodes d'amélioration du transfert thermique comme la modification de la géométrie du tube absorbeur par l'insertion des ailettes, tube concentrique, ou par la suspension des additives

dans le fluide caloporteur comme des particules solides ou des bulbes de gaz..etc. d'autres techniques par l'utilisation des forces externes, les jets synthétiques, une force électrique, les vibrations..etc.

Actuellement les scientifiques solaires travaillent à la deuxième génération des centrales solaires à collecteurs cylindro-paraboliques utilisant la technologie des matériaux à changement de phase MCP qui fait l'objet de notre étude et les nanofluides , l'objectif est d'atteindre des températures plus élevées, ce qui permet d'augmenter le rendement des centrales solaires à concentration.

La production d'énergie à partir de concentrateurs cylindro-paraboliques est une méthode plus onéreuse que celle faisant appel aux combustibles fossiles. Donc il est utile de relever les énormes progrès enregistrés par la recherche dans ce domaine pour pouvoir maîtriser des technologies aussi difficiles que les écoulements avec changement de phase ainsi que des pressions du fluide caloporteur élevées. Quand on pense au bénéfice sur les coûts nous nous pouvons qu'applaudir les perspectives pleines de promesses qu'une telle technologie est prête à offrir au monde.

Chapitre 2
Théories et modélisation des problèmes de
la solidification /Fusion

2.1. Introduction

Le changement d'état liquide-solide d'un matériau est caractérisé par la transformation d'une phase liquide en une phase solide ou inversement. Cette réaction réversible s'accompagne d'une consommation (fusion) ou d'une restitution (solidification) d'énergie). Les deux phases solide et liquide sont caractérisées par la présence des forces de cohésion qui maintiennent les atomes en grande proximité. Dans un solide, les molécules vibrent autour des positions fixes d'équilibre, tandis que dans un liquide, les molécules sont libres et peuvent bouger entre ces positions. La manifestation macroscopique de cette énergie vibrationnelle est appelée énergie thermique. Les atomes dans la phase liquide sont plus énergétiques que dans la phase solide.

Le phénomène de fusion de solide nécessite une certaine quantité d'énergie pour surpasser les forces de cohésion qui maintiennent la structure solide. Cette énergie est connue sous le nom de « *chaleur latente de fusion* » du matériau et qui représente la différence dans les niveaux d'enthalpie entre l'état solide et l'état liquide. La solidification d'un liquide exige l'enlèvement de cette chaleur latente et la structuration des atomes dans des réseaux plus stable [52].

Dans le cadre de ce chapitre, on présente les différentes connaissances acquises sur le transfert de chaleur avec changement d'état où les deux phases liquide et solide sont en présence. Nous exposerons les principales méthodes développées pour résoudre ces problèmes.

2.2. Changement de phase solidification/fusion:

Le phénomène de changement de phase solidification/fusion est un phénomène le plus répandu dans la nature. Au point de vue macroscopique, il se caractérise par l'apparition d'une interface mobile qui sépare les deux phases (liquide et solide). On les appelle problèmes à frontière mobile. Ils possèdent une frontière mobile (frontière mobile au cours du temps, connue ou bien à déterminer) ou une frontière libre (frontière inconnue, mobile ou stationnaire) [53]. A cause de leur implication, il suscite un très grand intérêt non seulement dans les phénomènes naturels mais aussi dans les technologies de pointe, la sûreté nucléaire et l'industrie.

2.2.1. Processus du changement de phase

Les applications du processus du changement de phase sont très nombreuses [54]:

- Domaine des énergies renouvelables et non polluantes, le stockage d'énergie sous forme de chaleur latente est beaucoup moins coûteux que sous forme électrique. On exploite la chaleur latente d'un Matériau à Changement de Phase (MCP), c'est-à-dire la capacité à passer de l'état solide à l'état liquide (fusion) sous l'effet de la chaleur. L'énergie de changement de phase est absorbée lors de la fusion du MCP et est restituée lors de sa solidification.
- En géologie, on s'intéresse à la solidification de la lave volcanique et son influence sur l'activité des plaques tectoniques la solidification des coulées, en contact de la surface de la terre et de l'atmosphère.
- Le processus de changement de phase intervient lors de la fusion des glaces polaires et pose le problème de réchauffement de la planète.
- La fabrication des cristaux, nécessite aussi la maîtrise du processus de fusion/solidification.
- On rencontre le phénomène de changement de phase pendant le freinage d'un véhicule spatial (fusée et navette) lors de son rentrée dans l'atmosphère, risque de subir le phénomène d'ablation.
- La pose de peinture et des soudures
- La fabrication des composants électroniques, la fabrication de microstructures à l'aide de petites impulsions laser,
- La correction des matériaux par solidification après refusion au laser.
- La conservation des cellules biologiques (cellules sanguines, îlots pancréatiques, hépatocytes, etc.).
- La production d'air frais par circulation de ce dernier sur une surface de glace, etc.

Le changement de phase des matériaux représente un défi majeur dans différents domaines (métallurgie, coulé continue). Chaque année, plus d'un milliard de tonnes de métaux sont solidifiés dans le monde, principalement des alliages ferreux (acier et fonte) et de l'aluminium.

2.3. Forme d'interface solide/liquide:

Dans le cas de la solidification des matériaux, la cinétique de l'état change et plus précisément, la géométrie de la transition de phase de l'interface et son évolution dans le temps déterminent la structure et les propriétés de l'état final [55]. La détermination par mesure directe de l'interface mobile est généralement très difficile à réaliser. Le contrôle du front de solidification d'un matériau par simulation, en métallurgie, par exemple, permet de modifier ses propriétés mécaniques (dureté, ténacité ou force mécanique).

Ces propriétés dépendent principalement des paramètres utilisés dans la simulation (température, flux thermique, géométrie de l'interface solide/liquide et évolution de la vitesse). Il est donc nécessaire de contrôler l'interface solide/liquide pour obtenir des propriétés particulières souhaitées. La nature d'un changement de phase de solidification peut prendre plusieurs formes. Une possibilité de classification est présentée sur la figure 2.1. Cette classification est basée sur l'état d'une petite partie du matériau dans la région de changement de phase. Trois classes de changement de phase sont identifiées.

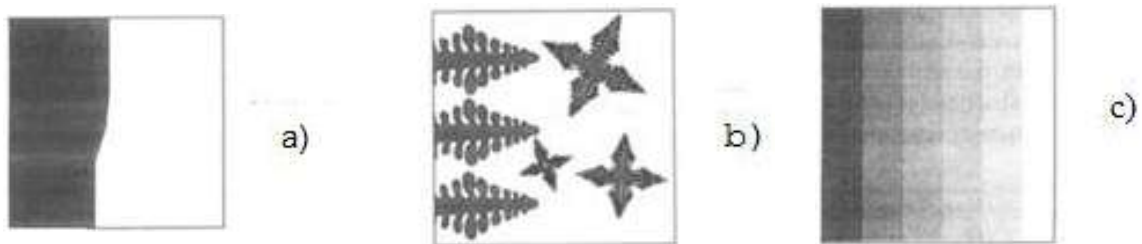


Figure 2.1 : Différentes microstructures de l'interface liquide/solide [55]

Cas a): La région de transition de phase où les deux phases solide et liquide coexistent est appelée l'interface. L'épaisseur de cette région peut varier de quelques angströms à quelques centimètres et sa microstructure est très complexe. Pour la majorité des matériaux purs, avec des conditions ordinaires de solidification à une température fixe T_f , l'interface apparaît localement sous une forme planaire avec un épaisseur négligeable et peut être considérée comme une interface pointue (surface) séparant la phase solide de la phase liquide à une température T_f (Exemple la solidification de l'eau ou de substances pures et d'alliages eutectiques).

Cas b) : Dans ce cas, la région de transition de phase peut avoir une épaisseur apparente, cette région résulte typiquement d'un super-refroidissement due à la présence des composants multiples (alliages), et sa microstructure peut apparaître comme étant

dendritique (voir figure 2.1) par exemple la solidification de la plupart des alliages métalliques. Dans le cas de mélanges et d'alliages non-eutectiques, le changement de phase s'étend sur une plage de température où les phases solide et liquide coexistent.

Cas c) : Les phases liquide et solide sont entièrement dispersées dans toute la zone de changement de phase et à l'échelle choisie, il n'y a pas d'interface distincte entre les phases solide et liquide (exemple la solidification des polymères ou des verres).

2.4. Physique du problème de changement de phase

2.4.1 Température de fusion

La température de fusion est une des caractéristiques essentielle du matériau. Elle représente la limite à laquelle se déclenche le stockage ou le déstockage de chaleur latente. Les échanges entre le matériau et le milieu extérieur à température T_e s'effectuent par des cycles de charge et décharge [56]. Ainsi la quantité de chaleur stockée par un MCP qui passe de l'état solide à l'état liquide est composée de trois termes qui sont :

Dans le cas des corps purs, la quantité de chaleur stockée en fonction de la température est illustrée par la figure 2.2.

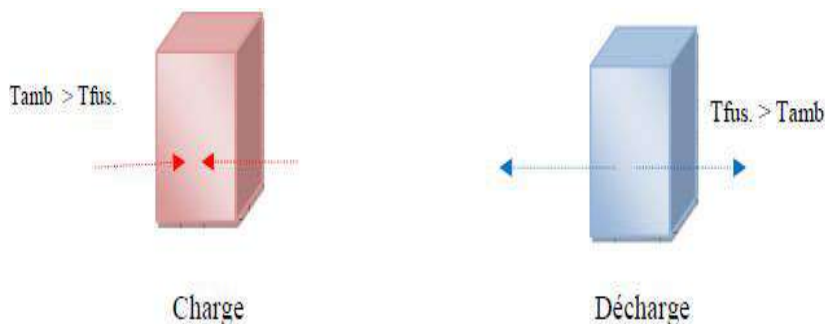


Figure 2.2 : Evolution de la chaleur en fonction de la température pour un corps pur [56]

2.4.2. Chaleur latente de changement de phase

La chaleur latente de changement de phase L est la quantité d'énergie nécessaire pour qu'un produit passe d'un niveau initial de symétrie cristalline à un nouveau niveau de symétrie cristalline : ce changement de symétrie est provoqué par le réarrangement des atomes. Selon la classification thermodynamique des transitions de phases, toutes les transitions liquide-solide peuvent être considérées comme étant du (premier ordre) car elles sont toutes associées à une discontinuité d'entropie correspondant à une chaleur latente de

changement de phase qui est aussi le changement de l'enthalpie à la transition. Obéissant la relation de Clapeyron, la chaleur latente de fusion L_f d'un corps pur est exprimée :

$$L_C = T_m \cdot \left(\frac{dp}{dT} \right) \cdot \Delta V$$

Où :

T_m : Température de fusion

ΔV : Variation de volume à la transition

p : pression

2.4.3 Solidification-fusion d'un produit pur

La principale caractéristique du changement de phase d'un matériau pur est que le dégagement (ou absorption) de la chaleur latente de transformation se passe à une température bien précise. Stefan a été l'un des premiers à étudier ce type de problème. En 1831, il a cherché à modéliser la fusion de la calotte glaciaire [56], figure 2.3.

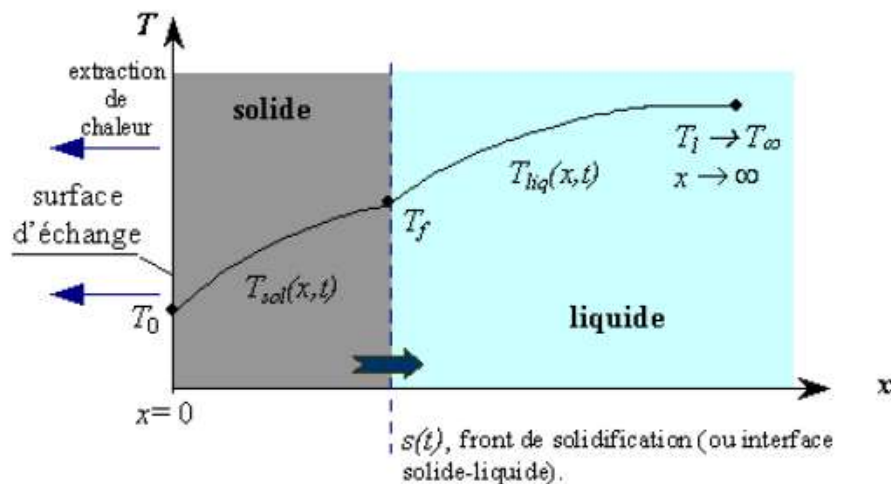


Figure 2.3 : Solidification d'une substance pure dans un milieu semi infini [56]

La figure (2.3) schématise la solidification d'une substance pure (ou quasiment pure). Ici, on suppose que le processus de transfert de chaleur est dominé par la conduction seulement, bien que dans certains cas les transferts convectifs et par rayonnement peuvent jouer un rôle important. Dans cet exemple la chaleur est évacuée lentement par la surface d'échange ($T_0 < T_f$) et T_L , est la température du fluide loin de l'interface liquide-solide ($T_f < T_L$). On constate que la morphologie de l'interface solide-liquide est plane. Cette interface est le front de solidification. Elle se déplace en fonction du temps t au fur et à mesure que la phases solide avance et est repérée par l'abscisse $s(t)$.

2.4.4 Solidification-fusion d'un mélange homogène

Dans le cas d'un mélange le changement de phase peut avoir lieu sur un intervalle de température ou les phases liquide et solide coexistent, la chaleur latente de changement de phase est dégagée (ou absorbée) sur cette plage de température plus au moins large en fonction des proportions du mélange et des propriétés des constituants du mélange. La figure 2.4, représente la solidification d'un produit homogène. Les transferts de chaleur par convection et rayonnement sont supposés négligeables devant le transfert de chaleur par conduction. Dans cet exemple on constate la présence d'une région de mélange entre les fronts $S_1(t)$ et $S_2(t)$, ou les phases solide et liquide coexistent. Les variables T_{sol} et T_{liq} sont respectivement la température de l'interface solide/mélange et la température à l'interface liquide/mélange. Entre $S_1(t)$ et $S_2(t)$ le transfert de matière peut intervenir dans le processus de solidification par la formation d'une zone d'échange, qui peut assumer une forme cellulaire ou dendritique, adaptée aux besoins de la transformation exigés par le transfert de chaleur.

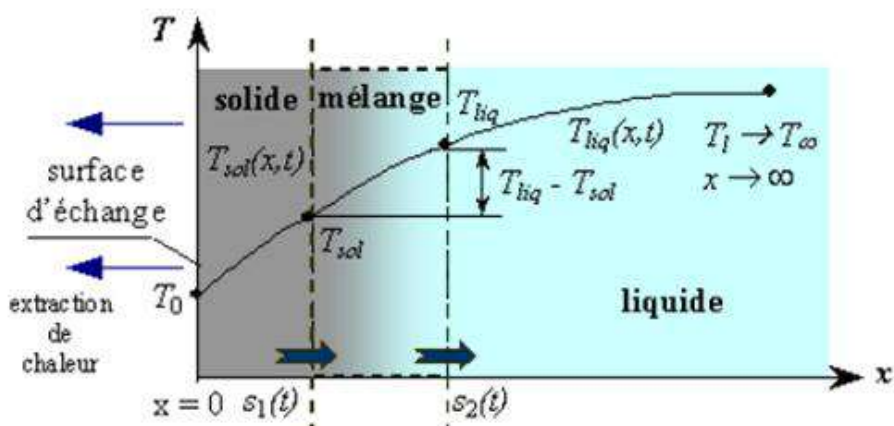


Figure 2.4 : Solidification d'un produit homogène [56]

2.5 Phénomène de changement de phase (coté thermique)

2.5.1 Thermodynamique du changement de phase

Un transfert d'énergie a lieu chaque fois qu'un gradient de température existe à l'intérieur d'un système. Dans le cas du changement d'état solide liquide d'un matériau pur ou d'un eutectique, changement qui s'effectue à une température constante T_m , il y a production ou consommation d'énergie dans la zone de changement d'état, ce qui entraîne la discontinuité des gradients thermiques, qui s'établissent dans chaque phase de part et d'autre de l'interface, même si la conductivité du solide est égale à celle du liquide. Suivant le sens du changement d'état (fusion ou solidification), l'énergie provient d'une

source externe à la température $T_1 > T_m$, (qui peut être un fluide caloporteur, une source électrique ou rayonnante) ou, inversement, la chaleur est extraite à une température $T_0 < T_m$. Comme le transfert de chaleur résulte d'un équilibre thermique, son étude quantitative ne peut être fondée sur la seule thermodynamique. Les températures et les quantités d'énergie fournies ou extraites dépendent des modes de transmission de la chaleur dans le milieu : conduction, convection, ou même rayonnement, si le milieu est semi transparent.

2.5.2 Cinétique du changement de phase

Lorsqu'un matériau subit une transformation solide-liquide, l'énergie est transformée sous forme d'enthalpie massique de fusion à la surface séparant les deux phases, qui constitue l'interface dont on cherche en général à connaître la position en fonction du temps [57]. Bien que le cycle fusion-solidification apparaisse comme réversible, il en va tout autrement du point de vue de la cinétique, à cause, par exemple, du rôle de la convection naturelle dans la phase liquide qui n'est pas le même dans les deux processus.

- **Dans le cas de la fusion** (figure 2.5.a), une gaine fondue se forme entre la surface active et le matériau encore solide ; les transferts s'y produisent par conduction, puis dans de nombreux cas par convection naturelle et, éventuellement, par rayonnement entre la surface et le front solide. La convection naturelle augmente le transfert de chaleur, mais la formulation mathématique en est complexe, car elle nécessite le traitement du couplage entre les équations de Navier-Stokes dans le liquide et de Fourier dans le solide.
- **Dans le cas de la solidification** (figure 2.5.b), l'énergie est extraite à travers une croûte solide qui s'épaissit progressivement à partir de la surface d'échange et dont la résistance thermique varie en x/λ . Le liquide se refroidit progressivement jusqu'à la température de solidification. Ces problèmes sont généralement traités en conduction pure, car le rôle de la convection naturelle y est en général peu important.

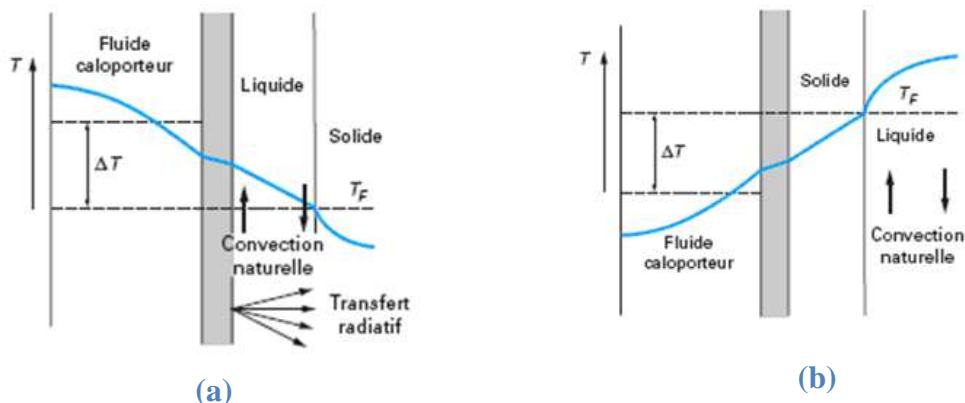


Figure 2.5 : (a) Processus solidification, (b) Processus de fusion [57]

Cette présentation permet de comprendre que ce problème de transferts couplés est fortement non linéaire. De ce fait, les solutions analytiques sont rares et, bien qu'elles permettent de fournir certains ordres de grandeur, souvent peu utilisables dans les configurations réelles. En particulier, l'analyse des cas multidimensionnels, où les conditions limites sont celles rencontrées dans les applications pratiques, n'a été possible que par le développement des méthodes numériques.

2.5.2.1 Problèmes liés au changement de phase (solidification/fusion)

a) La Surfusion : La courbe de refroidissement (solidification) est en réalité légèrement différente. La température du liquide descend en dessous de la température de fusion, puis remonte brusquement pour former le plateau voir figure 2.6 [58]. Ceci s'appelle la surfusion. La surfusion est due à l'énergie d'interface solide-liquide (tension superficielle). De manière simplifiée, on peut considérer que les petits germes de solide sont instables car ils sont dissous par l'agitation thermique, il faut attendre que le liquide soit « plus calme » pour qu'ils puissent se former. De manière plus rigoureuse, vu sous un angle thermodynamique, l'énergie libérée par la solidification (chaleur latente de fusion) ne compense pas l'énergie dépensée pour créer l'interface solide-liquide. Le liquide continue donc à se refroidir sans solidifier.

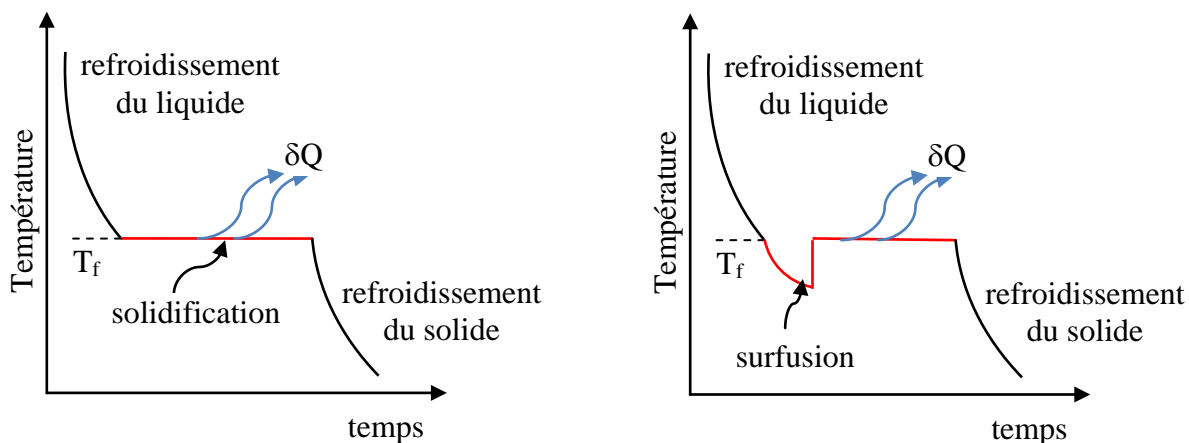


Figure 2.6: Solidification et surfusion [58]

b) La ségrégation : C'est malheureusement un phénomène observé dans la plupart des matériaux à changement de phase. Dans le cas des sels hydratés à fusion non congruente (c'est à dire que la phase liquide est de la même composition que la phase solide), la solidification s'accompagne de la formation de deux phases (liquide et solide). La phase la plus dense, en général le solide, se dépose au fond du récipient: c'est la ségrégation des

phases. Cette dernière rend difficile l'utilisation de ces composés pour un stockage à chaleur latente. Diverses méthodes peuvent être utilisées pour minimiser la ségrégation et stabiliser les composés.

- L'agitation : elle permet de rendre homogène le liquide de départ avant la solidification, elle n'est pas très pratique car c'est une méthode de laboratoire.
- La diminution des dimensions du récipient dans lequel le matériau MCP est encapsulé car ceci confère au matériau une vitesse de refroidissement supérieure à la vitesse de décantation. L'application de cette méthode n'est cependant pas très réaliste dans le bâtiment. L'utilisation d'agents épaississants afin de produire un gel au sein de la solution. Les substances les plus utilisées sont: copeaux de bois, pulpe de papier, des boues minérales etc.

c) **La corrosion** : Le manque de stabilité à long-terme du système MCP-container a longtemps limité l'expansion de l'utilisation des stockages à chaleur latente. Ce phénomène peut être dû à deux facteurs : le manque de stabilité chimique du matériau lui-même, et/ou la corrosion entre le MCP et le conteneur.

2.5.3 Problème de Stefan 1D (transfert purement conductif)

2.5.3.1 Mise en équations

La formulation du problème de Stefan est déduite de la conservation d'énergie exprimée séparément pour les deux phases solide et liquide avec un couplage à l'interface [59]. Les équations à résoudre dans les deux phases sont respectivement pour les phases solide et liquide. La mise en équations du problème de transfert de chaleur par conduction en présence d'un front de fusion ou de solidification s'appuie, dans le cas d'un corps pur :

- **D'une part**, sur l'équation de la chaleur dans les phases solide et liquide :

$$\rho C_{pi}(T) \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{1}{x^m} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_i(T) x^m \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) \quad (2.1)$$

(Pour la simplicité de l'écriture, nous donnons l'équation dans le cas monodimensionnel, avec $m = 0, 1$ ou 2 suivant la géométrie, plane, cylindrique ou sphérique) ;

- **D'autre part**, sur la continuité des flux à l'interface solide-liquide, en posant que la différence entre les flux de part et d'autre de l'interface est égale à la quantité de chaleur instantanée libérée ou absorbée sous forme d'enthalpie de changement d'état par la progression du front :

$$\left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} - \lambda_L \frac{\partial T_L}{\partial v^2} \right)_{x=S(t)} = \rho_s h_{LS} \frac{dS}{dt} \quad (2.2)$$

Avec : S abscisse du front de fusion,

λ : Conductivité thermique,

ρ : Masse volumique,

h_{LS} : Enthalpie massique de fusion,

Les indices L et S étant respectivement relatifs aux phases liquide et solide.

On dispose par ailleurs des conditions aux limites aux surfaces frontières du domaine considéré : ces conditions peuvent être soit des températures imposées, soit des flux spécifiés, ou bien être décrites par un coefficient d'échange de la chaleur à la paroi.

Une rapide analyse des lois d'échelle permet d'introduire le paramètre pertinent des problèmes de changement de phase, le nombre de Stefan. Considérons en effet le cas de la fusion en géométrie plane par exemple, où on impose une température de paroi T_p , la phase initiale étant solide à la température de fusion T_m . Si l'on suppose en ordre de grandeur que le transitoire thermique est négligeable à l'échelle du temps caractéristique du processus de fusion, l'équation (2.2) devient :

$$\lambda_L \frac{(T_p - T_m)}{S} \approx \rho_L h_{LS} \frac{dS}{dt} \quad (2.3)$$

La résolution de cette équation différentielle ordinaire, en faisant apparaître la diffusivité du liquide est:

$$\alpha_L = \frac{\lambda_L}{\rho_L C_{pL}} \quad (2.4)$$

La loi d'évolution de la position de l'interface :

$$S(t) \approx \sqrt{2Ste} \sqrt{\alpha_L t} \quad (2.5)$$

Qui met en évidence la variation de $S(t)$ en fonction de la racine carrée du temps et la pertinence du paramètre :

$$Ste = C_{pL} \frac{\Delta T_r}{h_{LS}} \quad (2.6)$$

Ste : nombre de Stefan défini comme le rapport des enthalpies sensible et de changement d'état mises en jeu.

ΔT_r : Différence de température de référence associée au terme moteur du changement d'état.

C_{pL} : capacité thermique massique du liquide)

Le tableau (2.1) donne quelques valeurs usuelles du nombre de Stefan pour des matériaux courants qui dépend directement de l'écart de température du processus, on a mis en évidence le rapport C_p / h_{LS} .

Tableau 2.1 : Valeurs de nombre de Stefan pour différents MCP [59]

MCP	Température de fusion	Nombre de Stefan
Glace	0	$\approx 0.0125 \Delta T$
n-octadécane	28	$\approx 0.0091 \Delta T$
Hitec (1)	142	$\approx 0.0161 \Delta T$
Etain	232	$\approx 0.0038 \Delta T$
Soude (2)	297 à 321	$\approx 0.0055 \Delta T$
Aluminium	660	$\approx 0.0027 \Delta T$
Chlorure de sodium	801	$\approx 0.0023 \Delta T$

(1) Mélange de $KNO_3 + NaNO_3 + NaNO_2$
 (2) NaOH

D'un point de vue très général, la résolution du problème de transfert de chaleur avec changement de phase ainsi défini appartient à une classe de problèmes dits à frontière mobile, et la solution recherchée consiste à déterminer, au cours du temps, le champ de température dans les deux phases solide et liquide, ainsi que la position de l'interface $S(t)$. La difficulté réside essentiellement dans le fait que la position de l'une des frontières du domaine de calcul, où sont définies les conditions aux limites, est elle-même une inconnue du problème. La solution analytique de ce problème non linéaire n'a été obtenue que dans des cas très particuliers.

2.6. Méthode de résolution

2.6.1. Introduction

Le problème de changement de phase présente beaucoup d'intérêt dans de nombreux secteurs industriels [60]. La caractéristique fondamentale du procédé de fusion et de solidification est la présence d'une frontière mobile entre les phases solide et liquide. Ce problème est fortement non-linéaire. Le déplacement de l'interface solide-liquide dépend du taux de transfert de chaleur au sein des phases solide et liquide. En retour, ce taux est dépendant de la position et du déplacement de l'interface.

La solution analytique de ce problème n'existe que dans quelques cas particuliers. Pour des applications pratiques, on a généralement recours à des méthodes numériques. Les méthodes des différences et des éléments finis sont parmi les plus utilisées.

- Dans les méthodes numériques, deux grandes approches sont généralement retenues: l'approche des réseaux fixes et l'approche des réseaux mobiles.
- Dans l'approche des réseaux fixes, le réseau de mailles demeure immobile. Les équations de conservation sont résolues dans celui-ci sans que le calcul de la solution de l'interface solide-liquide ne soit nécessaire. Cela est possible, par exemple, en résolvant l'équation d'énergie sous forme d'enthalpie.
- Dans la seconde approche, le système de coordonnées physiques est transformé en un système de coordonnées pour lequel les frontières épousent en tout temps la forme de l'interface solide-liquide. Les deux approches sont viables et complémentaires.

2.6.2 Méthodes analytiques

2.6.2.1 Solution exacte

Le premier problème traité est celui de la progression d'un front plan de solidification (problème de Stefan), dont il n'existe pas de solution analytique lorsque le milieu en cours de solidification a une épaisseur finie.

Dans le cas du milieu semi-infini délimité par une surface plane, initialement liquide à une température uniforme, avec des propriétés thermophysiques constantes, Neumann, [61] a proposé une solution dans le cas d'une température de paroi constante inférieure à la température de fusion. La position de l'interface est alors donnée par les expressions :

$$-\lambda_s \frac{(T_2 - T_0)}{2\Delta X} = h_s (T_a - T_1), \quad t > 0, x = 0, \quad T_s(0, t) = T_p \quad (2.7)$$

$$S(t) = C (\alpha_s t)^{1/2} \quad (2.8)$$

Où :

C : facteur de proportionnalité fonction du nombre de Stefan

L'intérêt majeur de cette relation est de fournir une solution de référence pour la validation de solutions approchées ou numériques, mais des méthodes approchées peuvent être parfois utiles pour évaluer les tendances des solutions 1D dans des cas plus complexes.

2.6.2.2 Solutions approchées

On peut citer tout d'abord les méthodes intégrales qui concernent des milieux semi-infinis à une phase (la phase initiale étant supposée isotherme à la température de fusion) avec les mêmes hypothèses que précédemment. L'équation de la chaleur est intégrée sur le domaine mobile en supposant que le champ de température dans la phase en formation suit une loi polynomiale du premier degré, Karman et Polhausen [62], ou de degré supérieur Goodman [63] et dont il faut déterminer les coefficients.

Diverses conditions limites peuvent être abordées (température ou flux de paroi imposés, coefficient d'échange).

- Dans le cas de la paroi à température imposée, la progression du front de fusion s'exprime par :

$$S(t) = \sqrt{\frac{4Ste}{Ste+2}} \sqrt{\alpha_s t} \quad \text{Karman et Polhausen} \quad (2.9)$$

$$S(t) = \sqrt{2\sqrt{1+2Ste-1}\alpha_s t} \quad \text{Goodman} \quad (2.10)$$

La comparaison des solutions obtenues par ces deux méthodes avec la solution exacte de Neumann [64], montre que l'approximation par un profil de température polynomial est d'autant plus justifiée que le nombre de Stefan est faible figure 2.7. Remarquons à ce sujet que des solutions approchées d'intérêt pratique peuvent être obtenues en considérant l'enthalpie sensible mise en jeu comme négligeable par rapport à l'enthalpie de changement d'état ($Ste \gg 0$), ce qui conduit à l'établissement d'un régime stationnaire de température de part et d'autre du front de fusion.

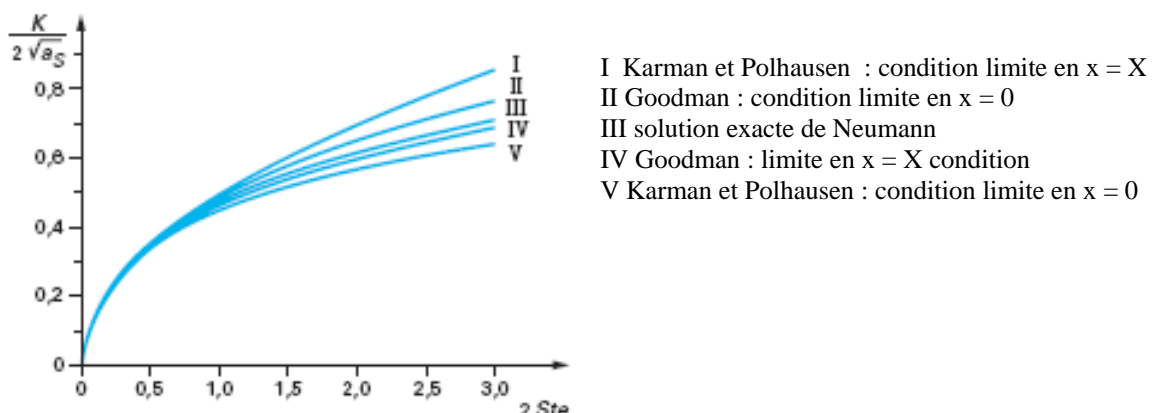


Figure 2.7 : Evolution de l'interface liquide-solide, problème température de paroi imposée

Compte tenu des hypothèses précédentes, on trouve aisément la valeur du temps réduit t nécessaire pour parvenir à une position donnée du front. Par exemple, dans le cas d'un échange convectif sur la paroi.

- Les solutions obtenues par cette méthode sont lourdes et il est souvent plus simple d'approcher le champ de température par un profil de régime stationnaire, dont l'évolution est commandée par les seules conditions limites de température et de flux. En effet, lorsque le nombre de Stefan est petit (enthalpie de changement d'état élevée), le temps caractéristique du processus de changement d'état est très supérieur au transitoire de conduction et cette hypothèse fournit, dans de nombreux cas, une excellente approximation du phénomène.
- La figure 2.8 compare les résultats de trois méthodes (numérique, perturbations et profil stationnaire) dans le cas d'un cylindre à température de paroi constante,
- La difficulté est posée par les calculs de diffusion dans des domaines à frontière mobile. Dans la majorité des cas pratiques, les méthodes analytiques sont cependant insuffisantes, même dans des configurations monodimensionnelles. Le développement des méthodes numériques a permis d'apporter des solutions à des problèmes plus complexes, et nous en abordons la description dans le paragraphe suivant.

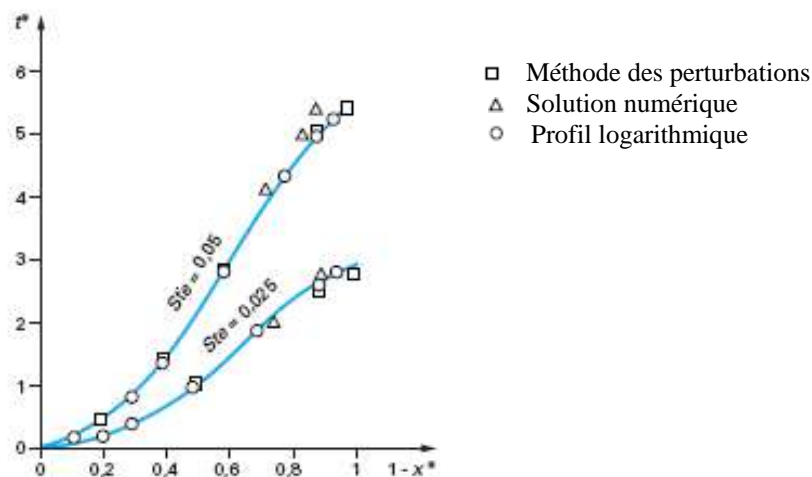


Figure 2.8 : Evolution de l'interface dans un cylindre soumis à une température de la paroi externe constante [64]

2.6.3 Méthodes numériques

Le problème simple du changement de phase solide-liquide consiste en la résolution des équations de transfert de chaleur entre un fluide caloporteur, une paroi en métal et du MCP, tout en tenant compte des variations de propriétés induites par la fusion/solidification du matériau. La difficulté réside ainsi dans la non-linéarité des propriétés physiques et des équilibres énergétiques à l'interface solide-liquide et dans le déplacement de cette interface au cours du temps. C'est pourquoi, peu de méthodes analytiques ont pu résoudre de tels systèmes et cela a laissé place à nombres d'algorithmes numériques basés sur les différences finies, les volumes finis, les éléments finis et plus récemment sur les éléments finis de frontière [65], voir Tableau 2.2.

Depuis une vingtaine d'années, de nombreux travaux ont été publiés sur ce sujet. On peut distinguer deux grandes classes de méthodes de résolution, selon que l'on privilégie la connaissance de la position de l'interface ou celle du champ de température.

Tableau 2.2 : Différents modèles numériques classés en deux catégories : modèles suivant l'interface et modèles avec domaine fixe [65]

Méthodes suivant l'interface	Méthodes à domaine fixe
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Maillage fixe, différences finies ▪ Maillage variable, différences finies Maillage mobile, éléments finis ▪ Eléments mobiles aux frontières 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Méthode avec formulation enthalpique ▪ Capacité calorifique apparente ▪ Capacité calorifique apparente avec correction post itérative

2.6.3.1. Méthodes suivant l'interface

Les méthodes suivant l'interface considérant en première approche considère l'équation de l'énergie séparément pour le domaine avec la phase solide et le domaine avec la phase liquide. Le processus de changement de phase est alors pris en compte à travers les conditions aux limites de l'interface qui se déplace au cours du temps et par conséquent entraîne la modification des domaines occupés par les deux phases. Ces méthodes requièrent parfois l'utilisation de schémas numériques avec maillage mobile afin de connaître la position exacte de l'interface à chaque pas de temps.

a) Différences finies avec maillage fixe : Les différences finies permettent d'approximer les dérivées par des quotients finis appliqués sur les mailles d'un réseau structuré. L'interface mobile se situera en général entre deux nœuds consécutifs. Ainsi, les formules

de différences finies des nœuds voisins peuvent être explicitement modifiées afin de prendre en compte l'effet du changement de phase.

b) Différences finies avec maillage mobile : Dans cette méthode, l'interface est toujours située sur un nœud. Par conséquent, à mesure que l'interface se déplace, le maillage se déforme. Le nombre de nœuds entre la limite du domaine et l'interface est gardé constant. Les deux méthodes avec différences finies sont efficaces pour résoudre des problèmes unidimensionnels grâce à la simplicité inhérente à l'algorithme pour adapter le maillage. Au contraire, leur utilisation pour des problèmes multidimensionnels est considérablement plus complexe.

c) Éléments finis mobiles : Les éléments finis se basent sur une forme plus « faible » des équations bilans. Celle-ci est obtenue en pondérant par une fonction arbitraire les équations différentielles partielles et la condition limite naturelle et en appliquant le théorème de la divergence de Gauss. La forme simplifiée résultante ne présente que des dérivées du premier ordre aussi bien pour les fonctions aléatoires que pour le champ de température permettant un degré de continuité entre des éléments adjacents.

d) Éléments mobiles aux frontières : Si les propriétés thermiques sont considérées comme constantes et homogènes (non dépendantes de la position) dans les deux phases, alors la seule source de non-linéarité est associée à l'interface mobile. Ces méthodes présentent des avantages et des inconvénients présentés ci-dessous :

Avantages

- La position de l'interface est explicitement calculée à chaque pas de temps.
- La discontinuité des gradients de température à travers l'interface peut être mieux prise en compte.
- Ces méthodes sont en général des algorithmes puissants et efficaces puisqu'elles sont orientées et codées pour un problème particulier

Inconvénients :

- Une solution de départ est nécessaire.
- Les zones de transition entre phase liquide et solide ne peuvent pas être incluses.
- L'interface doit être lisse et régulière, les modèles suivant l'interface ne sont ainsi pas adaptés à la modélisation de la convection naturelle.
- Ces méthodes ne permettent pas de traiter des évolutions complexes de l'interface, par exemple, l'apparition ou la disparition d'une phase. Ce dernier point amène à nous

intéresser aux méthodes à domaine fixe pour modéliser des cas plus complexes en tenant compte des spécificités de la géométrie, comme dans le cas du faisceau de tubes.

- Les équations de conservation sont écrites en termes de température dans chaque phase, elles sont résolues séparément dans la région liquide et dans la région solide, la position de l'interface est obtenue par la résolution de l'équation du bilan à l'interface (condition de Stefan).

2.6.3.2. Méthode à domaine fixe

Cette seconde approche propose un seul lot d'équations pour les deux phases. Le processus de changement de phase est alors pris en compte à travers un saut de la quantité de mouvement construit grâce à des différentes combinaisons des termes transitoire, convectif, diffusif et source. Les schémas de discrétisation s'appliquent sur un maillage fixe, ce qui permet de gérer la non-linéarité du problème. Les différentes méthodes sont recensées dans le Tableau 2.2.

Les méthodes à domaine fixe consistent à résoudre une seule équation différentielle partielle dans tout le domaine (solide et liquide) en considérant l'interface comme résultante du calcul. L'équation de l'énergie pour un système avec changement de phase peut être écrite :

$$\rho \left[\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}h) \right] = \nabla \cdot q - S \quad (2.11)$$

Avec:

$\frac{\partial h}{\partial t}$: Terme instationnaire

$\nabla \cdot (\vec{v}h)$: Transport convectif de l'énergie

S: Termes sources

a) Méthodes enthalpiques

La méthode enthalpique est actuellement la plus utilisée pour modéliser le changement de phase [66]. Des logiciels commerciaux comme Fluent ont d'ailleurs codé un module de changement de phase solide/liquide en se basant sur cette méthode. En utilisant le modèle enthalpique, le problème de changement de phase devient plus simple et présente les avantages suivants:

- L'équation qui le gouverne est équivalente à l'équation avec une phase unique
- Il n'y a pas de condition à satisfaire à l'interface
- La formulation enthalpique admet une zone de mélange entre les deux phases et permet de suivre plus précisément le front de fusion/solidification

On peut détailler les équations bilans de la façon suivante :

Conservation de la masse

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2.12)$$

Conservation de la quantité de mouvement

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} v_x) = \nabla (\mu \nabla v_x) - \frac{\partial P}{\partial x} + S_x \right) \quad (2.13)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} v_y) = \nabla (\mu \nabla v_y) - \frac{\partial P}{\partial y} + S_y \right) \quad (2.14)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} v_z) = \nabla (\mu \nabla v_z) - \frac{\partial P}{\partial z} + S_z \right) \quad (2.15)$$

La prise en compte du changement de phase est faite grâce à un modèle de porosité qui considère la zone en transition comme une zone poreuse dont la fraction liquide est comprise entre 0 et 1. La fraction liquide intervient au niveau de la quantité de mouvement grâce au terme source $S^{\vec{}}$ (équation (2.11) qui permet d'annuler la quantité de mouvement lorsque le MCP est solide, c'est-à-dire quand la fraction liquide est égale à 0.

$$\vec{S} = \frac{M (1-f)^2}{f^3 + c} \vec{v} \quad (2.16)$$

Avec $S^{\vec{}}$, terme source qui s'exprime grâce à la fraction liquide $f(T)$ et à un nombre très petit c pour éviter la division par zéro. La constante M est appelée constante de mélange qui détermine la rapidité avec laquelle la vitesse est réduite à zéro lorsque le MCP passe en phase solide. Cette constante est généralement située entre 10^5 et 10^7 [66].

Pour modéliser la convection naturelle, il est nécessaire d'introduire une dépendance de la masse volumique à la température. L'approximation de Boussinesq est utilisée.

$$\rho = \rho_0 (1 - \beta (T - T_0)) \quad (2.17)$$

En tenant compte de la convection naturelle et du modèle de porosité enthalpie, l'équation de la quantité de mouvement s'écrit comme présenté.

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \nabla(\vec{v}\vec{v}) \right) = -\nabla \vec{P} + \nabla(\mu \nabla v) - \rho \vec{g} \beta (T - T_0) + \vec{S} \quad (2.18)$$

L'équation de la conservation de l'énergie peut s'écrire selon les équations:

$$\rho \frac{\partial h(T)}{\partial t} + \nabla h(T) \rho \vec{v} - \nabla(D \nabla h(T)) + S = 0 \quad (2.19)$$

$$\rho \frac{\partial h(T)}{\partial t} + \nabla h(T) \rho \vec{v} = \nabla(\lambda \nabla T) - S \quad (2.20)$$

Les systèmes subissant un changement de phase ont une enthalpie totale égale à la somme de l'énergie sensible $h_{\text{sensible}}(T)$ et de l'énergie latente $h_{\text{latent}}(T)$ comme présenté dans l'équation :

$$h(T) = h_{\text{sensible}}(T) + h_{\text{latent}}(T) \quad (2.21)$$

La chaleur sensible $h_{\text{sensible}}(T)$ correspond à l'énergie stockée sous forme d'élévation de la température du matériau solide ou liquide et peut être exprimée grâce à l'équation :

$$h_{\text{sensible}}(T) = \int_{T_{\text{initial}}}^{T_{\text{fusion}}} C_{p,S} dT + \int_{T_{\text{fusion}}}^{T_{\text{final}}} C_{p,L} dT \quad (2.22)$$

La part d'énergie latente $h_{\text{latent}}(T)$ représente l'énergie accumulée par le matériau durant son changement de phase et peut s'exprimer selon l'équation :

$$h_{\text{latent}}(T) = f(T) \Delta h_{S-L} \quad (2.23)$$

Avec:

$f(T)$: Fraction liquide à la température T

$$f(T) = \begin{cases} 0 & \text{quand le matériau est solide, si } T < T_{\text{solidus}} \\ 1 & \text{quand le matériau est liquide, si } T > T_{\text{liquidus}} \\ 0 < f(T) = \frac{T - T_{\text{solidus}}}{T_{\text{liquidus}} - T_{\text{solidus}}} < 1 & \text{lorsque le matériau change de phase} \\ \text{si } T_{\text{solidus}} < T < T_{\text{liquidus}} & \end{cases} \quad (2.24)$$

Si les équations (2.23) et (2.24) sont recombinaées dans l'équation de conservation d'énergie, en négligeant les termes sources, on obtient alors l'équation-bilan :

$$\rho \left[\frac{\partial h_{\text{sensible}}(T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} h_{\text{sensible}}(T)) + \Delta h_{S-L} \frac{\partial f(T)}{\partial t} \Delta h_{S-L} \nabla(\vec{v} f(T)) \right] = \nabla \cdot q \quad (2.25)$$

La chaleur sensible et la fraction liquide sont alors reliées par l'équation (2.16) et des itérations entre l'équation de conservation d'énergie et l'équation de la fraction liquide

$$f(T) = \frac{T - T_{\text{solidus}}}{T_{\text{liquidus}} - T_{\text{solidus}}} : \text{Permet de déterminer la température.}$$

b) Capacité calorifique apparente

Dans cette méthode, la principale variable est la température et la stratégie est d'inverser l'équation de conservation d'énergie afin de la rendre dépendante de la température. La capacité calorifique est elle-aussi dépendante de la température, quasi-constante lorsque le MCP est solide ou liquide et afin de prendre en compte le changement de phase, une augmentation brusque du C_p est ajoutée au niveau de la température de fusion. La chaleur latente de fusion est donc comprise dans la capacité calorifique apparente du matériau. Le problème de ce genre de méthode est que le pas de temps doit être suffisamment faible afin de limiter l'avancée de l'interface et que celle-ci ne saute pas plusieurs mailles entre deux pas de temps.

c) Capacité calorifique apparente avec correction post-itérative

Une autre possibilité est la combinaison de la méthode de la capacité calorifique apparente avec la méthode enthalpique. Cette solution permet d'utiliser des pas de temps plus élevés puisqu'elle contient une correction post-itérative. Elle présente aussi l'avantage de la simplicité de la formulation avec capacité calorifique apparente [67].

- Toutes ces méthodes aboutissent globalement à des performances identiques et leur mise en œuvre numérique se distingue par le traitement plus ou moins implicite de la non-linéarité. Le principal avantage réside évidemment dans le fait que la position de l'interface n'est pas une inconnue du système d'équations, mais s'obtient a posteriori par la recherche de l'isotherme correspondant à la température de fusion ou par celle d'une fraction liquide donnée.
- Le cas des matériaux purs, la méthode est nécessairement entachée d'erreur si l'on représente l'enthalpie de changement d'état par une variation de la capacité thermique massique sur une plage de température, et cela d'autant plus que l'enthalpie de changement d'état est importante.
- Notons par ailleurs que la formulation présentée ici n'est pas adapté à la solidification d'un alliage : on doit alors recourir à des équations de conservation supplémentaires pour

la conservation des espèces chimiques. La même alternative existe cependant selon que l'on veut suivre la progression de l'interface liquide-solide avec des conditions d'interface plus complexes, ou représenter les transferts dans la zone de croissance (zone dendritique, ou pâteuse) par une formulation enthalpique.

- L'ensemble de ces méthodes analytiques ou numériques permet de traiter un certain nombre de cas monodimensionnels ou multidimensionnels mais, comme nous l'avons précisé, les applications se limitent souvent à des situations très particulières où la conduction est soit dominante, soit absente dans la phase liquide : on peut citer la fusion d'une plaque plane chauffée par le haut (sauf dans le cas de la glace, avec le problème de l'inversion de masse volumique autour de 4°C, ou celui de la solidification d'un liquide initialement isotherme à la température de fusion. Cette dernière configuration a fait l'objet d'une comparaison entre résultats numériques et expérimentaux dans le cas de la solidification autour d'un cylindre horizontal.

Conclusion

Nous avons tenté de faire le point sur les problèmes posés par l'étude des transferts thermiques dans les processus impliquant le changement d'état solide-liquide. Les méthodes analytiques et les nombreuses techniques numériques développées ces dernières années permettent aujourd'hui de rendre compte des phénomènes mis en évidence par l'expérience. Ce domaine constitue cependant un champ de recherche très actif et les travaux en cours s'efforcent de fournir des outils fiables pour l'étude de processus industriels, en évitant le recours systématique à des modèles physiques détaillés nécessitant un investissement important du point de vue numérique.

2.7 Modélisation de la solidification par la méthode des différences finies (1D)

2.7.1 Introduction

La résolution numérique en différences finies pour modéliser le phénomène de la solidification 1D et le transfert de chaleur lors du changement d'état dans un matériau à changement de phase (MCP) contenu dans un cylindre vertical de longueur L . Nous exposons les principales méthodes développées pour résoudre ces problèmes et les principaux résultats acquis. Bien que cette présentation soit essentiellement consacrée aux aspects purement thermiques dans les processus de changement d'état dans les systèmes. Nous nous considérons cependant ici que les phénomènes de changement d'état à l'équilibre, sans prendre en compte les phénomènes de surfusion ou de solidification rapide, ni la physique de la nucléation. On présentera le modèle mathématique du changement de phase solide-liquide, ainsi que sa mise en œuvre sur ordinateur. En premier lieu, on donne une description géométrique du problème physique considéré. Ensuite, un bref survol sur les méthodes numériques et analytiques pour la résolution de problèmes de changement de phase solide-liquide est énuméré. Puis on définit certaines hypothèses qui permettent d'obtenir les équations de conservation qui décrivent l'évolution du problème. On propose aussi une méthode analytique pour faire la comparaison avec la solution numérique. Enfin une discrétisation des équations par la méthode des différences finies est présentée. Finalement, on montre un schéma fonctionnel de l'algorithme de résolution utilisé dans le code de calcul.

2.7.2 Modélisation physique du problème

L'objectif est de modéliser le problème de solidification d'un matériau à changement de phase (MCP) dans un cylindre vertical de diamètre D , et de longueur L représenté par la figure 2.9. On considère la solidification d'une substance pure (ou quasiment pure) schématisée dans la figure ci-dessous. On suppose que le processus de transfert de chaleur est dominé par la conduction seulement, bien que dans certains cas les transferts convectifs et par rayonnement peuvent jouer un rôle important. Dans cette étude la phase liquide est maintenue à une température initiale T_m . L'analyse unidimensionnelle permet au système d'être résolu numériquement de manière maillée en déterminant la température à tout point du maillage à des moments spécifiques.

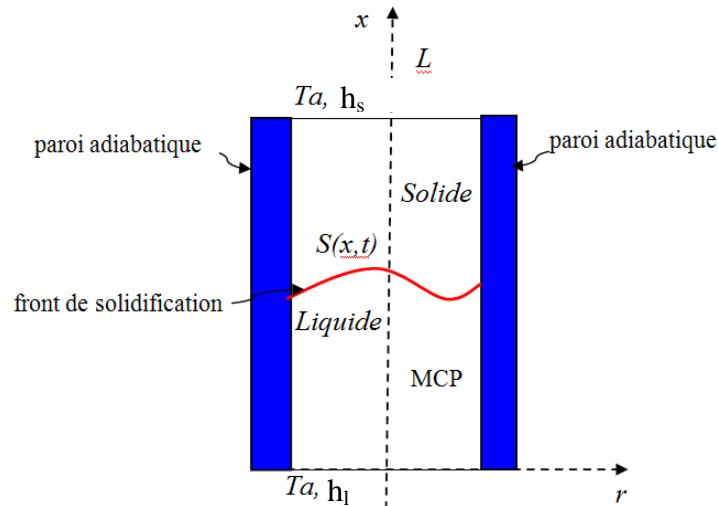


Figure 2.9 : Géométrie du problème

2.7.2.1 Hypotheses

Il est maintenant nécessaire d'effectuer un certain nombre d'hypothèses afin d'établir les équations qui décrivent le phénomène physique. Ces séries d'hypothèses sont d'abord exposées. Un retour sur celles qui demandent des éclaircissements ou une justification particulière est ensuite effectué. Quelques commentaires généraux sur toutes ces hypothèses sont finalement donnés. Les hypothèses prise en compte sont comme suit :

1) Hypothèse générales

- On considère que le phénomène de la solidification se fait dans un cylindre vertical de diamètre d et de longueur L
- La densité de flux axial est donnée par l'équation suivante :
- $$\phi_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.26)$$
- Le cylindre étant constituée d'un matériau à changement de phase (MCP), les variations transversales de la température seront donc négligeables, et on peut considérer qu'une section droite d'abscisse x est isotherme. Le problème est donc devenu unidimensionnel, l'objet de ce problème étant de calculer la répartition de température $T(x)$ le long de le cylindre et suivre le front de solidification par rapport au temps.
- Le problème est unidimensionnel et transitoire.
- Le cylindre est parfaitement isolé.
- La conduction dans les phases solide et liquide du MCP et dans les parois est prise en compte.

- On considère la solidification d'une substance pure (ou quasiment pure). On suppose que le processus de transfert de chaleur est dominé par la conduction thermique seulement, bien que dans certains cas les transferts convectifs et par rayonnement peuvent jouer un rôle important.
- Les propriétés physiques (conductivité thermique et chaleur spécifique) du MCP et des parois sont constantes mais peuvent être différentes d'une phase à l'autre pour le MCP. voir figure 2.10 et elles ne dépendent pas de la température. On considère une surface plane de l'interface solide liquide, et un contact parfait dans cette dernière, la température de la surface est constante T_m .

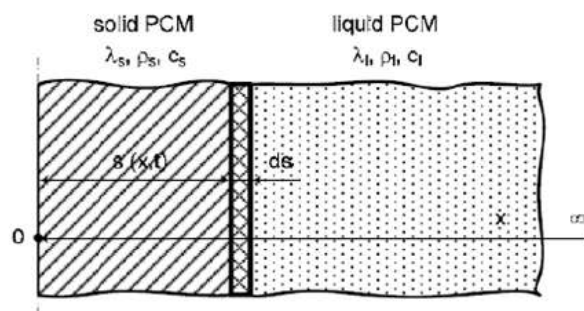


Figure 2.10 : Caractéristiques physiques de MCP [66]

2) Hypothèses liées au changement de phase

- Une méthode poursuivant l'interface est retenue
- Le MCP est parfaitement pur. Il n'y a pas de bulles d'air emprisonnées dans le MCP et le changement de phase est isotherme.
- Le MCP est homogène et isotrope.

3) Notes sur l'hypothèse de la constance des propriétés physiques

Il est justifié d'utiliser des propriétés constantes dans la mesure où la plage de température est relativement faible. Or, les excès de température ne sont justement pas intéressants pour les applications de dissipation de chaleur comme pour les dispositifs de stockage. Cependant, les propriétés varient parfois de façon considérable d'une phase à l'autre. C'est pourquoi le modèle permet l'usage de propriétés différentes pour chaque phase.

4) Notes sur l'hypothèse de l'immobilité de la phase solide

Il est clair ici que les prédictions du modèle seront erronées si cette condition n'est pas vérifiée. Il est raisonnable de supposer que le MCP solide adhère à la paroi même si la partie inférieure de l'enceinte est complètement fondue. La morphologie de l'interface

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

5) Notes sur l'hypothèse concernant l'expansion volumique du MCP

Cette hypothèse est facilement justifiable pour certains MCP, dont la variation de densité lors du changement de phase est négligeable. Toutefois, d'autres matériaux comme les paraffines prennent beaucoup plus d'expansion (5 à 15%). Même si l'expansion en elle-même n'affecte pas de manière considérable le transfert de chaleur ou l'écoulement, la présence d'une surface libre met en jeu des phénomènes dont le modèle ne peut tenir compte, tels le débordement du liquide à la surface du solide et la tension superficielle. Cela vient donc perturber les conditions limites thermiques et dynamiques réelles à cette surface libre. Quant à lui, le modèle impose une condition de glissement parfait et adiabatique sur cette frontière.

2.7.3 Matériaux à changement de phase utilisés

Les matériaux à changement de phase peuvent assurer un meilleur stockage de chaleur sans avoir un écart significatif de température à cause de leurs grandes énergies latentes de fusion. Dans notre étude on a choisi les deux matériaux Paraffine et le Erythrol dont les caractéristiques physiques sont données sur le tableau ci-dessous.

Tableau 2.3 : Caractéristiques physiques des MCP utilisés [68]

Matériaux	ρ_s kg/m ³	ρ_l kg/m ³	T_m °C	L_C kJ/K	C_{pl} kJ.kg/K	C_{ps} kJ.kg/K	λ_s W/m.K	λ_l W/m.K
Paraffine	850	775	350	214.4	2.4	1.8	0.24	0.19
Erythrol	1480	1300	391	340	2.76	1.38	2.64	1.17

2.7.4 Formulation Mathématique, Approche 1D

Cette étape consiste à mettre au point un code numérique 1D, on néglige les effets radiaux et on ne s'intéresse qu'à la direction axiale (OX). Sous les hypothèses considérées, voir figure 2.11, les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et d'énergie s'écrivent respectivement.

1- Dans la région liquide :

$$\frac{\partial T_L}{\partial t} = \alpha_L \frac{\partial^2 T_L}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq S(t), \quad t > 0 \quad (2.27)$$

$$\lambda_L \frac{\partial T_L}{\partial x} = h_L(T_L(x,t) - T_a), \quad x=0, \quad t>0 \quad (2.28)$$

2- Dans la région solide:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \alpha_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2}, \quad S(t) \leq x \leq L, \quad t > 0 \quad (2.29)$$

$$\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} = h(T_s(x,t) - T_a), \quad x=L, \quad t > 0 \quad (2.30)$$

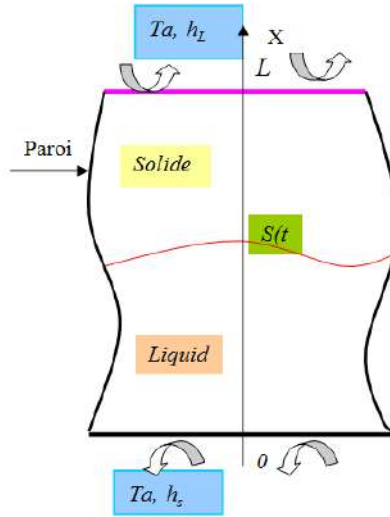


Figure 2.11: Conditions aux limites

3 . Sur l'interface solide-liquide

$$\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} - \lambda_L \frac{\partial T_L}{\partial x} = \rho_L L_c \frac{\partial S(t)}{\partial t}, \quad x = S(t) \quad (2.31)$$

$$T_s(x,t) = T_L(x,t) = T_m, \quad x = S(t) \quad (2.32)$$

Avec : T_L : Température du liquide

T_s : Température du solide

T_a : Température ambiante ou extérieure

α_L : Diffusivité thermique du liquide $\alpha_L = \frac{\lambda_L}{\rho_L C_L}$

α_s : Diffusivité thermique du solide $\alpha_s = \frac{\lambda_s}{\rho_s C_s}$

h_L : Coefficient d'échange côté liquide, $x = 0$

h_s : Coefficient d'échange côté solide, $x = L$

L_c : Chaleur latente du changement de phase liquide-solide

$S(t)$: Interface solide-liquide

2.7.5 Méthode de résolution

Au cours des quinze dernières années, de nombreux travaux de recherches ont été menés afin de développer des méthodes de calcul numérique permettant de traiter les problèmes de changement de phase en absence et en présence de convection naturelle. La résolution du problème de transfert de chaleur avec changement de phase ainsi défini appartient à une classe de problèmes dits à frontière mobile, et la solution recherchée consiste à déterminer, au cours du temps, le champ de température dans les deux phases solide et liquide, ainsi que la position de l'interface $S(t)$. L'ensemble des méthodes peut se ramener à deux méthodes, analytique et numérique. La solution analytique de ce problème non linéaire n'a été obtenue que dans des cas très particuliers.

2.7.5.1 Méthode analytique

Le processus de solidification/fusion contient une interface mobile qui sépare la région solide de la fusion. Cette interface continue progressivement jusqu'à ce qu'il ne reste plus de liquide. La progression de la solidification n'est pas un problème linéaire, mais pour ces problèmes, une solution exacte peut être conçue [68]. La solution exacte à ce problème sera formulée selon la méthode de Neumann. La solution analytique donne des solutions exactes pour les problèmes de changement de phases mais pour des cas bien spécifiés et simples, Son importance apparait dans la résolution de la solidification des MCP pour le problème 1D et des géométries simples (plane cylindrique et sphérique).

Formulation mathématique

Le problème s'agit de la solidification unidimensionnelle d'un produit pur confiné dans un espace de longueur L , figure 2.12 montre bien la géométrie du problème.

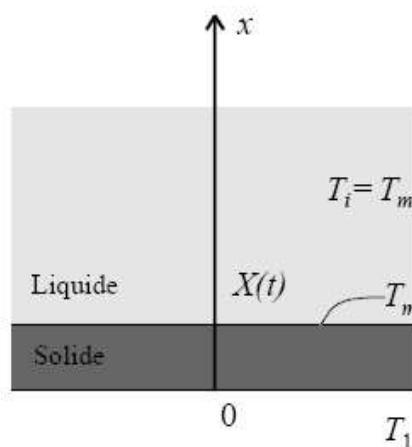


Figure 2.12 : Représentation de front de la solidification $S(t)$ [68]

Pour le temps $t \leq 0$ le produit est dans la phase liquide à une température constante $T(x, t) = T_1 > T_m$. Quand $t > 0$ la température de la surface $x=0$ est instantanément mise à $T(0, t) = T_0 < T_m$ par conséquent, la phase solide va se développer à partir d'une couche adjacente à la frontière $x=0$, au fur et à mesure que le temps augmente la phase solide avance $s(x, t)$ prenant la place du liquide. $T_{sol}(x, t)$ et $T_{liq}(x, t)$ respectivement sont gouvernées par l'équation classique de conduction de chaleur donnée par :

$$\frac{\partial T_{sol}(x, t)}{\partial t} = \frac{\lambda_{sol}}{\rho_{sol} c p_{sol}} \cdot \frac{\partial^2 T_{sol}(x, t)}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq s(t), t > 0 \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial T_{liq}(x, t)}{\partial t} = \frac{\lambda_{liq}}{\rho_{liq} c p_{liq}} \cdot \frac{\partial^2 T_{liq}(x, t)}{\partial x^2}, \quad s(t) \leq x, t > 0 \quad (2.34)$$

$\lambda_{sol}, \lambda_{liq}$ sont les conductivités thermiques pour les phases solide et liquide respectivement. Les variables ρ_{sol} et ρ_{liq} sont les masses volumiques pour les phases ; solide et liquide $x \leq s(t)$, le bilan d'énergie et la continuité de température sont assurés par les équations suivantes :

$$\lambda_{sol} \cdot \frac{\partial T_{sol}}{\partial x} - \lambda_{liq} \cdot \frac{\partial T_{liq}}{\partial x} = \rho_{sol} \cdot L_c \cdot \frac{ds(t)}{dt}, \quad t > 0 \quad (2.35)$$

$$T_{sol}[s(t)] = T_{liq}[s(t)] = T_m, \quad t > 0 \quad (2.36)$$

• Neumann, [69] a proposé une solution analytique pour décrire la distribution transitoire de température dans un produit pur au cours d'un changement de phase liquide-solide dans un système unidimensionnel. la solution analytique du problème décrit par les équations (2.33) et (3.36) est :

$$T_{sol}(x, t) = \frac{T_m - T(0, t)}{\text{erf}(\delta)} \text{erf} \left[\frac{x}{2 \cdot \left(\frac{\lambda_{sol}}{\rho_{sol} c p_{sol}} t \right)^{\frac{1}{2}}} \right] + T(0, t), \quad \text{pour } x < s(t) \quad (2.37)$$

$$T = T_m, \quad x = s(t) \quad (2.38)$$

$$T_{liq}(x,t) = T(x,0) - \frac{T(x,0) - T_m}{\operatorname{erfc} \left[\delta \cdot \left(\frac{\lambda_{sol} \rho_{liq} c_{p_{liq}}}{\lambda_{liq} \rho_{sol} c_{p_{sol}}} \right)^{\frac{1}{2}} \right]} \operatorname{erfc} \left[\frac{x}{2 \cdot \left(\frac{\lambda_{liq}}{\rho_{liq} c_{p_{liq}}} t \right)^{\frac{1}{2}}} \right], \text{ pour } x > s(t) \quad (2.39)$$

Où : erf et erfc sont la fonction erreur et la fonction erreur complémentaire respectivement tels que :

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x) \quad (2.40)$$

δ : constante obtenue à partir de la solution de l'équation suivant :

$$\frac{e^{-\delta^2}}{\operatorname{erf}(\delta)} - \frac{\lambda_{sol}}{\lambda_{liq}} \cdot \frac{\left(\frac{\lambda_{sol}}{\rho_{sol} c_{p_{sol}}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot [T(x,0) - T_m] e^{-\left[\frac{\lambda_{sol} \rho_{liq} c_{p_{liq}}}{\lambda_{liq} \rho_{sol} c_{p_{sol}}} \right] \delta^2}}{\left(\frac{\lambda_{liq}}{\rho_{liq} c_{p_{liq}}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot [T_m - T(0,t)] \operatorname{erfc} \left[\delta \cdot \left(\frac{\lambda_{sol} \rho_{liq} c_{p_{liq}}}{\lambda_{liq} \rho_{sol} c_{p_{sol}}} \right)^{\frac{1}{2}} \right]} = \frac{\delta \sqrt{\pi}}{\operatorname{stef}_{sol}} \quad (2.41)$$

Où : la variable adimensionnelle $\operatorname{stef}_{sol}$ est appelée nombre de Stefan définie par :

$$\operatorname{stef}_{sol} = \frac{c_{p_{sol}} \cdot [T_m - T(0,t)]}{L_c} \quad (2.42)$$

Le déplacement transitoire du front de solidification $s(t)$ est donnée par :

$$s(t) = 2 \cdot \delta \left(\frac{\lambda_{sol}}{\rho_{sol} c_{p_{sol}}} t \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.43)$$

Ce genre de problème se résout facilement en quelques secondes, sans aucune difficulté de convergence, à l'aide du modèle numérique.

2.7.5.2 Méthode numérique

Jusqu'à présent, les solutions analytiques disponibles dans la littérature pour résoudre les problèmes de changement de phase ne répondent qu'aux cas les plus simples (géométrie simple, conditions aux limite constantes, propriétés thermiques constantes dans chaque phase, etc.) quand ces solutions deviennent inutilisables, due à la complexité des problèmes réels, les solutions numériques viennent les remplacer [69].

Il y a deux grandes catégories de solutions numériques pour résoudre le problème de changement de phase:

- Les solutions où la position exacte du front de solidification doit être connue à chaque pas de temps.
- Les solutions où on n'a pas besoin de connaître la position exacte de transition de phase.

Pour ce travail on a choisi de travailler avec la méthode où le front de solidification doit être connu pour chaque pas de temps. Car la deuxième méthode présente certaines difficultés lors de la modélisation créée par la présence des problèmes de convergence.

1) Discrétisation des équations

Une méthode numérique à maillage fixe est utilisée pour résoudre ce problème de solidification. Le maillage est divisé en N nœuds avec un pas d'espace ΔX . Les nœuds sont situés en x_i où $i = 1, 2, 3, \dots, N + 1$. Le maillage utilisé est schématisé sur la figure 2.13. La discrétisation des équations à partir d'un maillage spatial et temporel de pas ΔT .

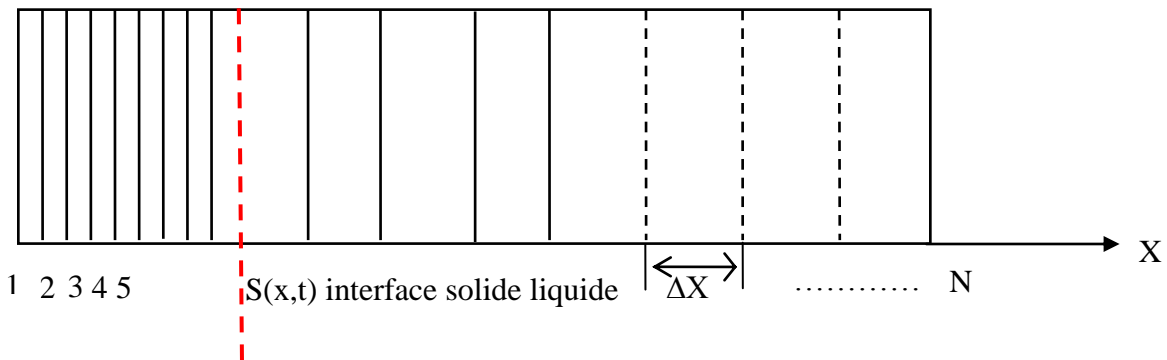


Figure 2.13 : Discrétisation du maillage

Pour la résolution des équations différentielles partielles (2.44), (2.45) et (2.46) régissant le transfert de chaleur à l'intérieur du cylindre, nous avons utilisé la méthode des différences finies. Les équations aux différences finies sont résolues en utilisant le schéma numérique de Crank-Nicolson.

- **Dans la région liquide :**

$$\frac{\partial T_L}{\partial t} = \alpha_L \frac{\partial^2 T_L}{\partial x^2} \quad 0 \leq x \leq S(t), \quad t > 0 \quad (2.44)$$

- **Dans la région solide :**

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \alpha_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} \quad S(t) \leq x \leq L, \quad t > 0 \quad (2.45)$$

- **Sur l'interface solide liquide en mouvement :**

$$\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} - \lambda_L \frac{\partial T_L}{\partial x} = 0 \quad (2.46)$$

$$T_s(x, t) = T_L(x, t) = T_m \quad (2.47)$$

La discrétisation des équations d'après la méthode de différence finies schéma de Grank-Nicolson les équations (2.44), (3.45) s'écrivent comme suit :

$$(2.45) \Leftrightarrow -\sigma_s T_{i+1}^{n+1} + (2\sigma_s + 1)T_i^{n+1} - \sigma_s T_{i-1}^{n+1} = \sigma_s T_{i+1}^n + (1 - 2\sigma_s)T_i^n + \sigma_s T_{i-1}^n \quad (2.48)$$

Avec :

$$\sigma_s = \alpha_s \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$$

$$(2.44) \Leftrightarrow -\sigma_l T_{i+1}^{n+1} + (2\sigma_l + 1)T_i^{n+1} - \sigma_l T_{i-1}^{n+1} = \sigma_l T_{i+1}^n + (2\sigma_l + 1)T_i^n + \sigma_l T_{i-1}^n \quad (2.49)$$

Avec :

$$\sigma_L = \alpha_L \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$$

Position des conditions aux limites

a) Condition au limite : $x=0$, (région solide), $i = 1$

On suppose un point imaginaire $I=0$ dont la température est $T^* = T_0$, on suppose une interface primaire située au nœud 1, on impose un flux d'échange de chaleur constant (flux d'échange de chaleur entrant au nœud égale au flux sortant), voir figure 2.14. La condition à la limite sera donnée par l'expression suivante :

$$-\lambda_s \frac{(T_2 - T_0)}{2\Delta X} = h_s (T_a - T_1) \quad (2.50)$$

Où: h_s : coefficient d'échange de chaleur par convection coté solide

- La discrétisation par différences finis donne l'équation suivante :

Alors:

$$T_0 = T_2 + F_s (T_a - T_1); \text{ et } F_s = h_s 2\Delta x / \lambda_s$$

(2.51)

On remplace T_0 dans l'équation (2.48) on aura:

$$(1 + 2\sigma_s + \sigma_s F_s) T_1^{n+1} - 2\sigma_s T_2^{n+1} = (1 - 2\sigma_s - \sigma_s F_s) T_1^n + (2\sigma_s)T_2^n - 2\sigma_s F_s T_a \quad (2.52)$$

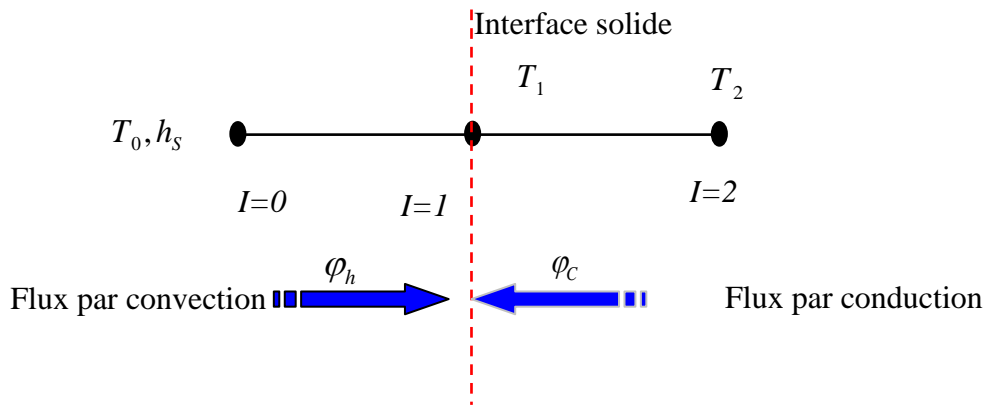


Figure 2.14 : Condition à la limite à x=0

b) Condition à la limite: X=L (région liquide), i = N

On suppose un point imaginaire $T^*=T_{N+1}$, on impose un flux d'échange de chaleur constant (flux d'échange de chaleur entrant au nœud égal au flux sortant), voir figure 2.15. La condition aux limites sera donnée par l'expression suivante :

$$-\lambda_L \frac{\partial T_L}{\partial x} = h_L(T_n - T_a) \tag{2.54}$$

Où :

h_L Coefficient d'échange de chaleur par convection coté liquide

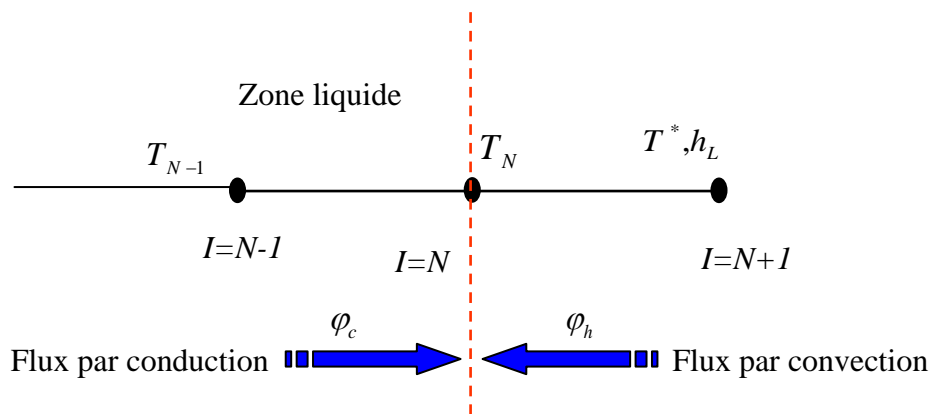


Figure 2.15 : Condition à la limite à x=L

• La discrétisation par différences finies donne l'équation suivante :

$$-\lambda_L \frac{(T^* - T_n - 1)}{2\Delta X} = h_L(T_n - T_a) \tag{2.55}$$

Alors :

$$T^* = -F_L (T_n - T_a) + T_{n-1} \text{ et } F_L = 2h_L \Delta x / \lambda_L \quad (2.56)$$

On remplace T^* dans l'équation (2.49) on aura :

$$(1 + 2\sigma_L + \sigma_L F_L) T_n^{n+1} - 2\sigma_L T_{n-1}^{n+1} = (1 - 2\sigma_L - \sigma_L F_L) T_n^n + (2\sigma_L) T_{n-1}^n + 2\sigma_L F_L T_a \quad (2.57)$$

Après la discrétisation on obtient un système d'équation sous forme :

$$A(i, j) T[J]^{N+1} = B(i, j) T[J]^N + D[J] \quad (2.58)$$

Où :

A et B : matrices tridiagonales données par les expressions ci-dessous :

$$A = \begin{bmatrix} (1 + 2\sigma_s + \sigma_s F_s) & -2\sigma_s & 0 & \dots & \cdot \\ -\sigma_s & (1 + 2\sigma_s) & -\sigma_s & 0 & 0 \\ 0 & -\sigma_L & (1 + 2\sigma_L) & -\sigma_L & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & -\sigma_L \\ 0 & 0 & \dots & -2\sigma_L & (1 + 2\sigma_L + \sigma_L F_L) \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} (1 - 2\sigma_s + \sigma_s F_s) & 2\sigma_s & 0 & \dots & \cdot \\ \sigma_s & (1 - 2\sigma_s) & \sigma_s & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_L & (1 - 2\sigma_L) & \sigma_L & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & -\sigma_L \\ 0 & 0 & \dots & 2\sigma_L & (1 - 2\sigma_L + \sigma_L F_L) \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{pmatrix} -2\sigma_s F_s T_a \\ 0 \\ \cdot \\ 0 \\ 2\sigma_L F_L T_a \end{pmatrix}$$

2.7.6 Procédure de résolution

Initialement le matériau est à l'état liquide et à une température supérieure à la température de fusion. Durant la solidification, la température descend progressivement, puis se stabilise durant le changement de phase à la température T_L dans lequel le matériau est partiellement solidifié. Le métal continue à se refroidir et passe de la température T_L à la température T_S , où il sera complètement solidifié. La température d'un point de la maille

peut être facilement comparée au point à la température fusion du matériau pour déterminer la phase dans laquelle elle se trouve. Le taux de solidification du matériau est déterminé en localisant la position de l'interface solide/liquide en fonction du temps. Ce taux dépend des propriétés du matériau et des conditions initiales. Lorsque les températures de deux points adjacents du maillage sont connues, la position de la frontière mobile peut être calculée.

La résolution du système obtenu se fait à l'aide de schéma de Crank-Nickolson en utilisant la méthode de Thomas qui va être détaillée dans ce qui suit. On prend comme condition au limite initiale une température $T(i) > T_m$ à $t=0$, ainsi on suppose une interface initiale au point $x=x(1)$.

A chaque pas de temps Δt on fait un test de différence de température ($T(i) - T_m < dT$) pour chaque température $T(i)$ calculée, où dT représente l'écart de température entre la phase liquide et solide. Si cette dernière est vérifiée dans un nœud K on introduit la condition d'interface, on change la ligne K et $K+1$ des matrices A et B . On fait la même opération pour chaque pas de temps jusqu'à la convergence où la position du front de solidification atteint le point $x(N)$.

2.7.6.2 Algorithme et stratégie de résolution

La section précédente expose comment les systèmes d'équations discrétisées sont formés à partir des équations originales. Cette section traite de la stratégie utilisée au cours du processus itératif de résolution. L'organigramme présenté par la figure 2.16 donne une idée globale de l'algorithme.

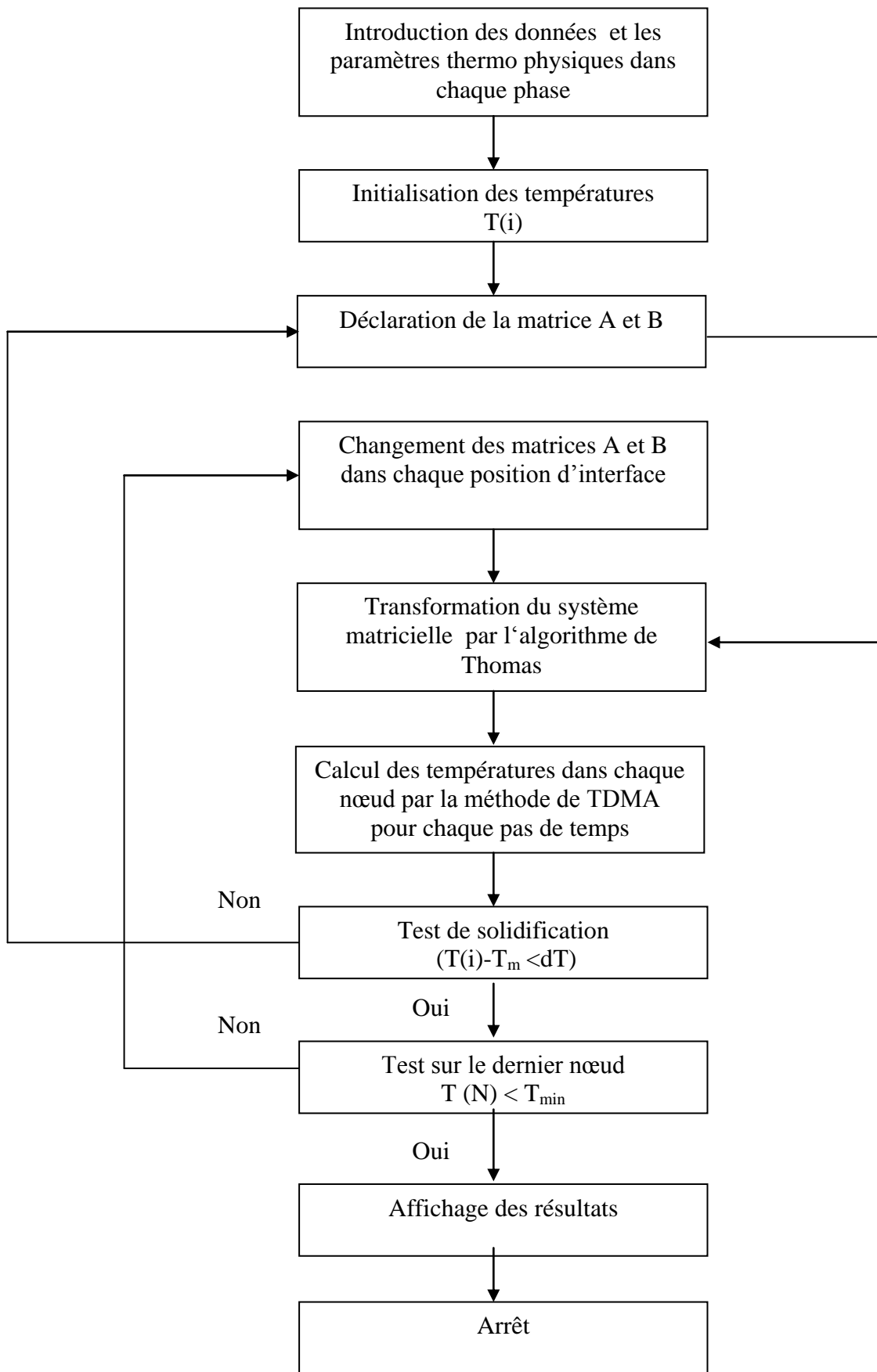


Figure 2.6 : Schéma fonctionnel de l'algorithme de résolution**2.8. Résultats et interprétation:**

Dans le but de voir l'influence de type de MCP (organique et inorganique), on appliqué les méthodes de calcul utilisées pour deux matériaux à changement de phase (Paraffine et Erythrol) Les résultats obtenus par la méthode numérique sont issus à partir d'un code numérique développé, écrit en langage (Fortran 90) version 04. Par contre ceux de la méthode analytique sont obtenus par la méthode de Neumann.

2.8.1 Front de solidification en fonction de temps

A l'instant $t=0$, le système est entièrement liquide et sa température est supérieure à la température de changement de phase T_m du matériau utilisé. On lui posant à la frontière un flux à cette dernière. Le matériau va se refroidir et se solidifié. On observe donc une frontière entre les phases solide et liquide qui se déplace en fonction du temps.

Les Figures 2.17 et 2.18, représentent l'évolution temporelle du front de solidification de la le paraffine, et l'Erythrol par la méthode numérique et analytique de Neumann. L'accord est excellent. La solidification se fait complètement après 1394 min pour la paraffine, par contre pour Erythrol, elle se fait pendant 193minutes, ce qui donne un temps 7 fois plus petit que le premier matériau.

En conclusion, alors que le paraffine présente une chaleur latente élevée confirmée par un temps de solidification plus long que l'érythritol. On peut conclure que le temps de solidification varie en fonction des paramètres thermo-physiques, ce qui nous donne une information sur les applications de ce problème de changement de phase dans le domaine de stockage de l'énergie.

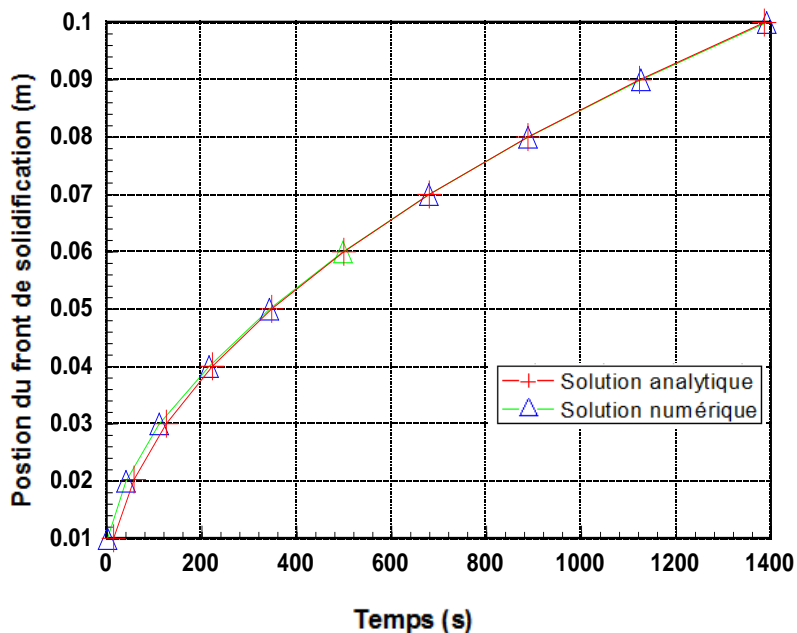


Figure 2.7: Evolution du front de solidification de paraffine

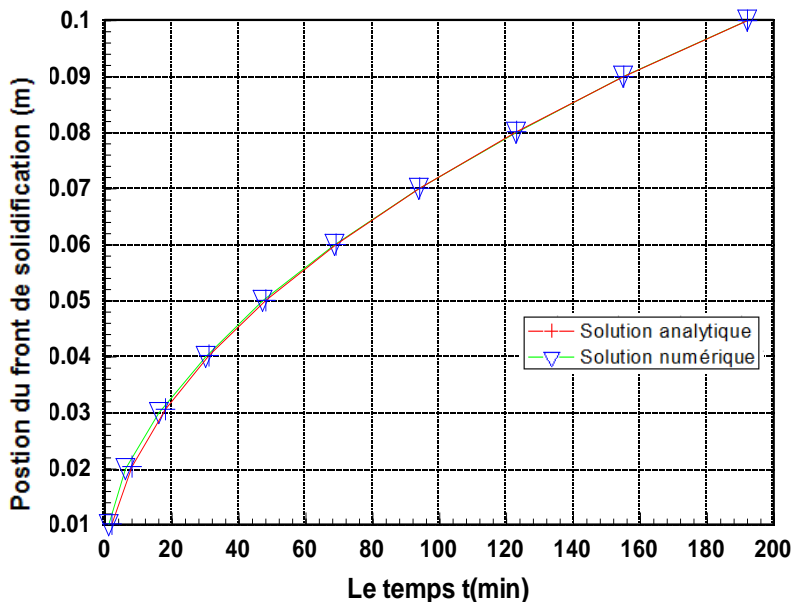


Figure 2.18: Evolution du front de solidification d'Erythrol

2.8.2 Evolution de température dans le maillage

Les Figures 2.19 et 2.20 montrent l'évolution de la température en fonction du temps. On constate que le refroidissement de l'Erythrol se fait d'une façon plus rapide que la Paraffine. Ce qui montre l'effet de la conductivité thermique et la chaleur latente, qui sont des valeurs significatives dans le cas de l'Erythrol.

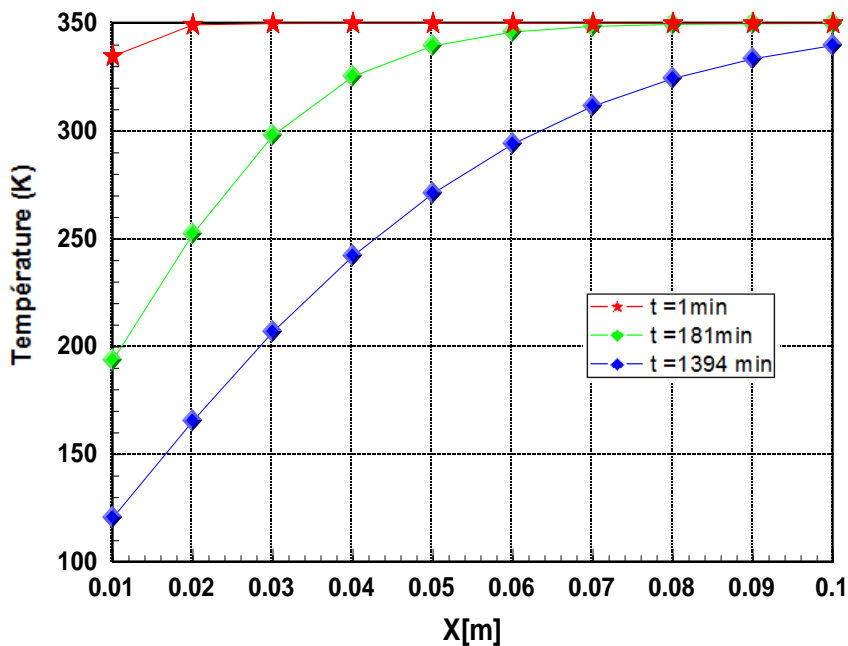


Figure 2.19 : Variation de la température de paraffine

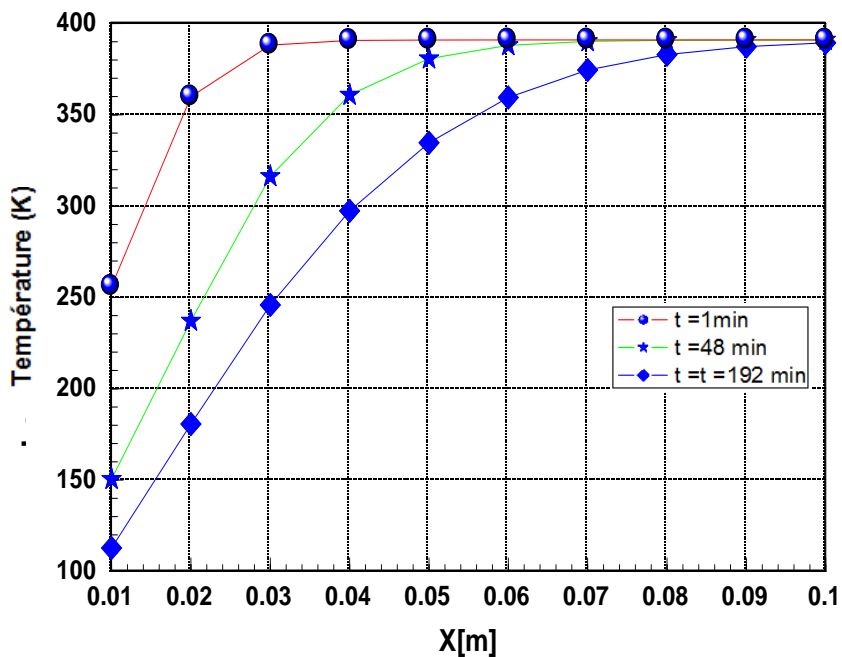


Figure 2.20: Variation de la température d'Erythrol

2.8.3 Evolution des températures dans le cylindre en fonction de temps

Les figures 2.21 et 2.22 représentent l'évolution des températures aux points: $x_1=0.01m$, $x_2=0.05m$ et $x_3=0.1m$, en fonction du temps. On remarque que le front de solidification d'Erythrol se déplace lentement que dans le cas de la Paraffine.

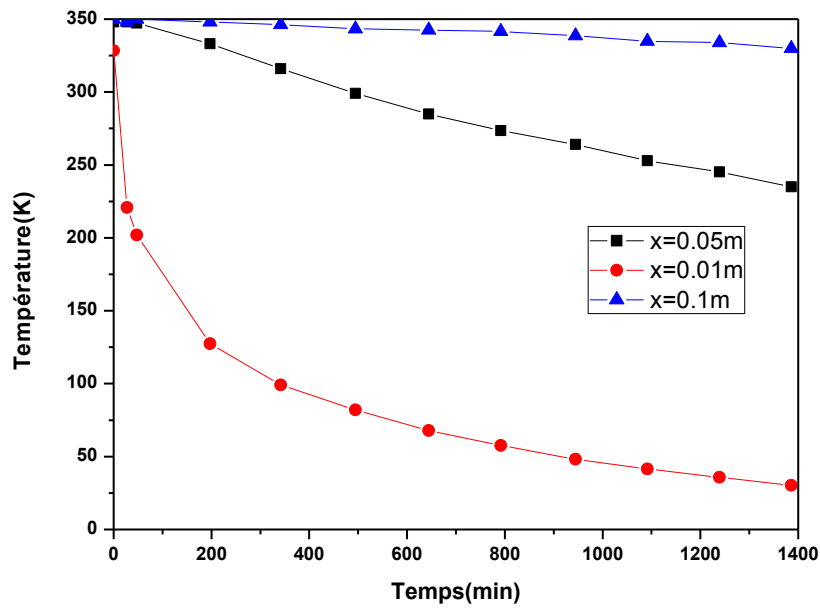


Figure 2.21 : Variation de la température en fonction du temps de la Paraffine

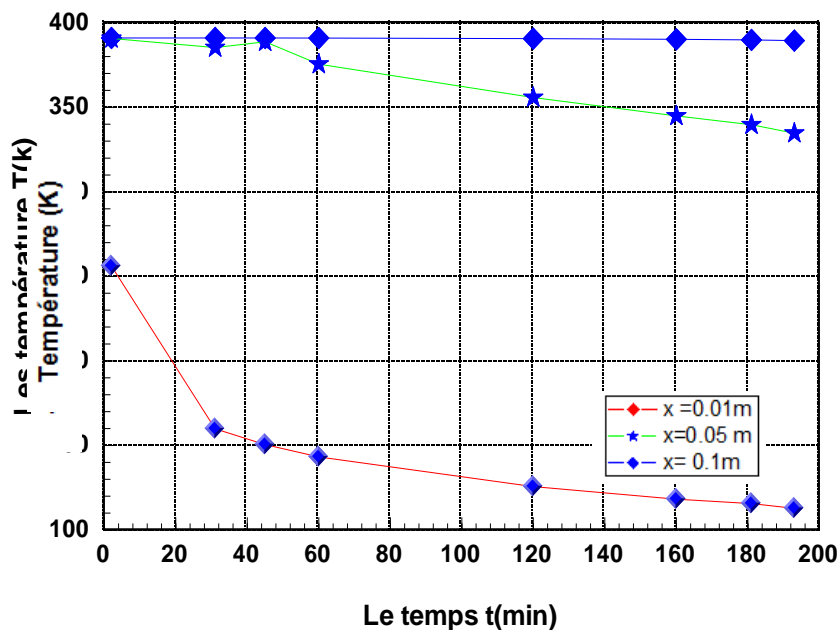


Figure 2.22: Variation de température en fonction du temps de l'Erythrol

Conclusion

Les méthodes numérique et analytique ont été utilisées pour simuler le problème de changement de phase solide-liquide. Ces dernières nous ont permis de traiter le phénomène de transfert de chaleur lors du changement de phase liquide-solide, en calculant une prédisant en tout instant :

- Le champ de température
- La position exacte de l'interface solide-liquide

La précision et la flexibilité de la méthode numérique présentée est vérifiée et comparée avec les résultats de la solution analytique de Newman.

On a présenté la variation de la température en fonction du temps et de l'espace ainsi que celle de l'évolution du front de solidification, les résultats obtenus par ces deux méthodes s'harmonisent plus étroitement durant le temps.

On note que dans cette étude, on a utilisé des paramètres thermophysiques constants sur toutes les plages de température, ce qui n'est pas le cas en réalité. La densité est supposée constante pendant le changement de phase, elle joue un rôle pendant le processus de solidification.

Le modèle numérique présenté possède une application limitée, mais on peut l'étendre à une géométrie bidimensionnelle ou tridimensionnelle et qu'il peut-être appliquer pour le stockage de froid par chaleur latente.

Le temps de solidification complète de MCP est sensiblement le même, qui est fonction des caractéristiques thermo-physiques du MCP tel que la conductivité thermique et la chaleur latente de fusion.

Chapitre 3

*Simulation numérique du stockage de
l'énergie thermique par chaleur latente*

3.1. Introduction

Le stockage thermique est d'une grande importance dans beaucoup de domaines puisqu'il offre de nombreux bénéfices pour la gestion des procédés industriels. Un des problèmes les plus importants dans l'industrie solaire est le décalage temporel qui existe entre la ressource solaire disponible et la demande en énergie. Pour contrôler les dépenses et la régulation de la consommation énergétiques, il devient donc indispensable de stocker l'énergie thermique. Pour le faire, différents types d'unités de stockage existent et connaissent des applications grandissantes dans de nombreux domaines, en particulier celui du solaire thermique. Le choix d'une unité de stockage de l'énergie thermique doit être retenu pour l'application souhaitée [68]. Les systèmes (Shell and-tube heat storage unit) est la technologie la plus prometteuse comme solution de ces problèmes, l'efficacité thermique moyenne de charge et de décharge est importante. Cependant, le souci principal était la détermination et la maîtrise des différents paramètres (physiques et géométriques) pour aboutir à un modèle bien optimisé notamment en ce qui concerne l'amélioration du rendement thermique. Par conséquent, il devient nécessaire de développer des systèmes efficaces pour collecter la chaleur pendant les périodes de fortes irradiances afin de la restituer plus tard durant les périodes de non-enseulement ou durant la nuit.

3.2. Problématique

L'utilisation de la transition solide-liquide présente l'avantage de réduire le volume de stockage mais l'expansion volumique associée, la possible ségrégation des phases ou encore la surfusion peut compliquer la mise en œuvre des MCP dans les réservoirs de stockage. Leur faible conductivité thermique limite également les performances des systèmes de stockage, ce qui peut conduire à une extraction non optimale de l'énergie stockée [79]. Pour pallier ces désagréments, plusieurs techniques d'améliorations du transfert thermique dans les systèmes de stockage latents ont été proposées et sont classées en deux catégories :

- Action sur le MCP pour améliorer sa conductivité thermique ou encore le coefficient d'échange global dans le réservoir : fabrication de mousse de métal ou MCP composite et association de MCP en cascade.
- Action sur l'échangeur de chaleur en augmentant la surface d'échange ainsi que le flux total transféré : échangeur avec trois tubes concentrique, échangeur de chaleur à tube ailetés [80].

Dans ce travail, nous avons choisi d'agir sur l'augmentation de la surface de transfert en admettant la géométrie concentrique et à trois tubes concentriques. Une description générale des modèles mathématique et géométrique des systèmes de stockage de l'énergie thermique a été effectuée, en utilisant le code fluent pour simuler les phénomènes ayant lieu dans ces systèmes.

3.2.1. Simulation d'une unité de stockage thermique (LHS) double concentrique tubes

Les systèmes de stockage à double tube concentrique contenant du PCM ont fait l'objet de nombreuses recherches approfondies au cours des trois dernières décennies. Les efforts de recherche comprennent des approches analytiques numériques et expérimentales. Bien que les systèmes de stockage de chaleur latente à double tube concentrique sont connus pour leurs performances de stockage plus élevées par rapport à d'autres configurations de systèmes de stockage [81].

Dans ce travail on va s'intéresser à l'étude numérique du problème de stockage de l'énergie par chaleur latente dans une l'unité de stockage (LHS) à double tube concentrique tube avec (MCP) dans le tube annulaire en utilisant le logiciel CFD, ANSYS FLUENT. La configuration du modèle physique est montrée sur la figure 3.1. L'élément de stockage d'énergie est constitué de deux tubes concentriques (Shell-and-tube heat storage unit), l'espace annulaire est rempli d'un matériau de changement de phase (PCM). Celui-ci est chauffé par un fluide caloporteur (HTF) dans le tube central figure 3.2.

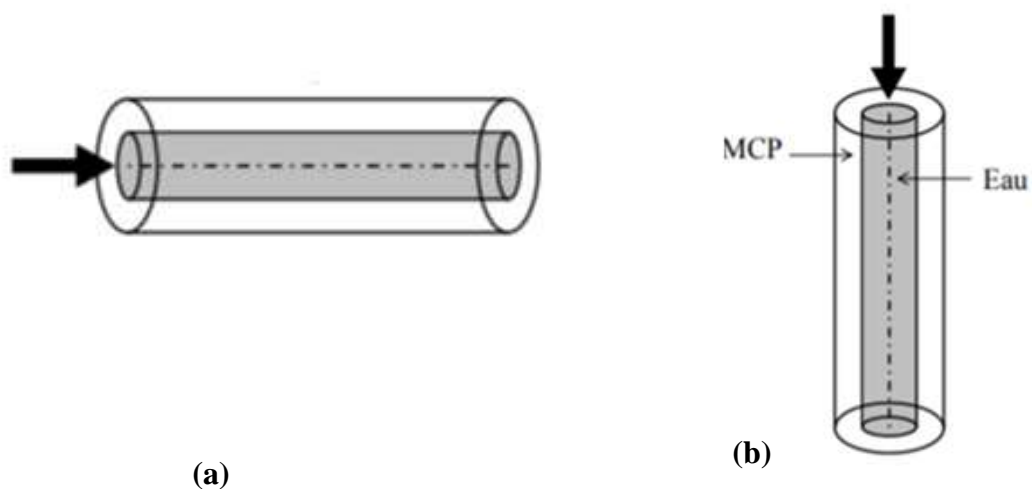


Figure 3.1: Position horizontale et position verticale du double tube concentrique [81]

L'objectif principal de ce travail est de poursuivre est observer le comportement de la fusion et de la solidification (stockage et déstockage de l'énergie thermique) du MCP en présentant un modèle CFD tridimensionnel. Une comparaison quantitative a été développée, qui vise une étude numérique des performances d'une unité de stockage thermique par chaleur latente LHS (Latent Heat Storage). Les paramètres suivant sont étudiés : l'effet du débit, la température d'entrée du fluide caloporteur HTF (Heat Transfer Fluide), la gravité et la quantité de MCP sur le temps du processus de fusion/solidification, le taux de stockage thermique et la fraction de fusion du PCM pour différentes températures 70°C, 75°C et 85°C et pour les débits de 0.012kg/s 0.024kg/s, et 0.08kg/s, ainsi pour différentes orientations (horizontale/verticale).

3.3. Modèle physique

La configuration du modèle physique de l'unité LHS est montré sur la Figure 3.2, l'élément de stockage d'énergie est constitué de deux tubes concentriques (Shell-and-tube heat Storage unit) l'un en cuivre et l'autre en aluminium, l'espace annulaire est rempli en paraffine en tant que MCP, voir le tableau 3.1. Celui-ci est chauffé par un fluide caloporteur (eau), voir les Tableaux 3.1 3.2, 3.3, 3.4, et 3.5.

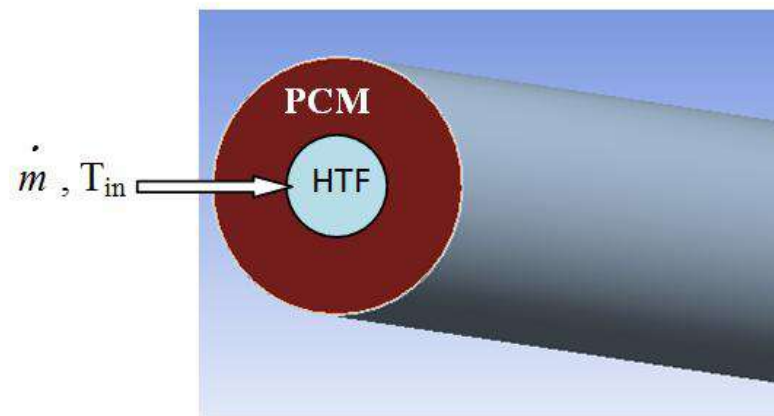


Figure 3.2: Unité de stockage

Tableau 3.1: Caractéristiques géométriques

Caractéristiques géométriques	Valeurs
Longueur du tube intérieur	$L_1=1000$ mm
Diamètre du tube intérieur	$D_{int}= 38$ mm
Diamètre du tube extérieur	$D_{ext}=102$ mm
Longueur du tube extérieur	$L_2= 1000$ mm

Tableau 3.2 : Propriétés de l'eau

Propriétés	Valeurs
Masse volumique ρ (kg/m ³)	998.2
Chaleur spécifique C_p (J/kg.K)	4182
Conductivité thermique λ (W/m.K)	0.6
Viscosité dynamique μ (kg/m.s)	0.001003

Tableau.3 3 : Propriétés du cuivre (tube intérieur)

Paramètre	T (300K)
Conductivité (W/m.K)	387.6
Chaleur spécifique (J/kg.K)	381
Densité (kg/m ³)	8978

Tableau 3.4: Propriétés de l'aluminium (tube extérieur)

Paramètres	T (300K)
Chaleur spécifique (J/kg.K)	871
Conductivité (W/m.K)	202.4
Masse volumique (kg/m ³)	2719

Tableau 3.5 : Caractéristiques physiques des MCP utilisés [81]

Paramètres	Valeur
Chaleur latente L_f (J/Kg.K)	240000
Conductivité (W/mK)	
• Liquide λ_l	0.267
• Solide λ_s	0.380
Chaleur spécifique (J/kg.K)	
• liquide : C_{p_l}	2240
• Solide : C_{p_s}	1900
Masse volumique du liquide (kg/m ³) à $T=T_f$	
30°C	776.8
40°C	775.58
50°C	768.53
Masse volumique du solide (kg/m ³)	814
Coefficient d'expansion β	12%
Temperature de fusion	$T_m=331K$
viscosité cinématique ν (m ² /s)	
T=35°C	$5.005 \cdot 10^{-6}$
T=40°C	$4.486 \cdot 10^{-6}$
T=45°C	$4.013 \cdot 10^{-6}$
T=50°C	$3.626 \cdot 10^{-6}$

3.3.1. Hypothèses générales

La formulation de ce problème est basée sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices des hypothèses liées à la géométrie, au type d'écoulement, aux mécanismes de transferts et aux problèmes de changement de phase. Nous avons considéré les hypothèses suivantes :

- Les propriétés physiques sont supposées constantes dans les deux phases, sauf la masse volumique dans les forces de volumes (approximation d'Oberbeck-Boussinesq).
- Le liquide est supposé newtonien et incompressible.
- L'écoulement est laminaire et sans dissipation.
- Le transfert de chaleur par rayonnement est supposé négligeable.
- Les variations du volume dues au changement de phase sont négligeables.
- Le matériau à changement de phase est supposé parfaitement pur (pas de bulles d'air).
- Le matériau à changement de phase est homogène et isotrope.

3.3.2. Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont imposées, voir Figure 3.3.

- Parois extérieures adiabatiques
- Pendant le processus de fusion, le PCM est considéré comme un solide immobile qui est maintenu à une température ambiante constante.
- Pendant le processus de solidification, on suppose que le PCM est initialement à une température supérieure à sa température de fusion ($T=70^{\circ}\text{C}$) et que la température de l'eau de refroidissement est de 34°C .

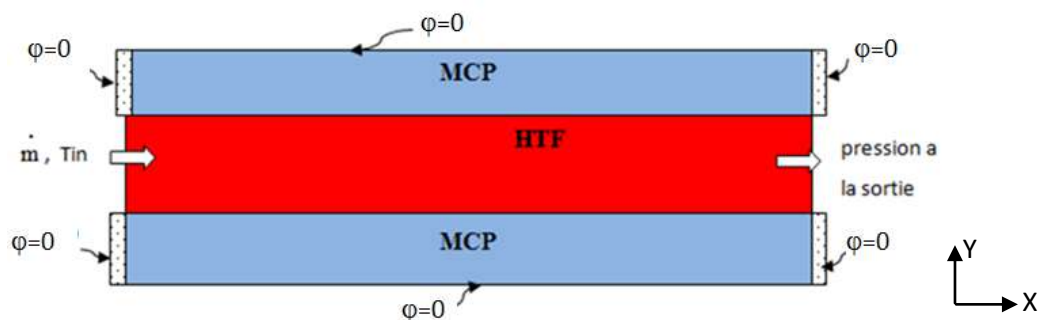


Figure 3.3: Conditions aux limites

3. 4. Modèle mathématique

Les équations qui régissent l'écoulement d'un fluide tridimensionnel [82], newtonien, incompressible en écoulement laminaire sont:

- **Equation de conservation de masse :**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

Pour un fluide incompressible, la masse volumique demeure constante ($\partial \rho / \partial t = 0$)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.2)$$

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

- **Conservation de la quantité de mouvement**

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + \nabla(\vec{v}v_x) \right) = \nabla(\mu \nabla v_x) - \frac{\partial P}{\partial x} + S_x \quad (3.4)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + \nabla(\vec{v}v_y) \right) = \nabla(\mu \nabla v_y) - \frac{\partial P}{\partial y} + S_y \quad (3.5)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + \nabla(\vec{v}v_z) \right) = \nabla(\mu \nabla v_z) - \frac{\partial P}{\partial z} + S_z \quad (3.6)$$

Pour modéliser la convection naturelle, il est nécessaire d'introduire une dépendance de la masse volumique à la température. L'approximation de Boussinesq est utilisée.

$$\rho = \rho_0 (1 - \beta(T - T_0)) \quad (3.7)$$

En tenant compte de la convection naturelle et du modèle de porosité enthalpie, l'équation de la quantité de mouvement s'écrit comme présenté.

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \nabla(\vec{v}\vec{v}) \right) = -\nabla \bar{P} + \nabla(\mu \nabla v) - \rho \vec{g} \beta (T - T_0) + \vec{S} \quad (3.8)$$

$\rho g \beta (T - T_{ref})$: représente le terme de l'approximation de Boussinesq.

Pour des configurations d'écoulement dans une cavité (domaine du PCM), la résultante des forces externes est limitée aux forces gravitationnelles de sorte que l'influence de la convection naturelle provoquée par des gradients de température soit évidente. Quand les

forces de flottabilité se produisent dans l'écoulement, la conception des propriétés physiques fixes n'associe plus le comportement de l'écoulement du fluide.

L'effet de la convection naturelle est pris en considération dans l'équation de quantité de mouvement par la variation de la masse volumique. La masse volumique du fluide varie avec la température, cette variation de la masse volumique est la cause du mouvement du fluide. Si la variation est faible, on peut traiter la masse volumique comme constante dans les termes transitoire et convectif et la traiter comme uniformément variable dans le terme source [83].

S_x , S_y et S_z : représentent les termes sources dans les directions x et y , respectivement, utilisées pour modifier les équations de la quantité de mouvement dans l'interface solide liquide. Le modèle de Darcy pour les milieux poreux est utilisé pour modifier les vitesses dans les régions solide et pâteuse :

$$S_x = Au \quad , \quad S_y = Av \quad \text{et} \quad S_z = Aw \quad (3.9)$$

$$\text{Avec : } A = C \frac{(1-f_1)}{f_1^3 + 0.000001} \quad (3.10)$$

C : constante du Darcy

f_1 : fraction massique donner par l'expression :

$$f_1 = \begin{cases} 1 & \text{si } T > T_1 \\ \frac{T - T_s}{T_1 - T_s} & \text{si } T_s < T < T_1 \\ 0 & \text{si } T < T_s \end{cases} \quad (3.11)$$

- **L'équation de la conservation de l'énergie:**

$$\rho \frac{\partial h(T)}{\partial t} + \nabla h(T) \rho \vec{v} - \nabla (D \nabla h(T)) + S = 0 \quad (3.12)$$

$$\rho \frac{\partial h(T)}{\partial t} + \nabla h(T) \rho \vec{v} = \nabla (\lambda \nabla T) - S \quad (3.13)$$

3.5. Principales étapes pour définir le problème en CFD








3.5.1. Présentation du logiciel ANSYS

ANSYS Workbench est un outil de gestion de projet. Il peut être considéré comme l'interface de haut niveau reliant tous nos outils logiciels. Le Workbench permet de gérer les fichiers et le lancement des différents logiciels à partir d'une fenêtre unique. Il gère le transfert de données entre Ansys Geometry / Mesh / Outils de solveur / post-traitement, voir Figure 3.4.

3.5.2. Créer un système d'analyse fluide Flow 3D

Pour créer un système d'analyse, c'est-à-dire une chaîne de calcul pour une simulation fluide dans un domaine géométrique, les étapes suivantes sont nécessaires voir tableau 3.6 et figure 3.5.

Table 3.6 : Etapes nécessaires pour une simulation dans ANSYS (Workbench)

2	 Geometry	✓	CAO – création de la géométrie	ANSYS DesignModeler
3	 Mesh	✓	Maillage	ANSYS Meshing
4	 Setup	✓	Mise en données et simulation	ANSYS Fluent
5	 Solution		Résultats CFD	
6	 Results		Post-traitement	CFDPost

- **Géométrie/CAO** consiste à dessiner la géométrie du problème

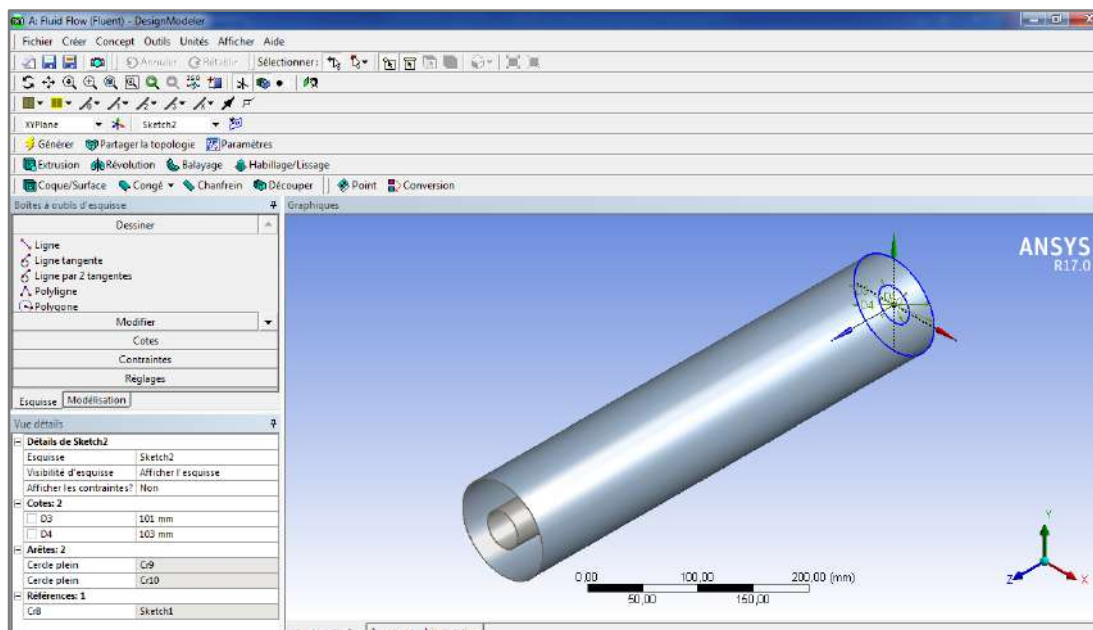


Figure 3.4: Interface DesignModeler (workbench)

- Maillage discrétisé le domaine, c'est-à-dire le découpé en mailles de calcul.
- Mise en données et choisir les modèles physiques et les hypothèses adaptées au problème.
- Résolution numérique, les équations aux dérivées partielles sont résolues par le solveur CFD après avoir discrétisées et mise sous forme algébrique. Cette résolution se fait par un algorithme itératif jusqu'à la convergence.
- Post-traitement pour visualiser et analyser les résultats.
- **Choix du maillage :** Pour une meilleure précision et une meilleure stabilité, nous avons adopté un maillage quadrilatéral structuré à multi blocs, formé de lignes continues à travers le domaine qui suivent au mieux le contour des surfaces définissant la géométrie. Après des tests de précision, un maillage de 84000 cellules a été adopté, voir Figure 3.5.

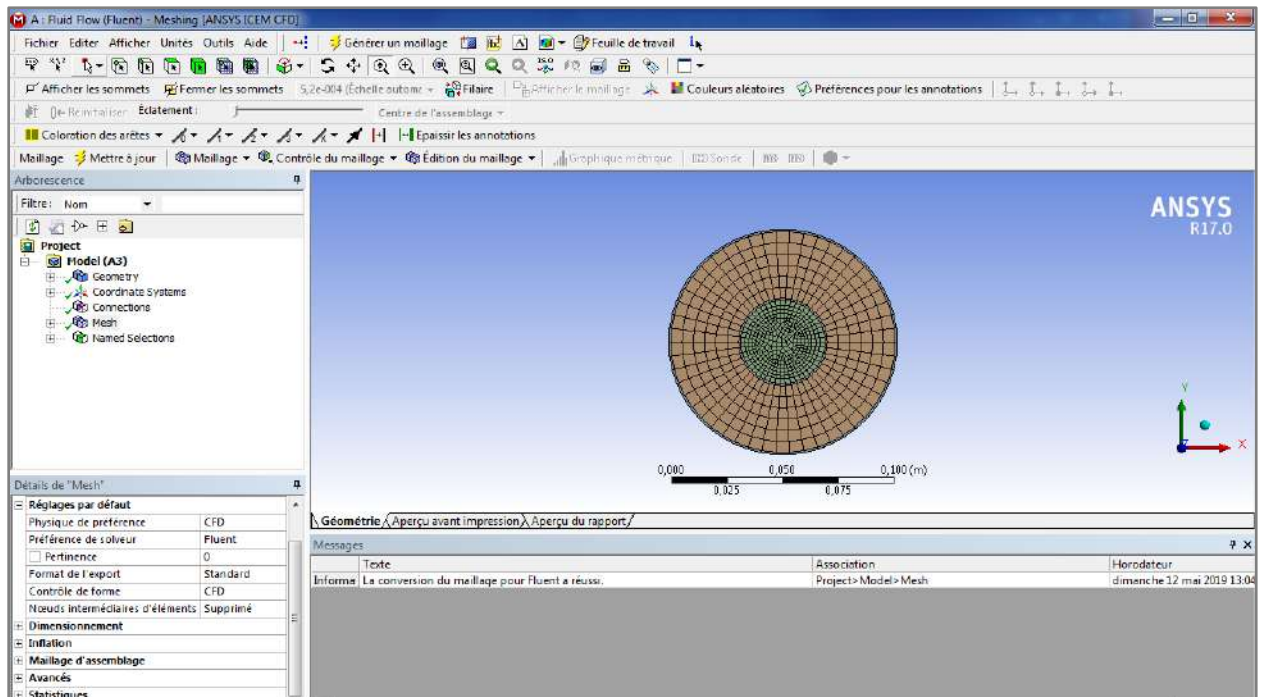


Figure 3.5: Interface ANSYS Meshing

- **Mise en données :** Choisir les modèles physiques et les hypothèses adaptés au problème. Pour effectuer la simulation par ce logiciel, il faut décrire les paramètres de solution comme Tableau 3.7 et Figure 3.6.

Table 3.7 : Mise en données en Fluent

<p>Choix de solveur</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Space 3D ▪ Time Unsteady ▪ 1-st-Order Implicit ▪ Viscuous Laminar ▪ Heat Transfert Enabled. ▪ Solidification and Mulpting Enabled
<p>Choix de matériau</p>	<p>Le choix des matériaux utilisés dans notre modèle à partir des listes existantes ; sinon il faut les introduire selon nos besoins</p>
<p>Solver control</p>	<p>Les équations :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mouvement ▪ Energie <p>Les paramètres de calcul (pour le régime instationnaire :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Pas de temps : 0.6 ▪ Max .Itérations par pas de temps :10 <p>Facteurs de sous- relaxation :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Pression : 0.3 ▪ Densité : 0.9 ▪ Forces : 0.9 ▪ Mouvement : 0.7 ▪ Up date de fraction liquide : 0.9 ▪ Energie : 1 <p>Couplage pression-vitesse :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ SIMPLE <p>Schéma de discrétisation :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Pression (PRESTO) ▪ Mouvement (secondorder-Upwind) ▪ Energie (Second order- Up)

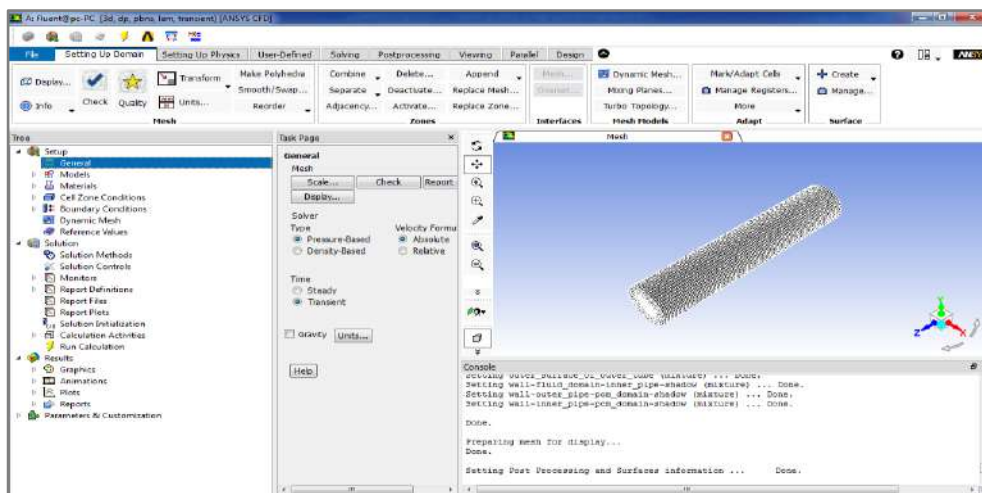


Figure 3.6: Interface ANSYS Fluent

- **Résolution numérique** : Les équations aux dérivées partielles sont résolues par le solveur CFD après avoir discrétisée et mise sous forme algébrique. Cette résolution se fait par un algorithme itératif jusqu'à la convergence, voir Figure 3.7.

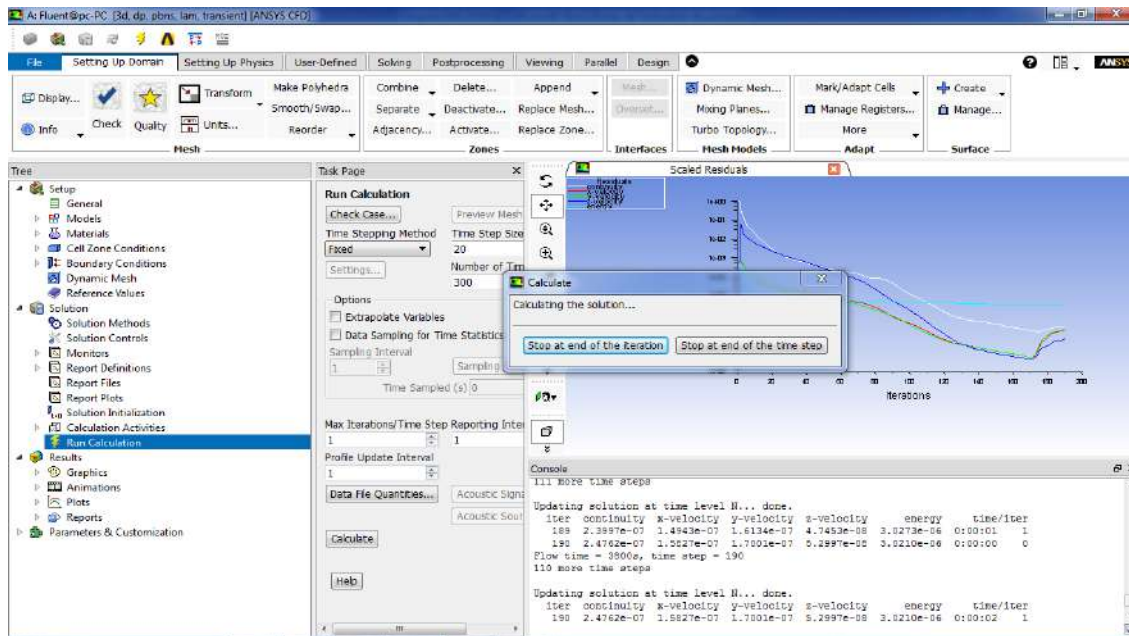


Figure 3.7: Interface Fluent exécution

- **Post-traitement** : Visualiser et analyser les résultats, voir Figure 3.8.

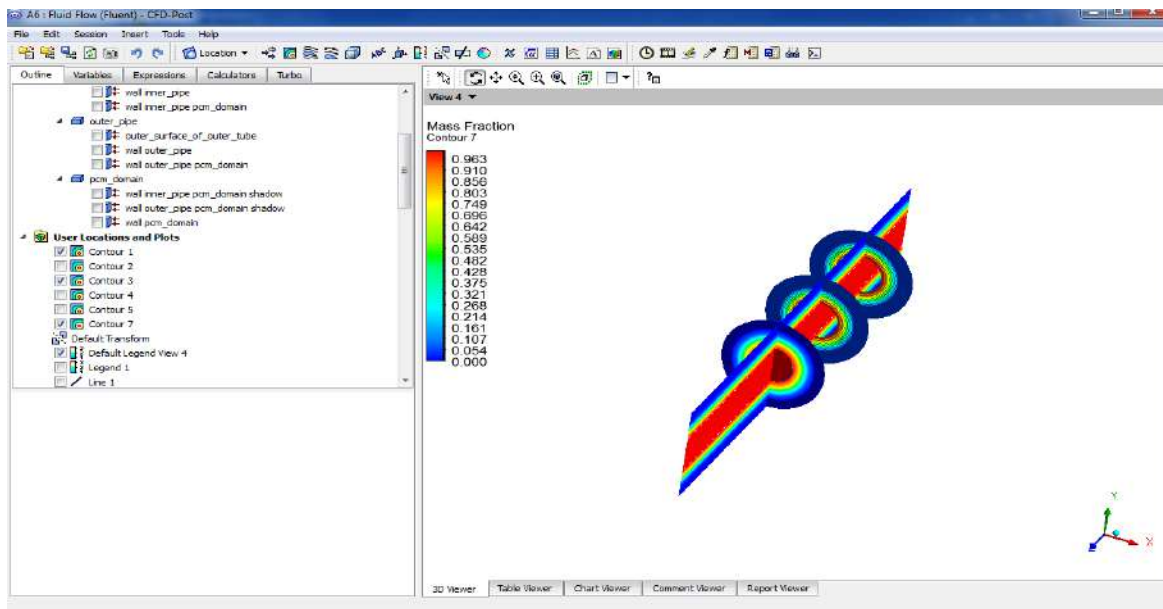


Figure 3.8: Interface CFDPost

3.6. Effet des paramètres physiques et géométriques sur les performances de stockage

3.6.1. Cas de tube horizontal

3.6.1.1. Effets de la température d'entrée du fluide caloporteur HTF

Le débit massique est fixé à ($\dot{m}=0.024\text{kg/s}$) et la température d'entrée du fluide caloporteur varie ($T_{inl}=85^\circ\text{C}$, 75°C et 70°C) afin de suivre l'évolution de l'interface solide-liquide, on a fixé trois positions axiales et radiales voir figure 3.9.

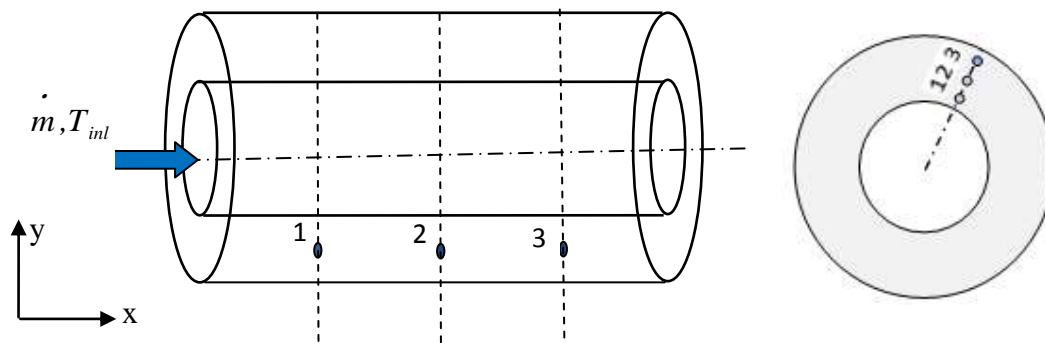


Figure 3.9: Positions axiales et radiales de suivi du front fusion /solidification

L'effet de la température d'entrée du fluide caloporteur HTF sur le temps de fusion/solidification du PCM est montré sur les Figures 3.10 et 3.11. Avec l'augmentation de la température d'entrée du fluide HTF, la différence de température entre le HTF et MCP permet d'avoir un taux de fusion du MCP relativement important. Donc le temps de fusion diminue avec l'augmentation de la température d'entrée du HTF. Quand la température d'entrée augmente de 70°C à 85°C , le temps de fusion diminue de 600 min à 362 min, ce qui réduit le temps de fusion à 39.6%. De la figure 3.12, on peut remarquer que le processus de fusion peut être divisé en trois étapes:

- La première étape est l'étape de stockage par chaleur sensible, où la température de PCM est inférieure à la température de fusion et la fraction de fusion est nulle;
- La seconde étape est l'étape de stockage par chaleur latente, où la température de PCM atteint la température de fusion (58°C), et la fraction de fusion augmente de zéro à un;
- La troisième étape est l'étape de stockage par chaleur sensible, où le PCM est complètement fusionné, et la température est plus grande que la température de fusion.

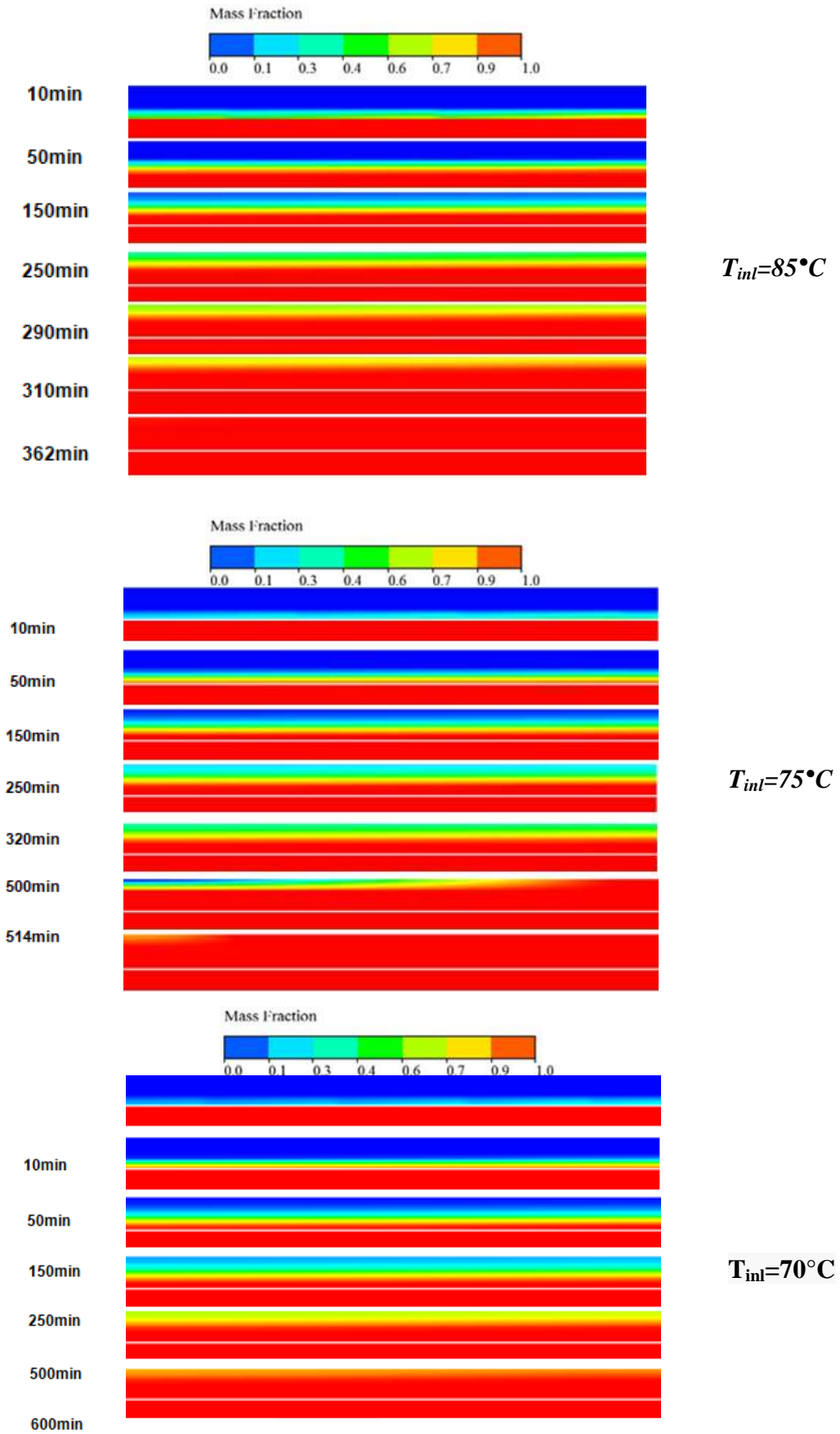


Figure 3.10: Contours axiaux de la fraction massique de MCP durant le processus de charge pour : $T_{int}=80^{\circ}\text{C}$, $T_{int}=75^{\circ}\text{C}$ et $T_{int}=70^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=0.024$ kg/s

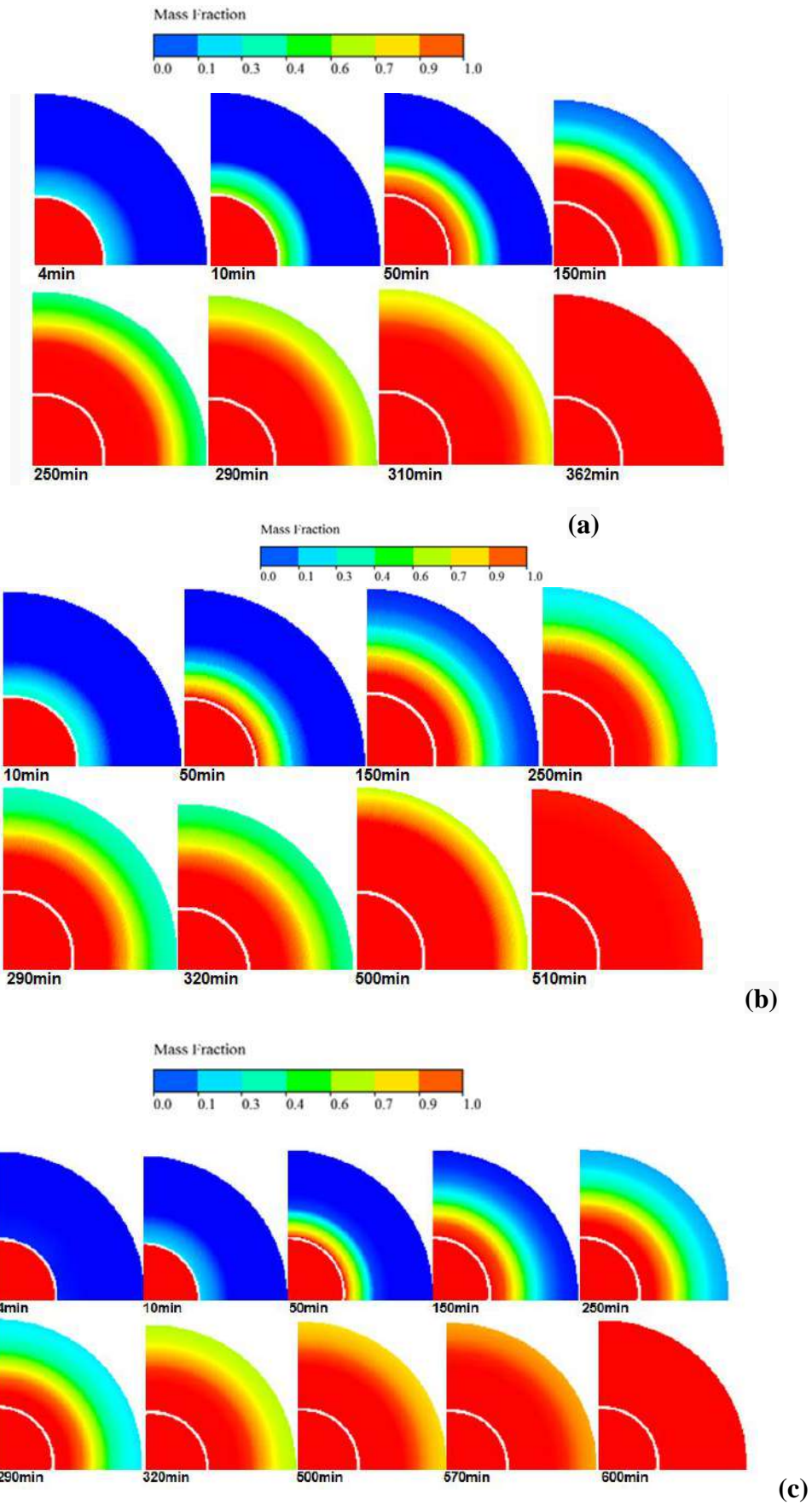
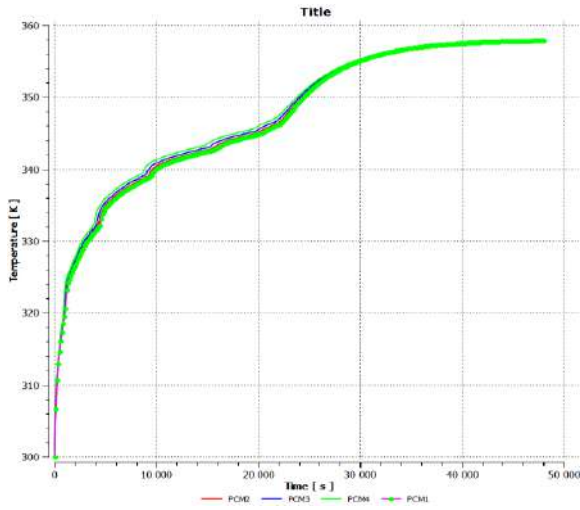
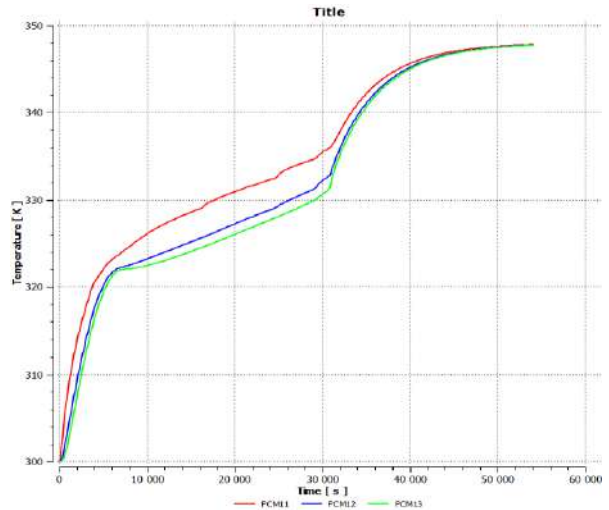


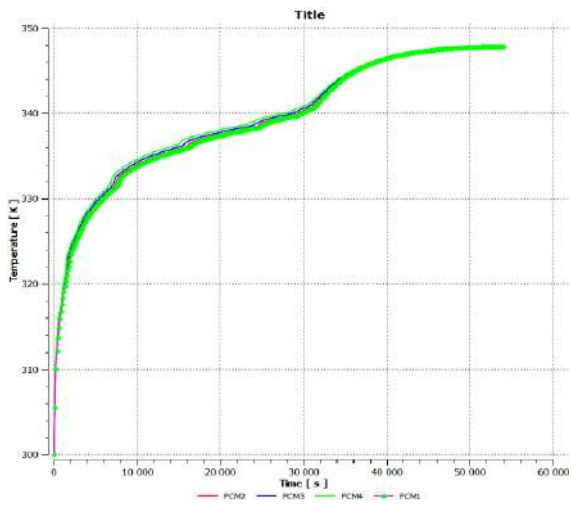
Figure 3.11: Contours radiaux de la fraction massique de MCP durant le processus de charge pour : (a) $T_{ini}=80^{\circ}\text{C}$, (b) $T_{ini}=75^{\circ}\text{C}$ et (c) $T_{ini}=70^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=0.024\text{kg/s}$



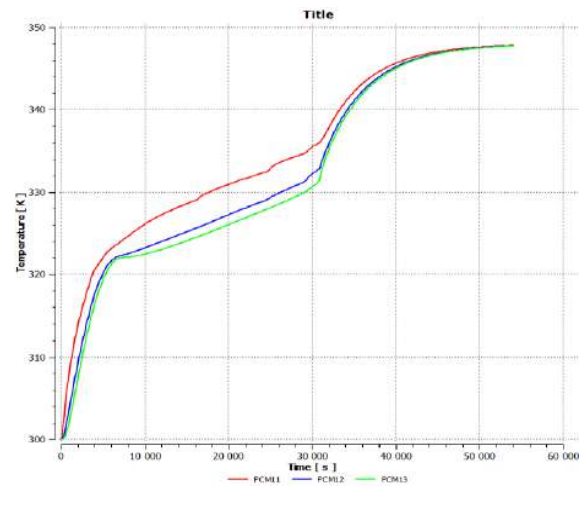
(a)



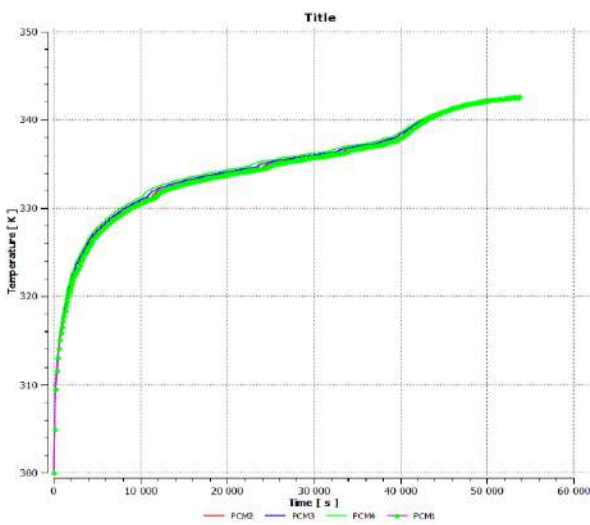
(b)



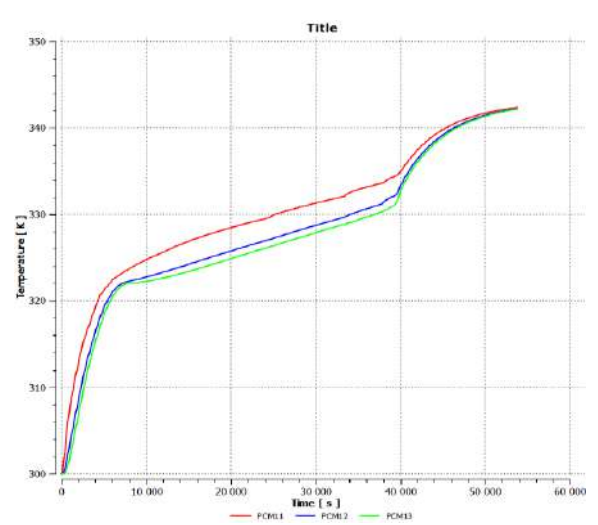
(c)



(d)



(e)



(f)

Figure 3.12: Evolution temporelle de la température, positions axiales et radiales, pour: (a),(b) $T_{ini}=85^{\circ}\text{C}$, (c),(d) $T_{ini}=75^{\circ}\text{C}$ et (e), (f) $T_{ini}=70^{\circ}\text{C}$

3.6.1.2. Effets de débit du fluide caloporteur (HTF) :

L'effet de débit du fluide caloporteur HTF sur le temps de la solidification et de la fusion du MCP est montré sur la figure 3.15. Avec l'augmentation de débit du fluide HTF, le coefficient de transfert thermique par convection augmente, qui mène une augmentation de taux de transfert thermique entre le HTF et le PCM. Donc le temps de fusion diminue avec l'augmentation de débit du HTF. Le temps de fusion diminue de 362min à 330min avec une augmentation de débit de 0.024 kg/s à 0.012 kg/s. Ce qui est le contraire pour le cas de la solidification, celui-ci augmente de 230 min à 552 min, voir Figure 3.13.

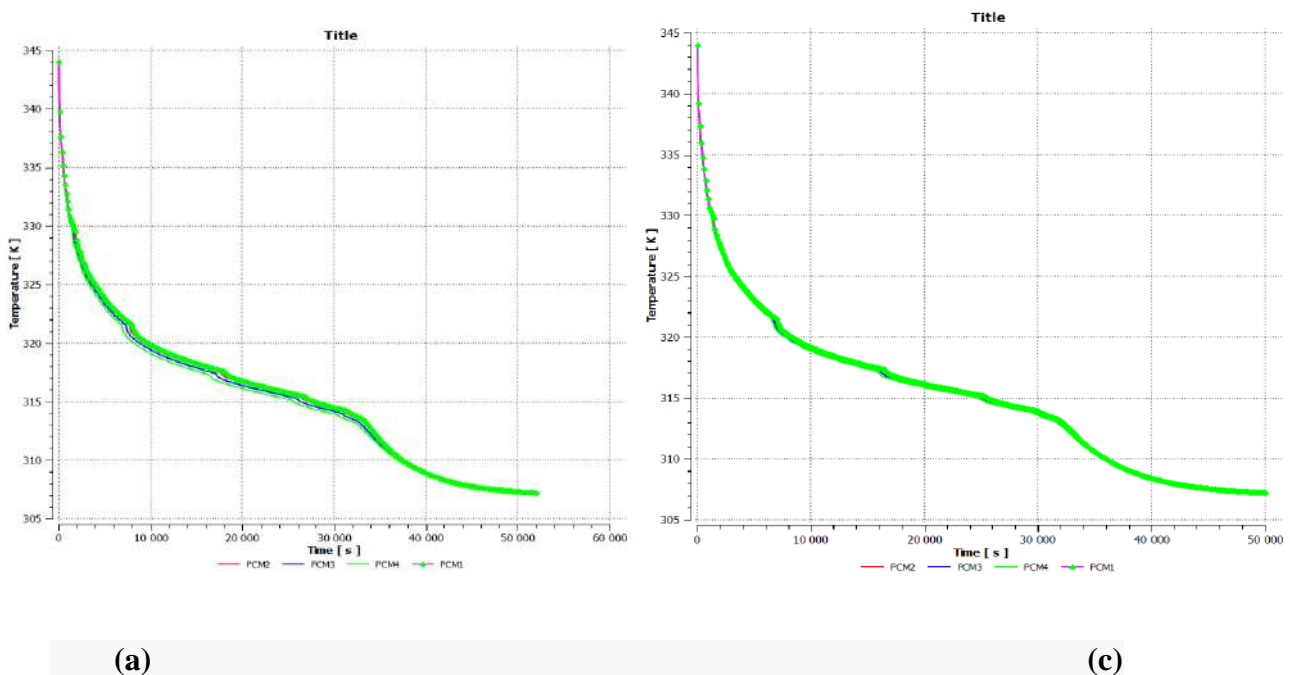
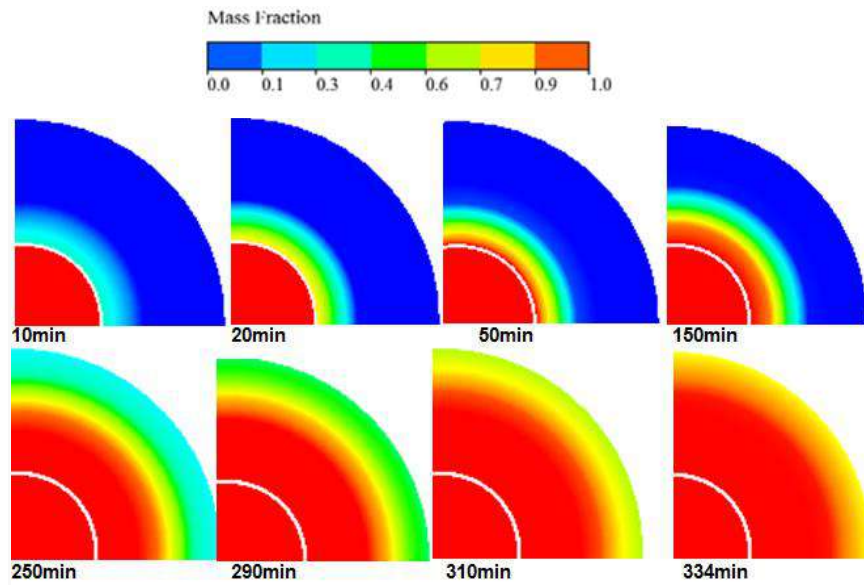
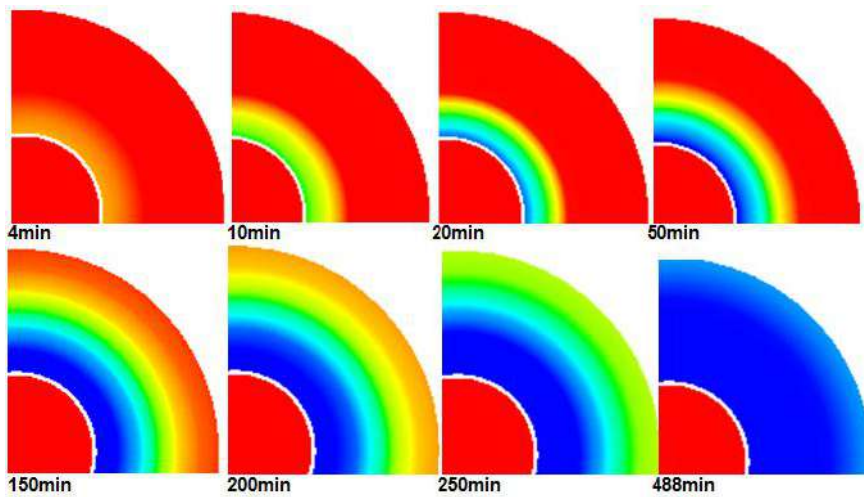


Figure 3.13: Evolution temporelle axiale de la température, pour la position horizontale avec $T_{inl} = 85^\circ\text{C}$: (a) $\dot{m} = 0.08 \text{ kg/s}$ et (b) $\dot{m} = 0.012 \text{ kg/s}$ cas de décharge

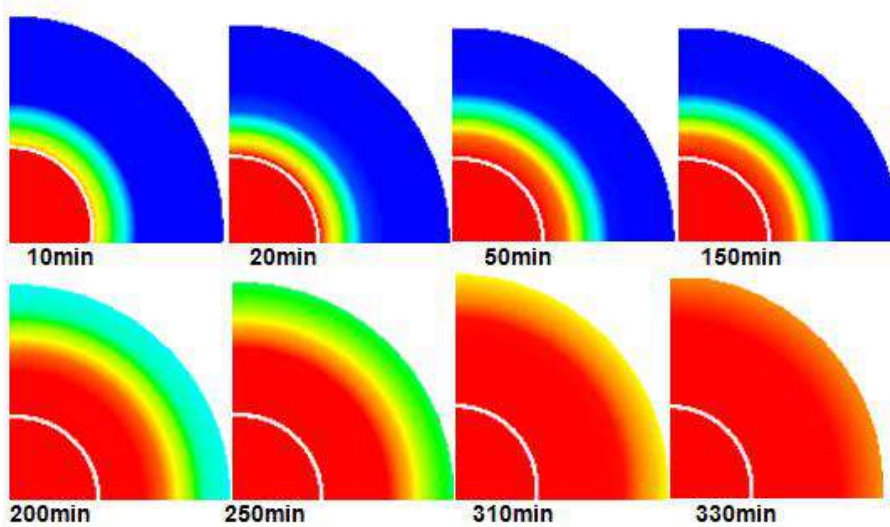
L'effet de débit du fluide caloporteur (HTF) sur la fraction massique du MCP durant le processus de charge est montré sur la Figure 3.14. La première étape est l'étape de stockage par chaleur sensible, avec l'augmentation de débit, le transfert thermique entre le HTF et le MCP est amélioré, qui cause une augmentation très rapide de la température du PCM jusqu'à la température de fusion. Ainsi, l'étape de stockage par chaleur sensible diminue avec l'augmentation de débit. Dans l'étape de stockage par chaleur latente, les performances du transfert thermique augmentent qui résultent en un taux de fusion plus rapide de PCM.



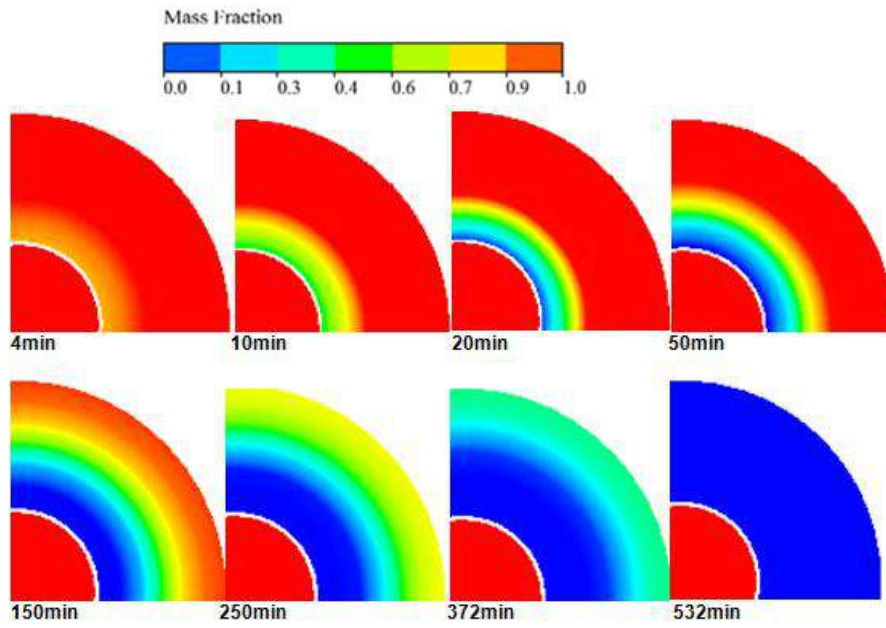
(a) Charge pour $\dot{m}=0.08\text{kg/s}$



(b) Décharge pour $\dot{m}=0.08\text{kg/s}$



(c) Charge pour $\dot{m}=0.012\text{kg/s}$



(d) Décharge pour $\dot{m}=0.012\text{kg/s}$

Figure 3.14: Contours radiaux de la fraction massique de PCM durant le processus de charge et décharge

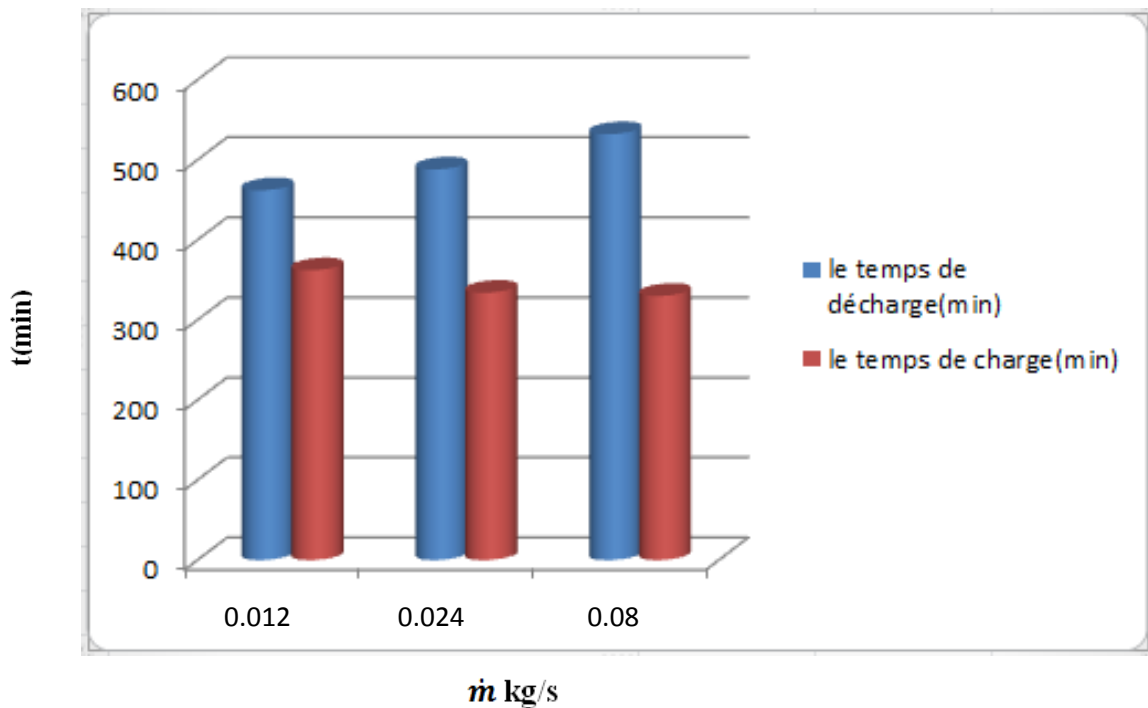


Figure 3.15: Variation de temps de charge et de décharge en fonction de débit

3.6.1.3. Effets du diamètre de tube :

Dans cette section, on va étudier l'effet du diamètre de tube extérieur qui détermine la quantité du PCM contenu dans l'espace annulaire pour D_{ext} (102mm, 80mm et 60mm). Les performances de l'unité LHS seront étudiées pour le même débit massique (0.024kg /s) et température d'entrée du fluide HTF égale à $T_{inl}=85^{\circ}C$. Avec la diminution du diamètre de tube extérieure (D_{ext}), alors la quantité du MCP dans l'espace annulaire diminue, le temps de fusion diminue. Quand le diamètre externe diminue de 102 mm à 60 mm, le temps de fusion diminue de 362min à 130min qui diminue d'environ 64%, voir Figure 3.16.

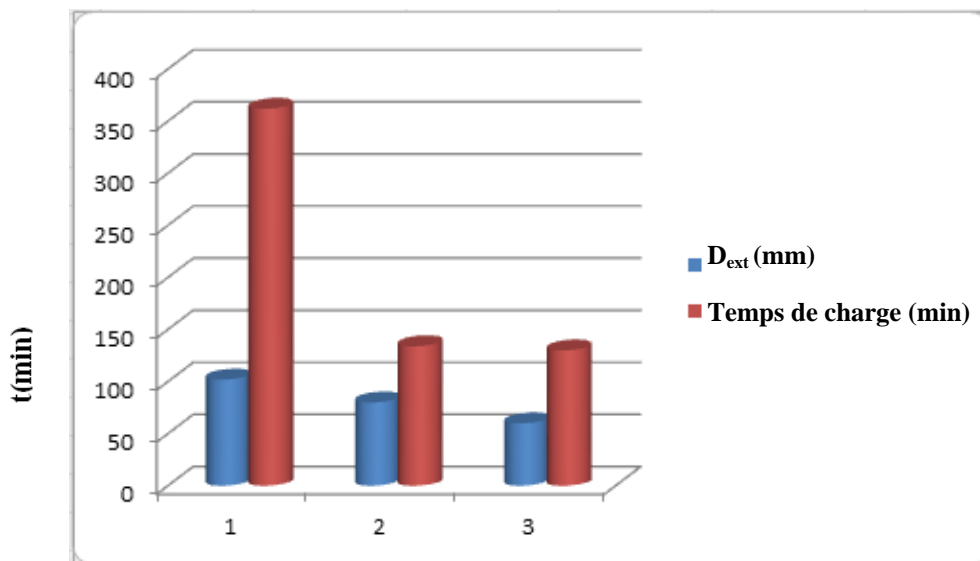


Figure 3.16: Effet du diamètre de tube sur le temps de fusion du PCM

3.6.2. Cas de tube vertical :

3.6.2.1. Effets de gravité dans le cas de la charge par le haut et le bas

La présente étude a exploré numériquement le processus de fusion d'un matériau à changement de phase (PCM) dans un système cylindrique concentrique vertical.

La figure 3.17, illustre le temps de fusion pour la position verticale de l'unité de stockage, pour un débit de 0.024kg/s. On remarque que la zone centrale est plus chaude que les zones latérales laissant apparaître des isothermes avec une forme de longue. La gravité et la flottabilité du PCM fondu se déplacent vers le sommet du LHS. La fusion à l'extrémité inférieure atteint très rapidement la paroi extérieure par rapport à la fusion du front à l'extrémité supérieure de LHS. Le MCP liquide observé à la surface du tube HTF près de l'entrée du HTF montre l'effet de la gravité sur le MCP.

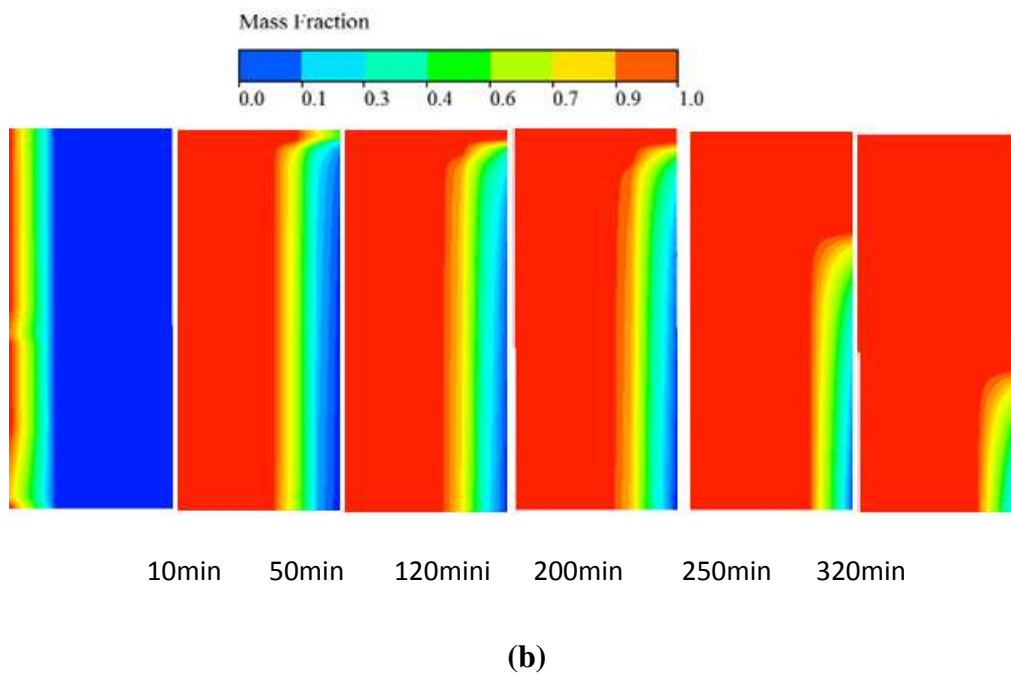
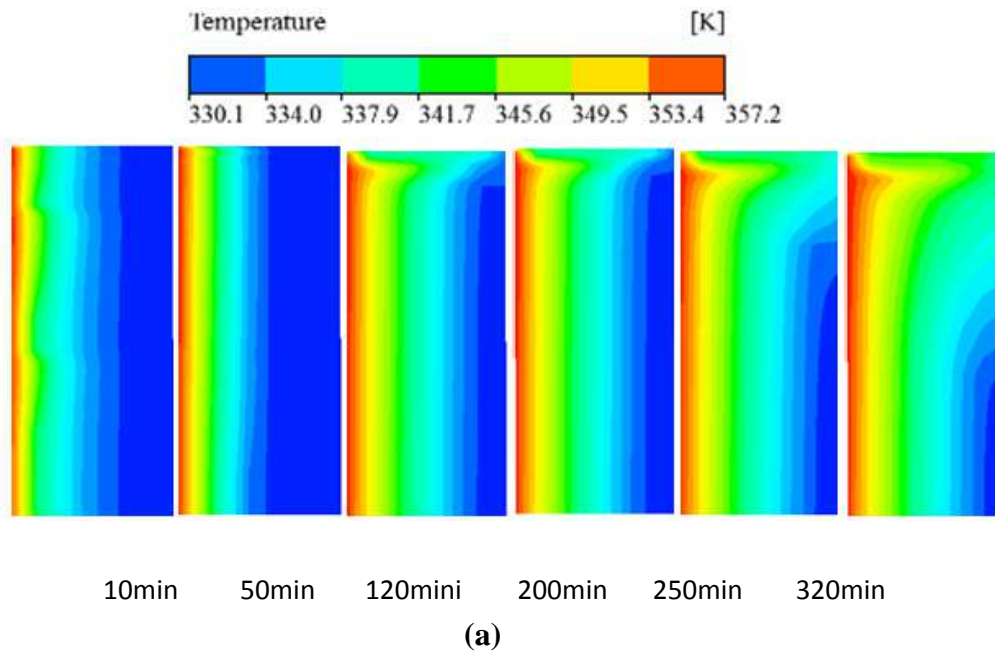


Figure 3.17: Contours radiaux (a) : Fraction massique, (b) : Température du PCM durant le processus charge $T_{in}=85^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=0.012\text{ kg/s}$

3.6.3. Analyse des fronts de fusion (position horizontale et verticale)

Design (a)

La figure 3.10, montre la position du front de la fusion en fonction du temps. On observe que la fusion commence à partir de la surface du tube HTF et se déplace vers la direction radiale et atteint la paroi extérieure en 320 min. Le front de fusion est relativement horizontal, le front de fusion est axisymétrique par rapport au tube.

Design (b)

La Figure 3.17 montre le déplacement de l'interface solide-liquide. La position de l'interface à différents moments de la fusion du MCP ($t=10\text{min}$, $t=50\text{min}$, $t=200\text{min}$, $t=250\text{min}$, et $t=320\text{min}$). Au tout début du processus de fusion ($t=100\text{min}$), l'interface est presque verticale, signifiant la prédominance du mode de transfert de chaleur par conduction. Les isothermes demeurent verticales et parallèles. Au fur et à mesure, le front s'incline. Il apparaît un point d'inflexion en haut. Il se produit dans cette dernière région un « blocage » des transferts conduisant au ralentissement de l'interface. Au fur et à mesure que la convection s'intensifie, le taux de fusion s'accroît dans la partie supérieure de l'interface. Le fluide se trouvant à proximité de la paroi chauffée acquiert de la chaleur, ce qui provoque une augmentation de sa température et une diminution de sa densité. Alors, il monte le long de la paroi chauffée. En haut de la cellule, sa quantité de mouvement est très importante, puis le fluide descend le long de l'interface solide-liquide. Au cours de sa descente, il perd sa chaleur au profit de l'interface froide. Par conséquent le front de fusion n'est pas horizontal. Il progresse plus rapidement formant des langues de liquides. Les fronts de fusion n'évoluent pas de manière régulière de l'injection vers la sortie.

La gravité influence sur la forme des fronts de fusion de la partie supérieure et la partie inférieure, l'expansion volumique joue aussi un rôle lors des charges horizontales, étant donné qu'elle permet d'apporter du fluide chaud dans la partie supérieure de l'échangeur et de contribuer à rogner le solide dans la partie inférieure. On admettant le montage vertical le temps de fusion diminue de 362mn à 320mn avec un pourcentage de 11.66%.

Conclusion

Nous avons présenté dans cette partie une étude numérique, traitant le problème de stockage de l'énergie thermique par chaleur latente en utilisant les matériaux à changement de phase MCP. Cette étude a été faite dans une unité de stockage formé de deux tubes concentriques dont le MCP est emprisonné dans l'espace annulaire et le fluide caloporteur circulant dans le tube central. La méthode des volumes finis est utilisée pour résoudre les équations qui régissent le transfert de chaleur et de masse pendant le processus de changement de phase solide-liquide, en utilisant le logiciel CFD, ANSYS FLUENT 17.1.

On est intéressé essentiellement de faire une comparaison quantitative, qui vise une étude numérique des performances d'une unité de stockage thermique par chaleur latente LHS (Latent Heat Storage), sous l'effet des paramètres de fonctionnement tel que: la température et le débit du fluide caloporteur, les conditions initiales d'injection, c'est-à-dire le débit et la température d'entrée de l'HTF sur le temps du processus de la fusion/solidification.

- Les résultats montrent d'après les paramètres étudiés que la température d'entrée du fluide caloporteur (HTF) a le plus grand effet sur le taux de transfert thermique de l'unité de stockage thermique (LHS). Pour une augmentation de la température d'entrée du (HTF) de 343K jusqu'à 358 K, le temps de fusion se réduit de 39.6%. Et l'effet d'augmentation de la température sur la distribution de l'interface solide-liquide est uniforme.
- Le deuxième facteur qui a une influence importante sur le processus est le diamètre du tube (la quantité de PCM). Quand le diamètre du tube extérieur est diminué (donc la quantité de PCM est diminuée) de 102 mm à 60 mm, le temps de fusion réduit de 64%. L'effet de la diminution de diamètre sur la distribution de l'interface solide-liquide est très rapide par rapport au précédent.
- L'effet de débit de fluide caloporteur (HTF) sur les performances du processus est plus faible par rapport aux précédents. Avec une augmentation du débit de 0.012kg/s à 0.024kg/s, le temps de fusion réduit d'environ de 8.9 %.
- Les différentes configurations de tubes HTF (horizontale et verticale) ont été testées sous des paramètres constants de température d'entrée HTF de 85°C et d'un débit HTF de 0.024 kg/s. Le taux de fusion en position verticale est plus rapide que dans le montage horizontal. Le montage du tube HTF vertical correspond au temps minimal possible pour charger le PCM en raison de la convection naturelle améliorée dans la région en fusion. Alors les systèmes verticaux sont préférables aux configurations horizontales.

3.7 Simulation de l'unité de stockage de chaleur à triple concentrique tubes

L'objectif de cette étude est de faire une comparaison quantitative, qui vise une étude numérique des performances d'une unité de stockage thermique par chaleur latente LHS (Latent Heat Storage), sous l'effet des paramètres géométriques sur le temps du processus de fusion/solidification, le taux de stockage thermique et la fraction de fusion du MCP.

3.7.1. Modèle physique

Dans le cadre de ce travail, on va s'intéresser à l'étude numérique du problème de stockage de l'énergie par chaleur latente dans une d'unité (LHS) de stockage de chaleur à triple tube concentrique. La méthode des volumes finis est utilisée pour résoudre les équations qui régissent le transfert de chaleur et de masse pendant la processus de changement de phase, en utilisant le logiciel CFD, Ansys Fluent 17.1. La méthode d'enthalpie est employée pour modéliser le passage entre l'état solide et l'état liquide. L'unité de stockage est composée de trois tubes concentriques : le fluide caloporteur (HTF) circule dans les tubes interne et externe, tandis que le MCP est placé dans l'espace annulaire intérieur. La configuration du modèle physique est montrée sur les figures 3.18, figure 3.19 et le Tableau 3.8.

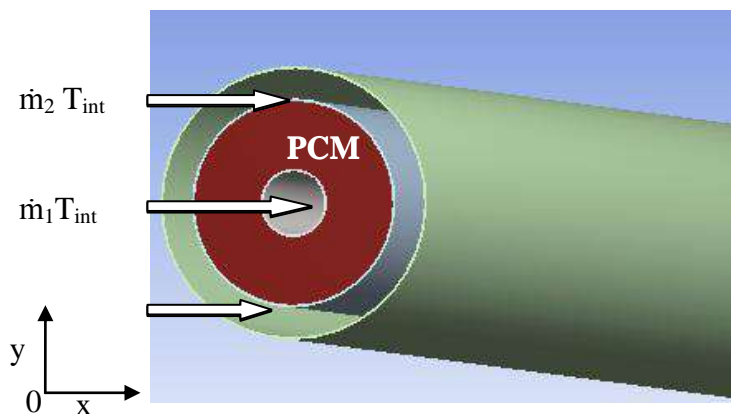


Figure 3.18 : Modèle physique en 3D

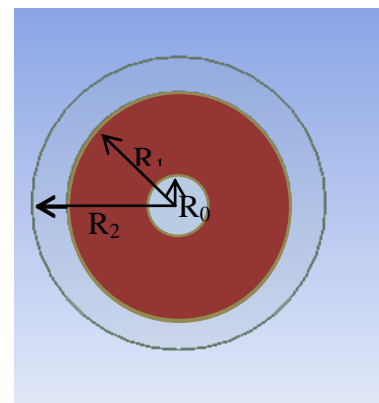


Figure 3.19 : Modèle physique en 2D

Tableau 3.8: Caractéristiques géométriques

Caractéristiques géométriques	Valeur
Longueur du tube en cuivre	$L = 1000$ mm
Diamètre intérieur du cylindre en cuivre	$D_{int} = 22$ mm
Diamètre intermédiaire du cylindre en cuivre	$D_{intr} = 78$ mm
Diamètre extérieur du cylindre en cuivre	$D_{ext} = 80$ mm

3.7.2. Méthodologie de calcul

La géométrie a été créée dans ANSYS-workbench DesignModeler ainsi que le maillage de la géométrie est discrétisé à l'aide d'une grille quadrilatérale de 84000 nœuds. La simulation a été exécutée en mode 3D double précision. Les paramètres utilisés dans la simulation sont résumés dans le Tableau 3.9.

Tableau 3.9 : Configuration pour la simulation Fluent

Description	Type
Solver	Pressure-Based
Velocity Formulation	Absolute
Time	Transient
Gravity	On
Energy	On
Viscous	Laminar
Solidification & Melting	On

3.7.3. Matériaux utilisés

3.7.3.1. Matériau à changement de phase (MCP)

Les matériaux de changement de phase peuvent assurer un meilleur stockage de chaleur sans avoir un écart significatif de température à cause de leurs grandes énergies latentes de fusion. Dans notre étude on a choisi les Paraffines RT50 et RT35 dont les caractéristiques physiques sont données dans le Tableau 3.10. La paraffine possède une chaleur latente très élevée et peut être trouvée partout. Plusieurs études ont déjà établi les propriétés thermo physiques de la paraffine. Mais un des inconvénients de l'utilisation de la paraffine, c'est que cette dernière présente un grand coefficient d'expansion (10%). Il faut en tenir compte pendant la conception des contenants d'un élément de stockage à paraffine.

Tableau 3.10: Propriétés thermophysiques de l'eau et MCP [74]

Propriétés	Eau	RT50	RT35
Température de fusion, T_{fus} (°C)	-	49	36
Température de solidification, T_s (°C)	-	43	29
Masse volumique, ρ (kg/m ³)	998.2	880	815
Chaleur spécifique, C_p (J/kg.K)	4182	2000	2000
Conductivité thermique, λ (W/m.K)	0.6	0.2	0.2
Chaleur latente, ΔH (kJ/kg)	-	168	170
Viscosité dynamique, μ (kg/m.s)	1.003×10^{-3}	2.75×10^{-2}	2.3×10^{-2}
Coefficient de dilatation thermique, ϵ_t (K ⁻¹)	-	1.0×10^{-3}	6×10^{-4}

3.7.4 Processus de transfert de chaleur en MCP

3.7.4.1. Processus de changement de phase

Le MCP absorbe la chaleur et quand il atteint le point de fusion, il commence à fondre. Il existe deux types de transition de phase. La transition de phase iso-thermique dans laquelle le MCP fond à une température donnée et la seconde est la transition de phase non isothermique dans laquelle la fusion a lieu dans une certaine plage de température. La région de transition de phase (interface) est la région qui divise deux phases différentes, c'est-à-dire qui sépare le solide de la phase liquide. Cette interface, pour la plupart des matériaux purs, se solidifiant dans des conditions de congélation ordinaires à une température fixe, apparaît localement plane et d'une épaisseur négligeable (c'est-à-dire qu'elle a un front net). Dans d'autres cas, résultant généralement de super-refroidissements et de mélanges binaires, la région de transition de phase peut avoir une épaisseur apparente et est appelée interface.

3.7.4.2. Conductivité thermique variable avec changement de phase

La conductivité thermique est la propriété du matériau qui définit sa capacité à transférer une quantité de chaleur par unité de longueur de matériau et par différence de température. Chaque matériau a des valeurs de conductivité thermique différentes en phase solide et liquide. La conductivité du MCP est supposée constante et sa valeur moyenne est prise lors de la modélisation LHS.

3.7.4.3. Masse volumique variable avec la température

La masse volumique change avec la température, combinée à la gravité, produisant un flux de convection naturel ou entraîné par la flottabilité dans le liquide. Pour traiter les forces du corps, l'approximation de Boussinesq est utilisée.

3.7.4.4. Conditions initiales et aux limites

Les conditions aux limites sont imposées comme suit, voir la Figure 3.20.

- Paroi extérieure adiabatique.
- Les parois supérieures et inférieures sont supposées adiabatiques.

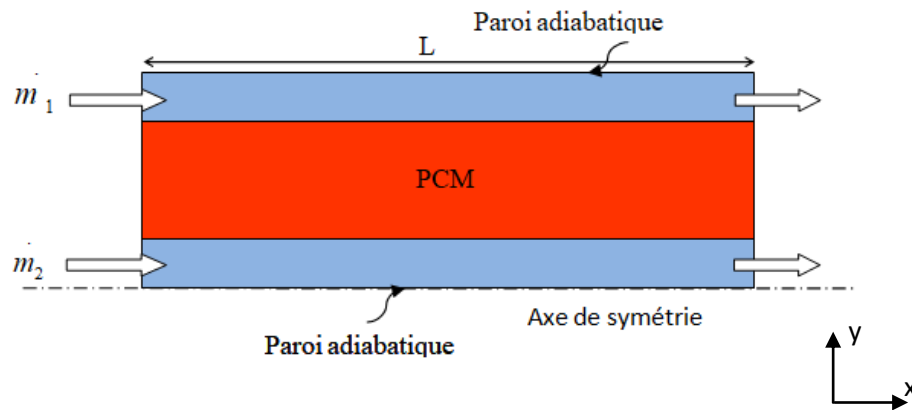


Figure 3.20: Schéma de l'unité de stockage

(a) Cas de la fusion (charge)

En cas de fusion, on a imposé un débit massique constant de 0.024Kg/s du fluide caloporteur (HTF) dans les tubes intérieur et extérieur avec une température constante de 323 K. Les parois inférieure et supérieure du MCP domaine sont conservées comme des murs adiabatiques en considérant qu'il n'y a pas de chaleur ajoutée ou perdue. On considère que le système est à une température de 298 K comme valeur initiale.

(b) Cas de la solidification (décharge)

Au cours du processus de solidification, le PCM initialement a été considéré complètement fondu. Ceci est rendu possible en fixant la température du MCP au-dessus de sa température de fusion (323K). Le fluide caloporteur s'écoule à une température de 307K avec un débit totale ($\dot{m}=\dot{m}_1+\dot{m}_2$) de 0.024kg/s. Les Conditions aux limites des parois du MCP restent les mêmes que celles de la condition de fusion.

- Au moment initial, le MCP est considéré comme un liquide ou un solide immobile qui est maintenu à une température constante pour les deux modèles.
- A la sortie: On suppose un écoulement pleinement développé imposant un gradient nul de toutes les variables.

3.7.4.5. Paramètres de convergence de la solution

Avec de nombreuses études et observations au cours de la simulation, il a été constaté que certaines valeurs et certains paramètres jouent un rôle important dans la recherche d'une solution convergente. Certains paramètres les plus importants sont énumérés ci-dessous:

- **Masse volumique:** Comme la masse volumique du MCP varie avec l'augmentation ou la diminution de la température au cours de son processus de fusion et de solidification. La masse volumique a été définie comme une fonction linéaire de la température.
- **Gamme de fusion ΔT :** La différence de température entre les états solide et liquide du PCM jouait un rôle énorme. Au début de la simulation, la différence de température était maintenue entre 0,5 K et 2 K et présentait une instabilité et une couche très mince de la zone pâteuse. Avec une différence de température de 3 K, il a montré une bonne stabilité, il a donc été décidé de le conserver pour le reste des simulations.
- **Méthode de la solution:** le schéma PRESTO est utilisé pour l'équation de correction de pression et un algorithme bien connu d'équation semi-simultanée liée à la pression (SIMPLE) est utilisé pour le couplage pression-vitesse. Les équations de moment, de cinétique turbulente et d'énergie ont été calculées à l'aide du schéma du premier ordre.
- **Facteurs de relaxation et taille du pas de temps:**

Afin d'assurer la convergence les facteurs de relaxation étaient réglés comme suit : Pression 0.3, Densité 0.8, Momentum 0.3, Forces corporelles 1, Fraction liquide 0.1, Énergie 0.9, Énergie cinétique turbulente 0.8 et taux de dissipation turbulente 0.8.

3.7.4.6. Choix du maillage

Pour une meilleure précision et une meilleure stabilité, nous avons adopté un maillage quadrilatéral structuré à multi blocs, formé de lignes continues à travers le domaine qui suivent au mieux le contour des surfaces définissant la géométrie. Après des tests de précision, un maillage de 84000 cellules a été adopté, voir figure 3.21.

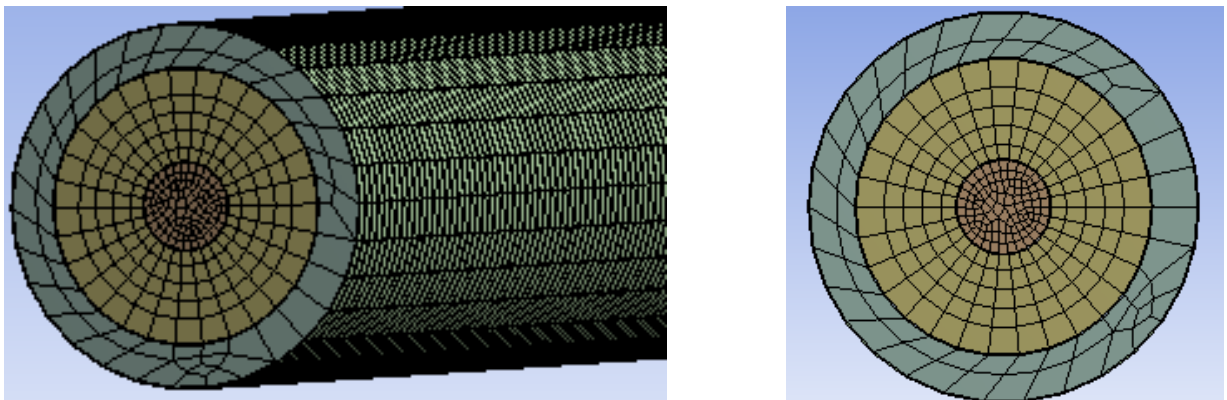


Figure 3.21: Maillage quadrilatéral structuré à multi blocs

Avant le lancement de la simulation on a fixé le pas de temps pour exporter les résultats obtenus pour chaque 1000s. Pour suivre l'interface de la fusion et la solidification on a choisi trois points (1, 2 et 3) situés dans le même plan axial, voir la figure 3.22.

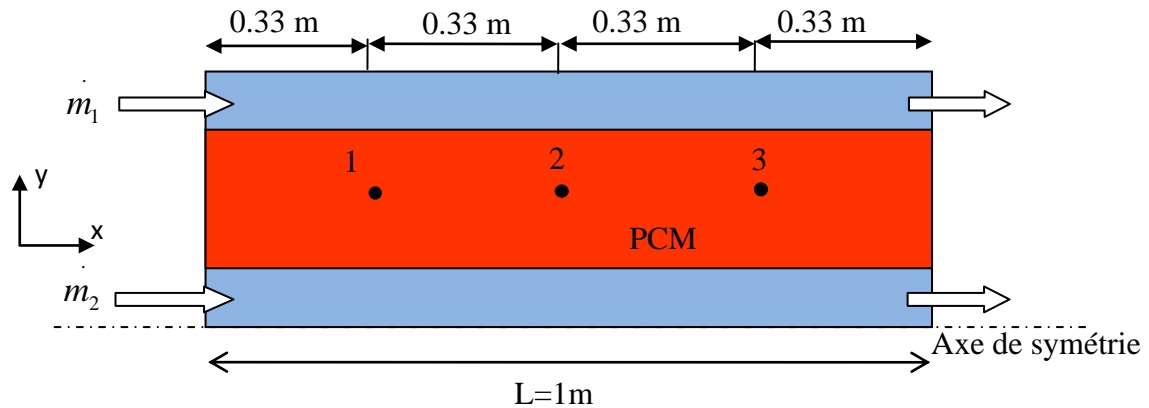


Figure 3.22: Position des points 1,2 et 3

3.7.5. Résultats et interprétations

(A) Cas de la charge (fusion)

(a) Distribution de la température

La position de l'interface solide-liquide pour les deux MCP (RT50 et RT35) est illustrée par les Figures 3.23 et 3.24. Le MCP contenu dans l'espace annulaire est chauffé par le HTF circulant à la fois dans les tubes interne et externe. Au début du processus de charge et avant $t = 300$ min, l'énergie thermique transférée par HTF entraîne l'augmentation progressive de la température du MCP. Au cours de cette étape, l'unité de stockage stocke l'énergie thermique solaire sous forme de chaleur sensible et la température MCP reste inférieure au point de fusion. À partir de $t = 333$ min, la température du MCP en contact avec les parois d'échange thermique atteint la température de fusion, ce qui déclenche le début du processus de changement de phase. Il convient de noter qu'en raison de la différence de température la plus élevée entre HTF et MCP, le champ de température se propage plus rapidement dans la région d'entrée du fluide caloporteur. Au fil du temps, la phase liquide s'élargit.

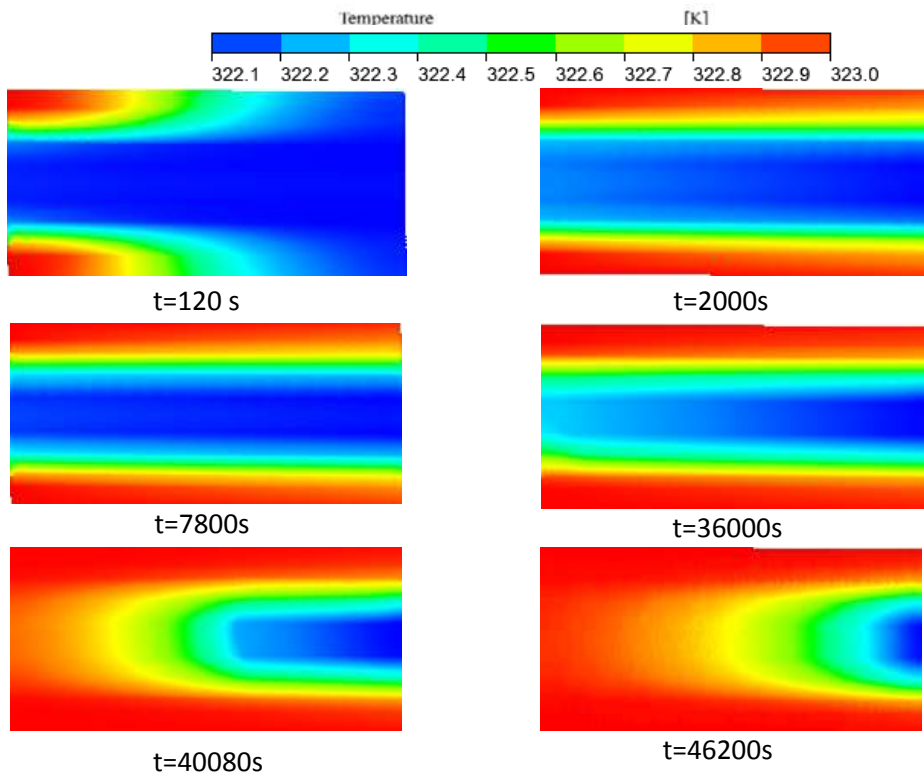


Figure 3.23: Contours de la température pour $\dot{m}=0.024 \text{ Kg/s}$ et $T_{in}=50^\circ\text{C}$ (Charge) (RT35)

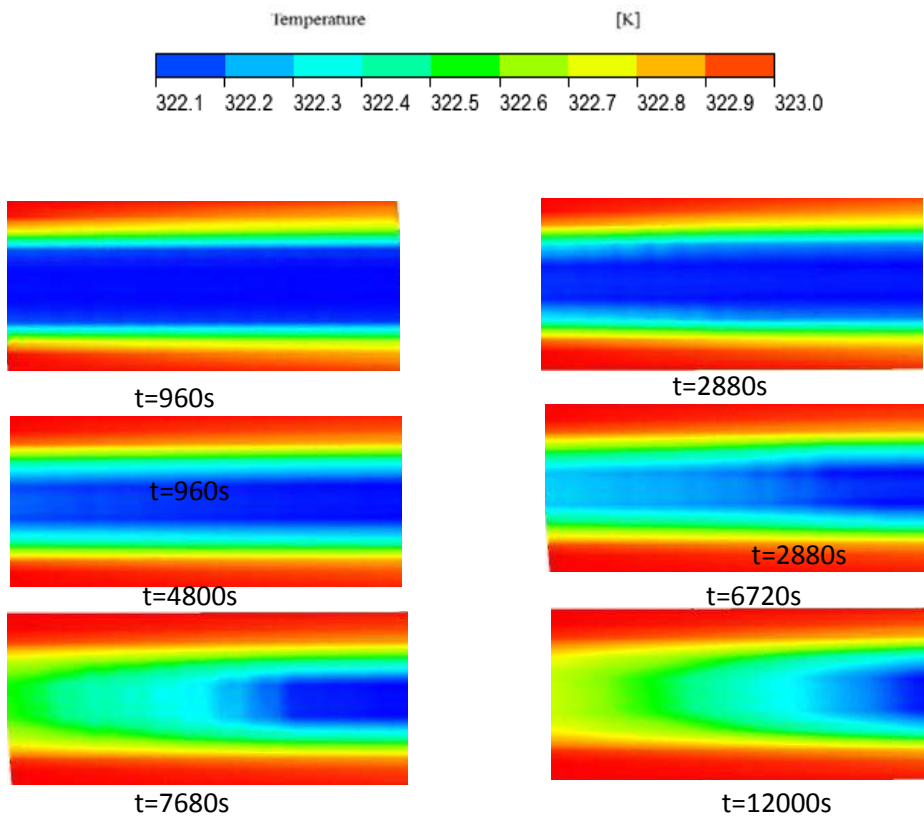


Figure 3.24: Contours de la température pour $\dot{m}=0.024 \text{ kg/s}$ et $T_{in}=50^\circ\text{C}$ (charge) (RT50)

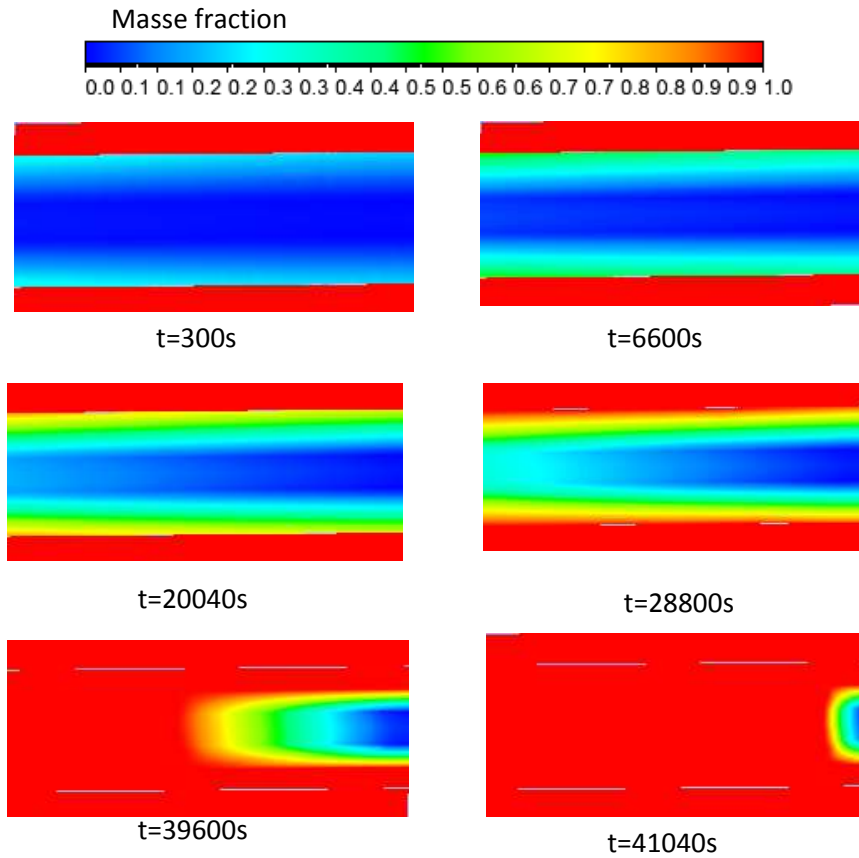


Figure 3.25: Contours de la fraction massique pour $\dot{m}=0.024\text{kg/s}$ et $T_{in}=50^\circ\text{C}$ (charge) (R35)

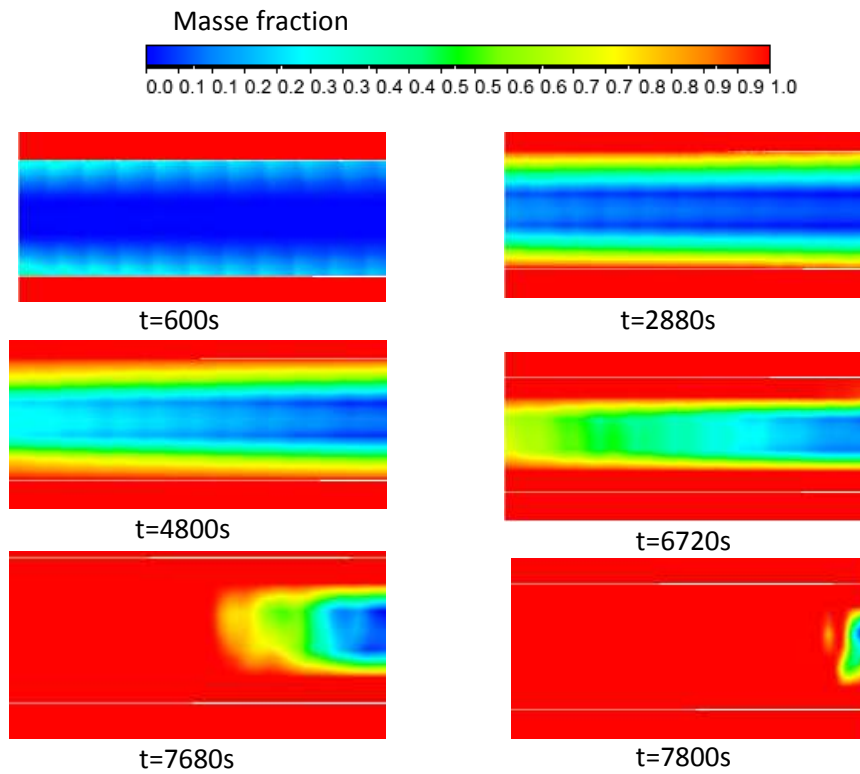


Figure 3.26: Contours de la fraction massique pour $\dot{m}=0.024\text{kg/s}$ et $T_{in}=50^\circ\text{C}$ (charge) (RT50)

(b) Interface solide-liquide

Pendant les premières heures du processus de chargement (3000s), aucun changement de phase ne se produit dans l'unité de stockage et l'énergie transférée au PCM par le fluide caloporteur (HTF) ne sert qu'à augmenter progressivement sa température. À 3000s, le processus de fusion commence à avoir lieu dans le PCM et deux interfaces solides-liquides apparaissent à la zone d'entrée HTF près des parois d'échange de chaleur séparant PCM et le fluide caloporteur (HTF) figure 3.25 et 3.26.

(c) Profils de la température

La distribution de la température dans le domaine MCP dans les sections (1, 2 et 3) en fonction du temps est présentée sur les Figures 3.27 et 3.28 pour deux types de MCP. Tous les profils présentent la même allure: d'abord une montée de la température, jusqu'à atteindre le palier de fusion et enfin une augmentation de la température jusqu'à ce que tout le MCP soit à la température d'injection, ici environ 50°C. Les courbes sont cependant décalées dans le temps en fonction de la position axiale par rapport à l'injection. Le palier de fusion est d'autant plus long que le point se trouve loin de l'injection. Le point qui se situe au plus près de l'injection du fluide caloporteur connaît ainsi une rapide montée en température et un palier de fusion plus court que les autres.

(d) Profils de la fraction massique

Les figures 3.29 et 3.30, montrent les variations de la fraction de fusion du MCP en fonction du temps pour trois différentes positions axiales points (1,2 et 3). En raison de la température initiale du MCP, celle-ci est inférieure à la température de fusion. Au début du processus de charge, la fraction de fusion est égale à zéro la durée de cette étape est d'environ 10 à 15 minutes, ce qui signifie que le MCP reste à l'état solide et que cette étape est une étape de stockage de chaleur sensible. La température du MCP augmente rapidement avec de plus en plus d'énergie thermique transférée au MCP. Lorsque la température du MCP atteint la température de fusion, le processus de fusion commence, la fraction de fusion du MCP augmente de zéro à 1.

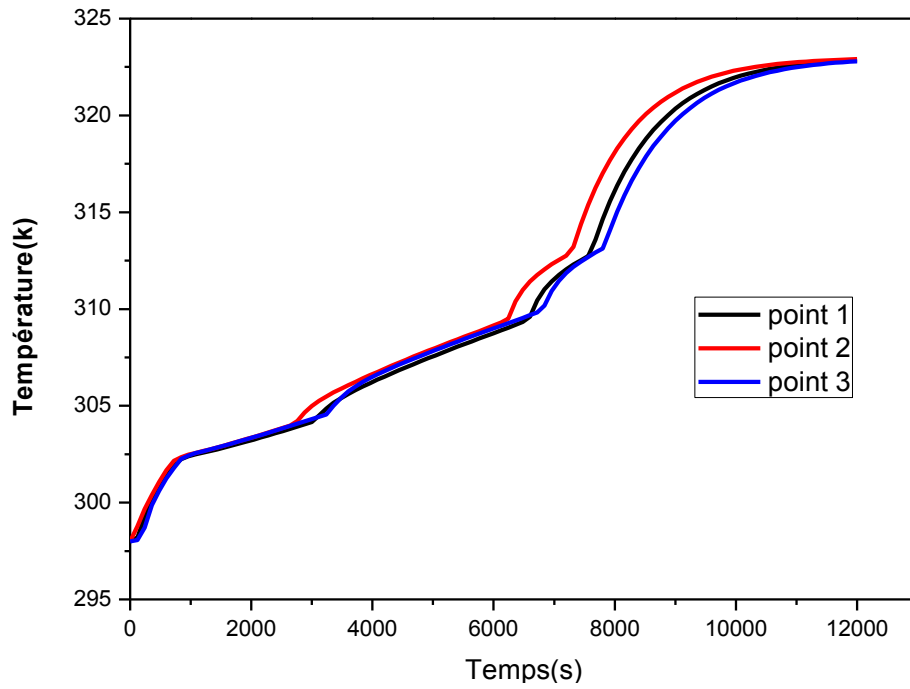


Figure 3.27: Variation de la température (RT35) pour $T_{in}=50^{\circ}\text{C}$ et $\dot{m}=0.024\text{Kg/s}$ (charge)

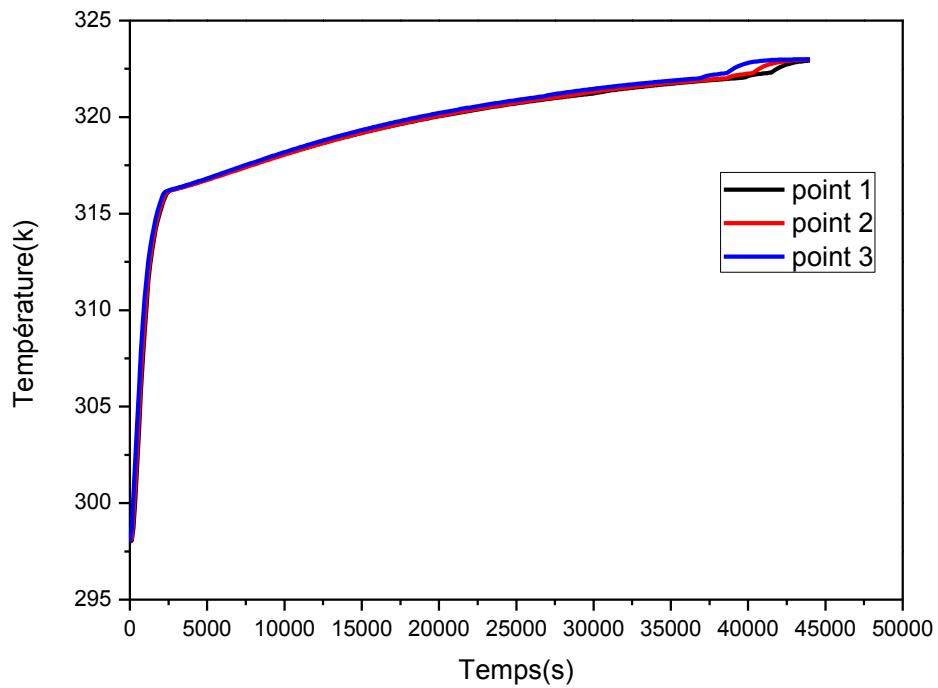


Figure 3.28: Variation de la température (RT50) pour $T_{in}=50^{\circ}\text{C}$ et $\dot{m}=0.024\text{Kg/s}$ (charge)

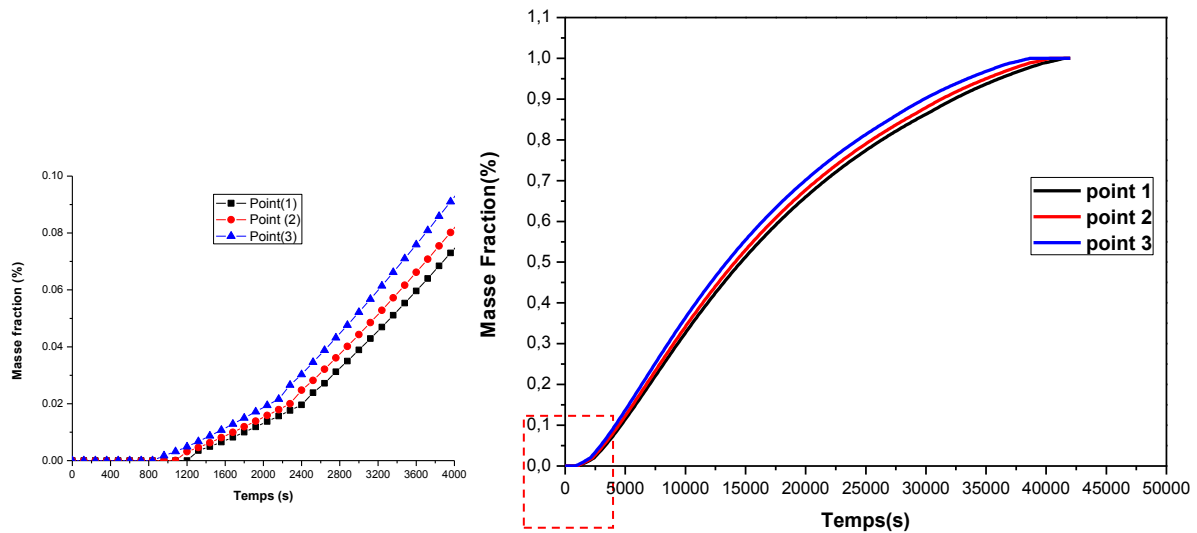


Figure 3.29: Variation de la fraction massique du MCP (RT50) en fonction du temps pour $T_{in}=50^{\circ}\text{C}$ et $\dot{m}=0.024\text{kg/s}$ (charge)

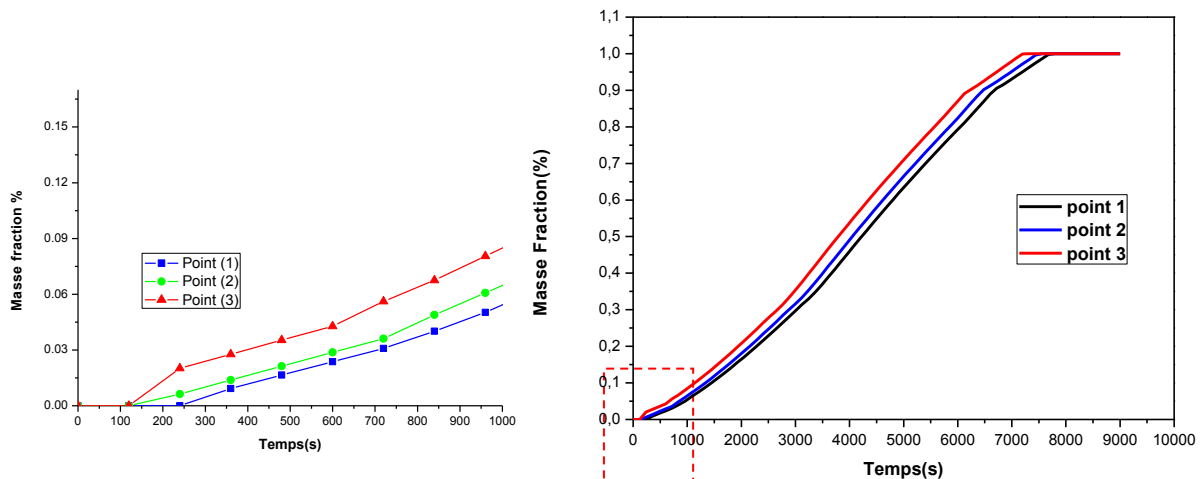


Figure 3.30: Variation de la Fraction massique du (RT35) en fonction du temps pour $T_{in}=50^{\circ}\text{C}$ et $\dot{m}=0.024\text{ kg/s}$ (charge)

(e) Effet de la température d'entrée du fluide caloporteur :

Une comparaison entre l'effet de la température d'entrée et de la masse le débit indique que la température d'entrée joue un rôle beaucoup plus important rôle dans le processus de fusion. L'augmentation de la température d'entrée conduit à une plus grande différence de température entre le HTF et le MCP. Les résultats montrent que la température d'entrée du fluide caloporteur HTF le plus grand effet sur le taux de transfert thermique de l'unité de stockage. Pour une augmentation de la température d'entrée du HTF de 50°C à 60°C et à 70°C , le temps de fusion se réduit de 20% à 40% respectivement voir Figure 3.31. On

remarque que l'effet d'augmentation de la température sur la distribution de l'interface solide-liquide est uniforme.

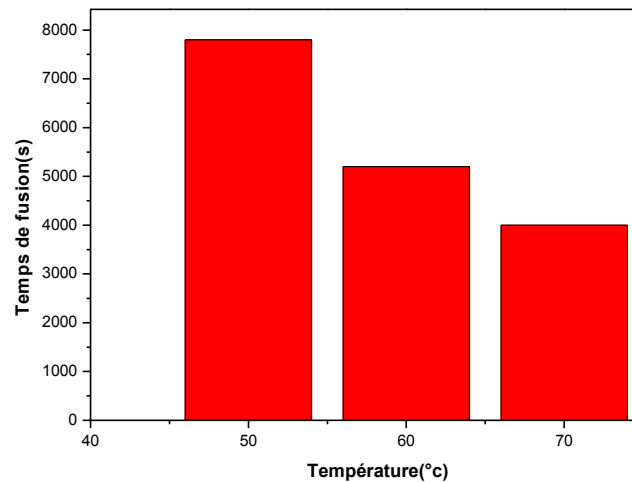


Figure 3.31: Temps de fusion pour différents températures d'entrée : $T_{int}=50^{\circ}\text{C}$, 60°C et 70°C , $\dot{m}=0,024\text{kg/s}$

(f) Effet de la vitesse d'entrée du fluide caloporteur

Le deuxième facteur qui a une influence importante sur le processus est la vitesse d'entrée du fluide caloporteur. Quand le débit du HTF augmente de 0.024 kg/s à 0.032 kg/s et à 0.04kg/s . Le temps de fusion se réduit de 2% à 4%. Et l'effet d'augmentation de la vitesse sur la distribution de l'interface solide-liquide est très rapide par rapport au processus de fusion voir Figure 3.32. Le débit massique ne joue pas un rôle aussi important dans la fusion processus. La température du fluide caloporteur à l'entrée peut affecter grandement le processus de la fusion, et l'augmentation de la température d'entrée accélère la fusion du MCP.

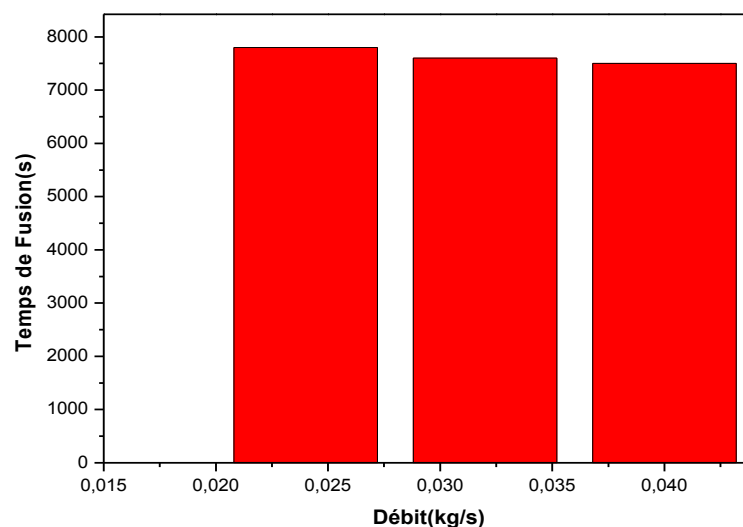


Figure 3.32: Temps de fusion pour différents débits d'entrée : $\dot{m}=0.024\text{Kg/s}$, 0.032kg/s et 0.04kg/s et $T_{in}=50^{\circ}\text{C}$

(g) Énergie thermique totale stockée

La quantité d'énergie stockée pendant le processus de fusion peut être défini en calculant l'énergie transférée des parois latérales chaudes au MCP froid pendant le processus de fusion. L'énergie transférée peut être définie comme l'intégration temporelle du taux de transfert de chaleur instantané pendant le processus de fusion, présentée dans les équations ci-dessous. La figure 3.33, présente l'évolution de l'énergie totale stockée dans le domaine MCP en fonction du temps pendant le processus de fusion pour trois températures d'entrée HTF. Au début du processus de fusion, la différence de température entre les parois latérales chaudes de l'enceinte MCP froid est supérieure aux étapes ultérieures du processus de fusion, l'énergie totale stockée augmente progressivement elle atteint sa valeur maximale, puis reste constante à la fin du processus de charge.

L'énergie totale stockée égale à 218126 J/kg, 239344 J/kg et de 259468 J/kg pour les températures d'entrée HTF de 50°C et 60°C et 70°C respectivement. On constate que la quantité d'énergie stockée par le MCP croit de 8.86% à 16.2%, en augmentant la température du HTF de 50°C à 60°C et 70°C. Ces résultats montrent également que la capacité de stockage de chaleur est d'une valeur importante lorsque la différence de température entre la température d'entrée HTF et le point de fusion des MCP est grande.

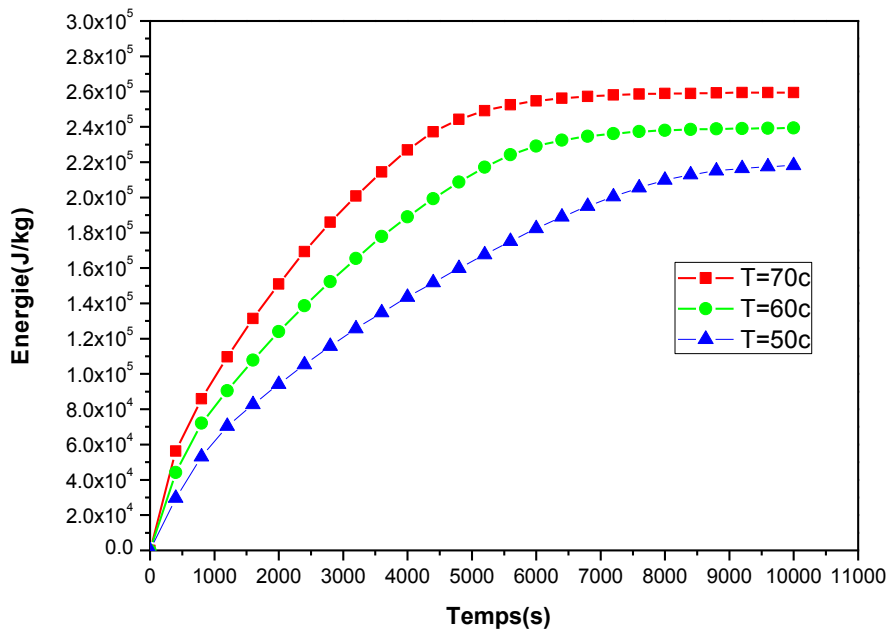


Figure 3.33: Evolution temporelle de l'énergie moyenne absorbée par (RT35), pour: $T_{int}=50^{\circ}\text{C}$, 60°C et 70°C , $\dot{m}=0,024$ kg/s, processus de charge

(h) Nombre de Nusselt moyen en surface

Dans cette étape on discute l'influence de la température d'entrée de fluide chaud sur le processus du changement de phase; en gardant le débit totale fixe à la valeur $\dot{m}= 0,024$ kg/s. La figure 3.34, montre l'évolution du nombre de Nusselt moyen en PCM domaine surface (Nu) durant le processus de la fusion de l'RT35. Le taux de transfert de chaleur au début du processus de fusion est élevé en raison de la différence de température élevée entre les parois chaudes du tube intérieur et extérieur et le (RT-35) qui se trouve à une température de 300K. Lorsque le RT-35 commence à se fondre, sa température augmente, ce qui réduit la différence de température. En conséquence, Nu est élevé au début du processus de fusion. Au fil du temps, le gradient de température a diminué, ce qui a entraîné une forte baisse du nombre de Nu. A ce moment, on observe un changement de pente de Nusselt qui est dû à l'apparition du régime de convection. Au fur et à mesure que la fusion progressait, la convection naturelle est devenue le régime dominant du transfert de chaleur, ce qui peut être identifié par un autre changement de la pente du nombre de Nusselt. Aux dernières étapes du processus de fusion, le gradient de température s'est considérablement dégradé jusqu'à atteindre l'équilibre thermique, ce qui a entraîné une diminution de la magnitude du nombre de Nu. L'augmentation de la température du fluide caloporteur de 50°C à 60°C et 70°C s'est traduite par un processus de fusion plus rapide et une condition d'équilibre thermique. On constate que le nombre du Nusselt évolue de la même façon quel que soit la température d'entrée. En effet, la nature d'entrée peut affecter les valeurs maximales et minimales du nombre de Nusselt ou cours du processus à changement de phase.

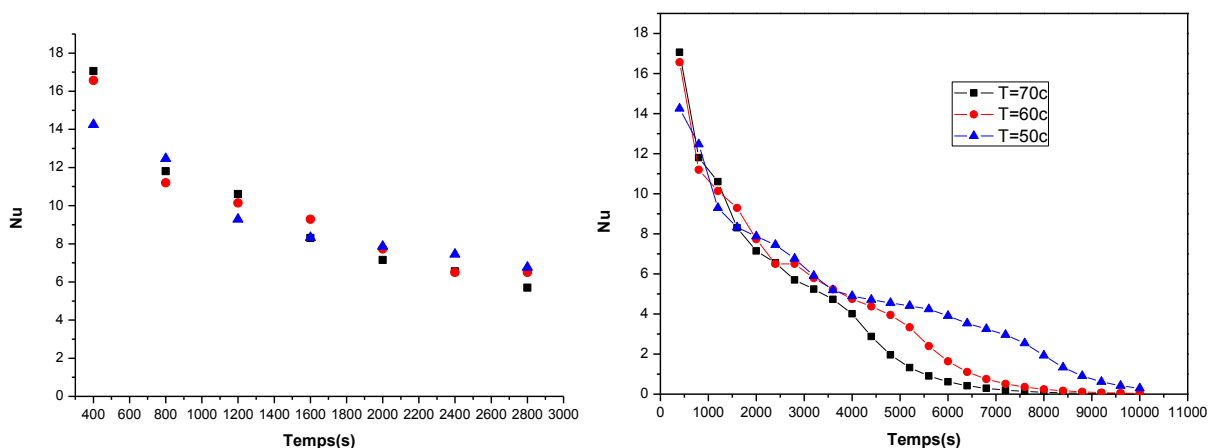


Figure 3.34: Evolution de Nu moyenne (RT35): $T_{int}=50^{\circ}\text{C}$, 60°C et 70°C , $\dot{m}= 0,024$ kg/s (charge)

B) Cas de décharge (solidification)

(a) Distribution de la température et interface solide-liquide

Les Figures 3.35, 3.36, 3.37 et 3.38, montrent le processus de solidification pour les deux types de MCP le RT50 et RT35. Lorsque le HTF s'écoule, il absorbe la chaleur latente et sensible du PCM liquide, qui devient alors solide. Ce processus s'appelle décharge car la chaleur stockée est libérée. Le processus de décharge commence à $t = 600s$ et à $t = 1800s$ respectivement pour le RT50 et RT35. Dès que la solidification commence, le MCP se solidifie autour de la paroi des deux tube intérieur et extérieur cela engendre un gradient de température important à l'proximité de la zone interne donnant naissance à deux fronts de solidification et le transfert de chaleur le mécanisme a changé de convection / conduction. Au cours de cette étape, l'unité de stockage libère de l'énergie thermique sous forme de chaleur sensible et la température MCP reste inférieure au point de fusion. Au fil du temps, la phase solide du MCP s'élargit dans la direction axiale sous forme conique. À $t = 11000s$ et $38000s$ le MCP est totalement solidifié respectivement pour le RT50 et RT35.

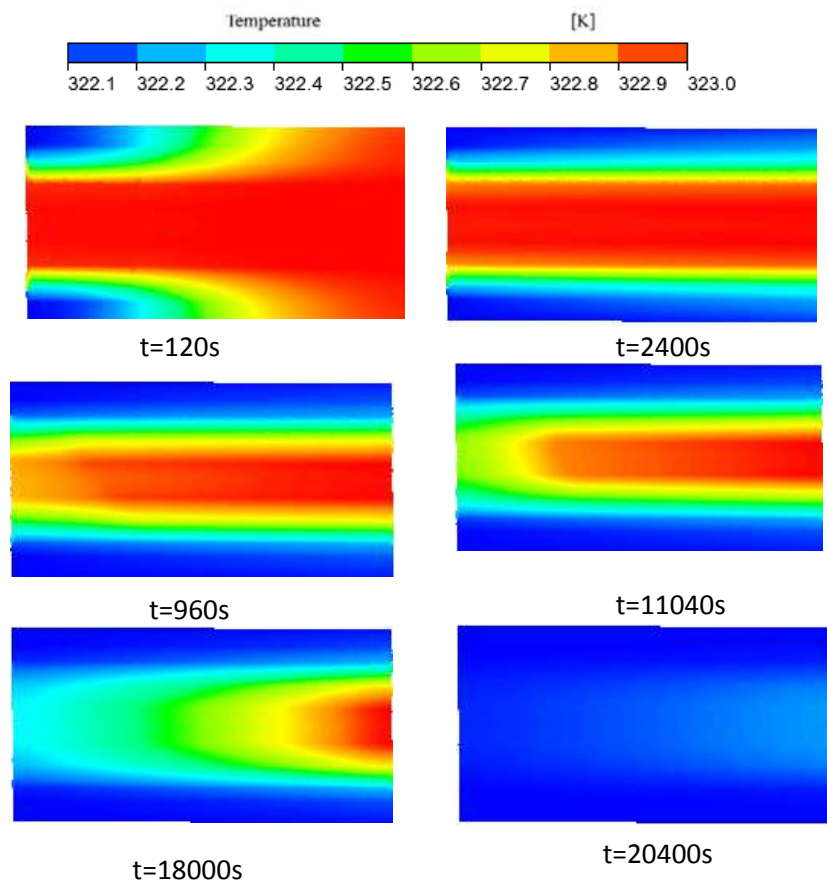


Figure 3.35 : Contours de la température pour $\dot{m}=0.024$ kg/s et $T=34^{\circ}C$ (RT35) (décharge)

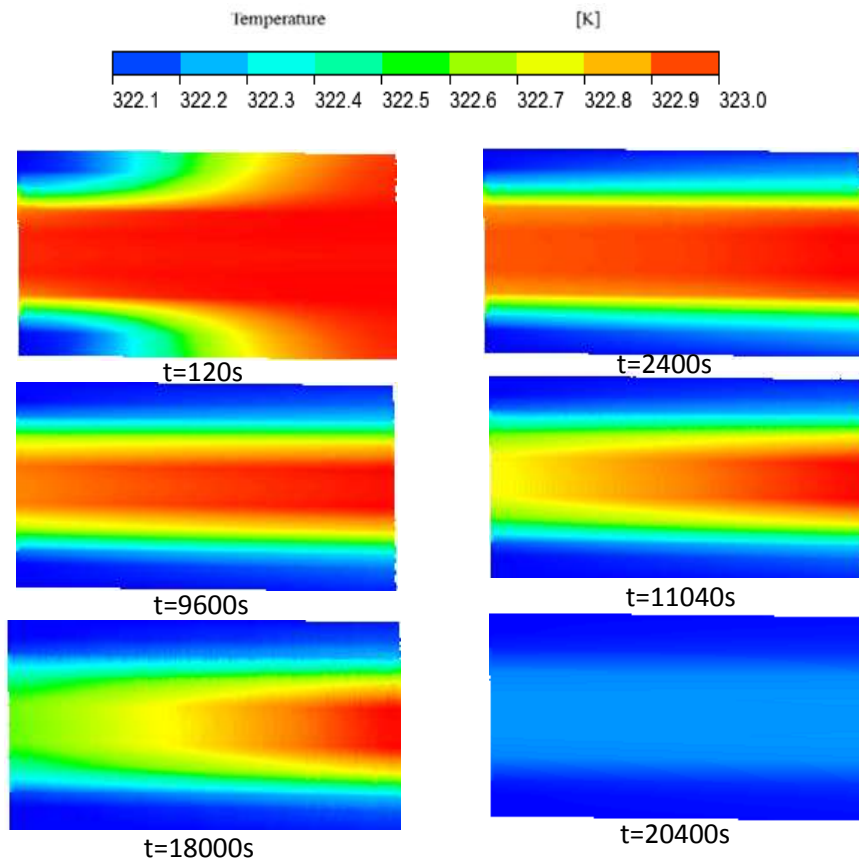


Figure 3.36: Contours de la température pour $\dot{m}=0.024$ Kg/s et $T_{in}=34^{\circ}\text{C}$ (RT50) (décharge)

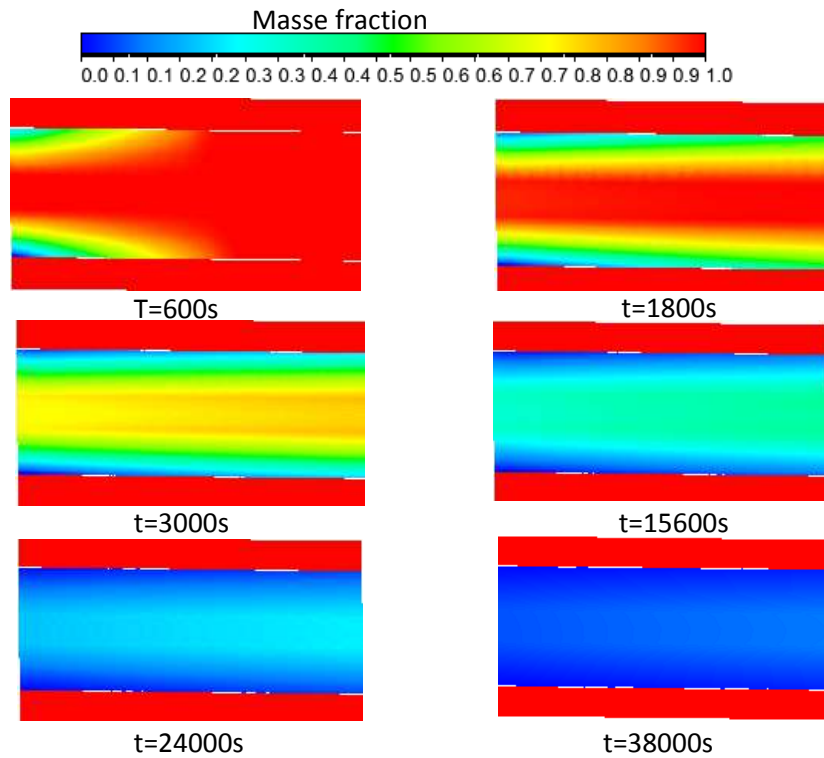


Figure 3.37: Contours de la fraction massique pour $\dot{m}=0.024$ kg/s et $T_{in}=34^{\circ}\text{C}$ (RT35) (décharge)

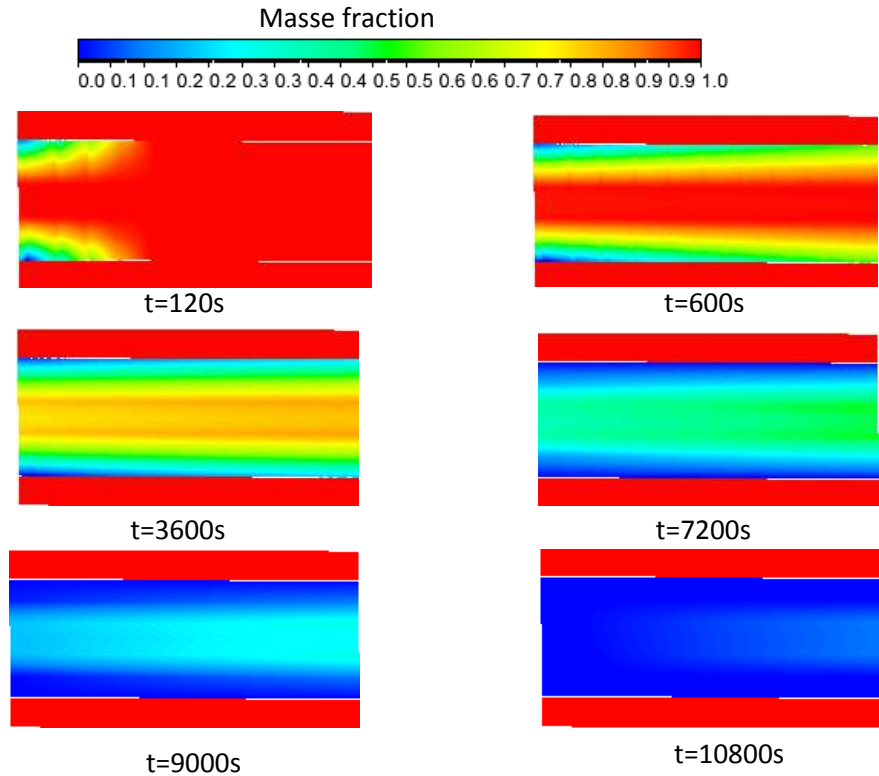


Figure 3.38: Contours de la fraction massique pour $\dot{m}=0.024$ kg/s et $T_{in}=34^{\circ}\text{C}$ (RT50) (décharge)

(b) Profil de la température et la fraction massique

La distribution de la température dans le domaine du MCP dans les positions (1,2 et 3) en fonction du temps sont présentés sur les Figures (3.39), (3.40), (3.41) et (3.42) pour différentes positions axiales pour une même position radiale. Tous les profils présentent la même allure. Au début de la période de solidification, la température du MCP a diminué rapidement presque linéairement avec le temps en transférant la chaleur sensible stockée au fluide (HTF). Ceci est principalement dû au fait que le transfert de chaleur à l'intérieur du MCP qui est à l'état liquide, se fait par convection naturelle et l'écart de température entre MCP et les tubes intérieur et extérieur et l'eau est important .

Le processus de solidification commence et se poursuit jusqu'à la période contrôlée de changement de phase. Ensuite, une couche de MCP adjacente au tubes de commence à geler et à évacuer sa chaleur latente. Le MCP libère sa chaleur sensible très rapidement et il faut donc plus de temps pour transférer la chaleur latente pendant le changement de phase. Puisque la paraffine est essentiellement à l'état liquide, la majeure partie de la chaleur dissipée par le MCP est sa chaleur latente. Cependant, vers la dernière période de

solidification, la quantité de chaleur latente transférée au fluide caloporteur devient de plus en plus petite et la dissipation de chaleur du MCP est encore principalement la chaleur sensible du MCP solide.

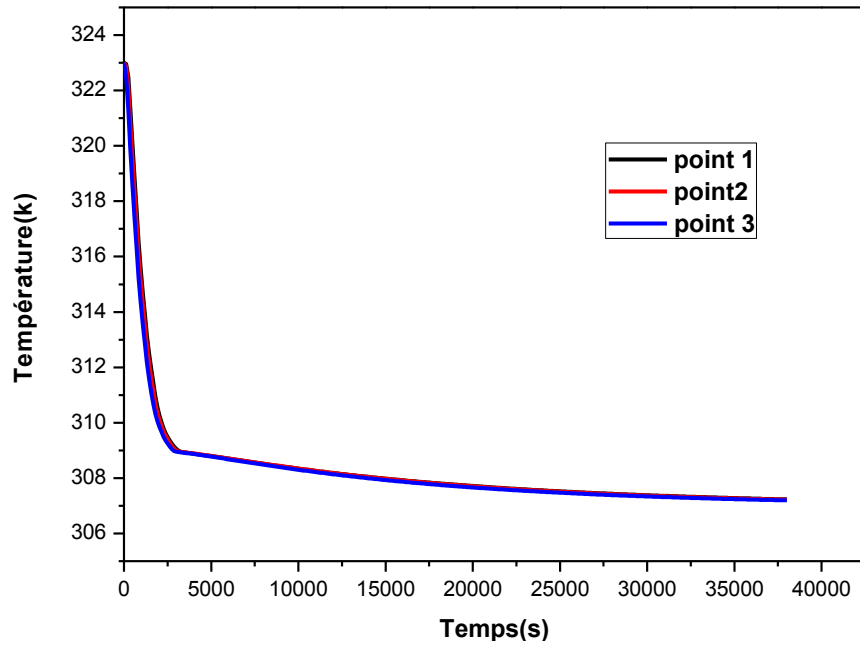


Figure 3.39: Variation de la température du MCP (RT35) en fonction du temps pour $T_{in}=34^{\circ}\text{C}$ et $\dot{m}=0.024$ kg/s (décharge)

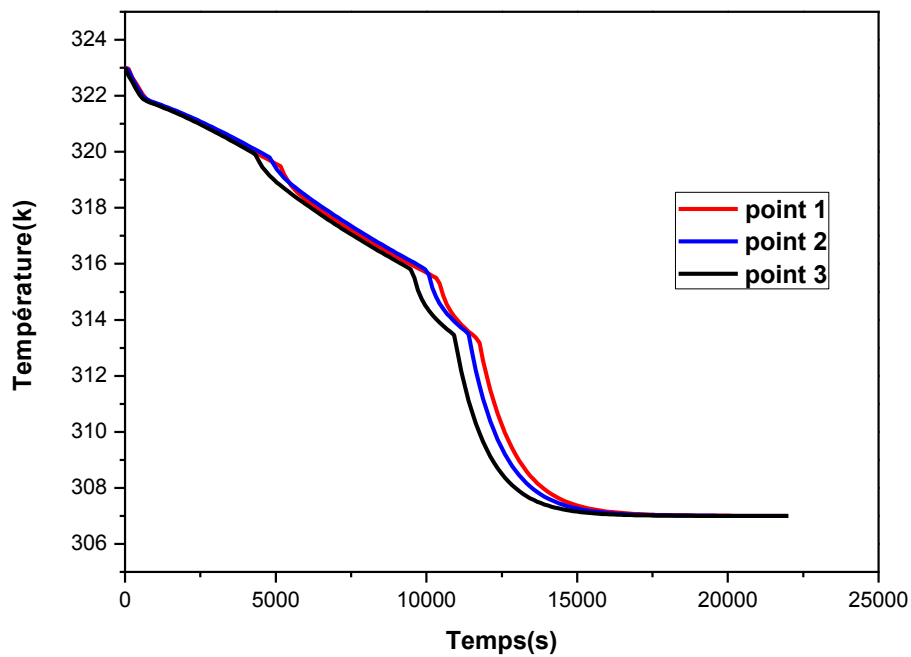


Figure 3.40: Variation de la température du MCP (RT50) en fonction du temps pour $T_{in}=34^{\circ}\text{C}$ et $\dot{m}=0.024$ kg/s (décharge)

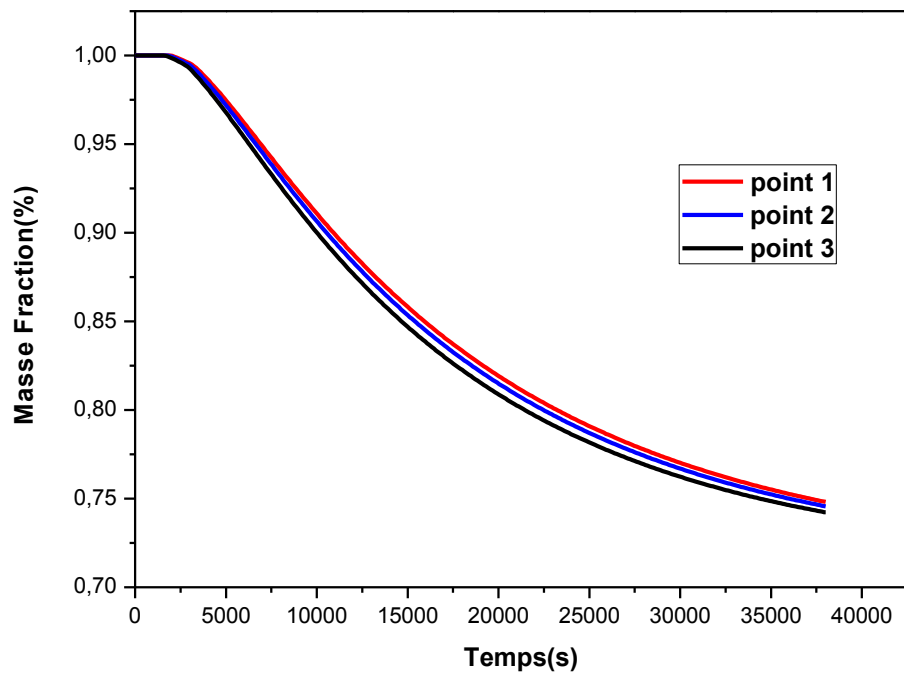


Figure 3.41 : Variation de la fraction massique du MCP (RT35) en fonction du temps pour $T_{in}=34^{\circ}\text{C}$ et $\dot{m}=0.024$ kg/s (décharge)

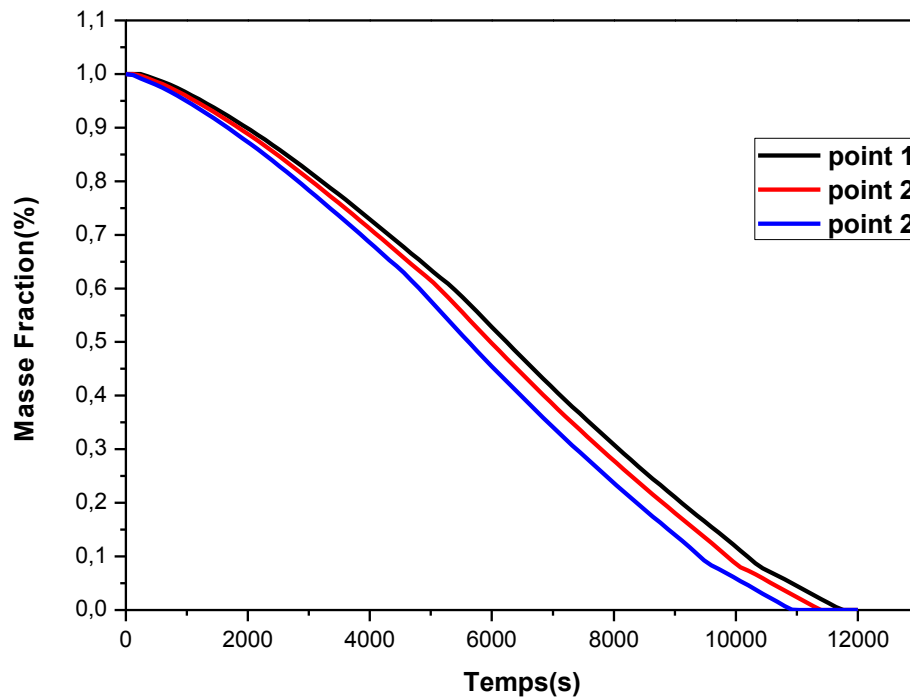


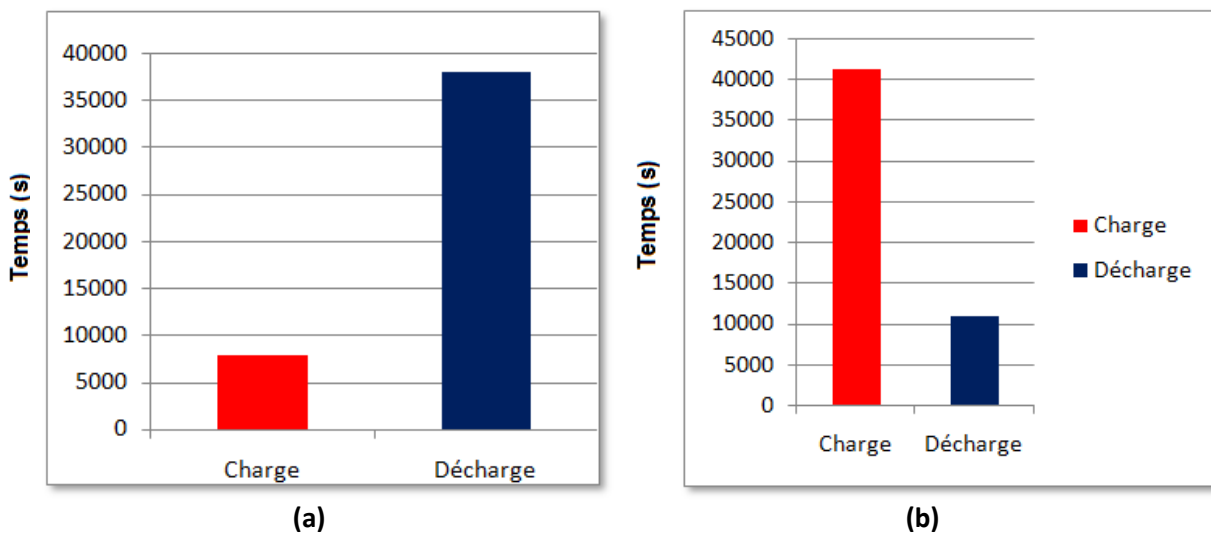
Figure 3.42 : Variation de la fraction massique du MCP (RT50) en fonction du temps pour $T_{in}=34^{\circ}\text{C}$ et $\dot{m}=0.024$ kg/s (décharge)

(c) Comparaison entre RT50 et RT35

Le tableau 3.11 montre le temps de la fusion et de la solidification pour les deux types de MCP. Selon la figure 3.44. On remarque que dans le cas de la fusion du RT50, le temps de fusion est plus long de 80.83% que celui de RT35, par contre dans le cas de la solidification, le temps de décharge de RT50 est moins long de 70.5% que celui de RT35.

Tableau 3.11 : Temps de la fusion et de la solidification pour les deux types de MCP

Type MCP	Processus	Temps (s)
RT50	Charge	41200
	Décharge	11000
RT35	Charge	7900
	Décharge	38000

**Figure 3.43: Comparaison entre les deux types de MCP: (a) pour RT35 et (b) pour RT50****d) Comparaison entre le stockage thermique à double et triple concentrique tube**

Dans cette section, on fait une comparaison entre l'efficacité des systèmes de stockages à double et triple tube concentrique pour la fusion de l'RT50. Le PCM est initialement en phase solide et sa température est égale à 25°C. Pour le système à triple concentrique tube les diamètres des tubes intérieur, intermédiaire et extérieur sont respectivement 3 cm, 9.5 cm et 12,5 cm. Pour le système à double concentrique tube, le diamètre du tube intérieur, le diamètre du tube extérieur sont respectivement de 5.4 cm, 14.64 cm. La longueur des

systèmes de stockages est de 1 m. La température d'entrée et le débit massique total de HTF sont respectivement 50°C et 0,024 kg/s [84].

(a) Fraction massique

L'évolution de la fraction liquide moyenne dans le domaine PCM est représentée sur la figure 3.44 pour les systèmes de stockages à double et triple tube concentrique pendant le processus de charge. Le comportement thermique de la fraction liquide peut être divisé en trois étapes distinctes. Dans la première étape, l'énergie thermique transférée au PCM par le fluide caloporteur est chargée dans le système de stockage sous forme de chaleur sensible. Pendant cette étape, le PCM est à l'état solide et la fraction liquide est égale à la valeur zéro. La durée de cette étape est d'environ 270 min et 330 min pour les systèmes de stockage à tube concentrique double et triple respectivement, qui représente un écart de 18.8.2%. Dans la deuxième étape, le PCM commence à fondre et la fraction liquide augmente de façon non linéaire avec l'augmentation du temps. Il est intéressant de noter que le taux de fusion le plus élevée est obtenue pour le système de stockage à double tube concentrique. Ce comportement est dû au fait que pour le système de stockage à tube concentrique triple, le débit massique de HTF est divisé entre les tubes intérieur et extérieur qui accélère le PCM au contact de la paroi d'échange thermique pour atteindre la température de fusion plus rapidement, tandis que pour le système à tube concentrique double, tout le débit massique circule dans le tube central. Dans la troisième étape, la fraction liquide continue d'augmenter jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur maximale 1 à la fin du processus de charge. Le temps total de fusion du système à double et triple concentrique tube et de 730min et 658min respectivement, qui représente un écart de 9.58%.

(b) Energie totale stockée

La variation en fonction du temps de la quantité d'énergie totale stockée dans les unités de stockages est représentée sur la figure 4.45 pour les systèmes de stockage à triple et double concentrique tube. La quantité d'énergie stockée augmente avec le temps jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur maximale à la fin du processus de charge. L'énergie stockée est plus élevée pour le système à triple tube concentrique. La quantité de d'énergie stockée à la fin du processus de charge est d'environ 210 kJ/kg et 240 kJ/kg pour les systèmes de stockage à double et triple tube concentrique, respectivement, qui représente un écart d'environ 12.5%.

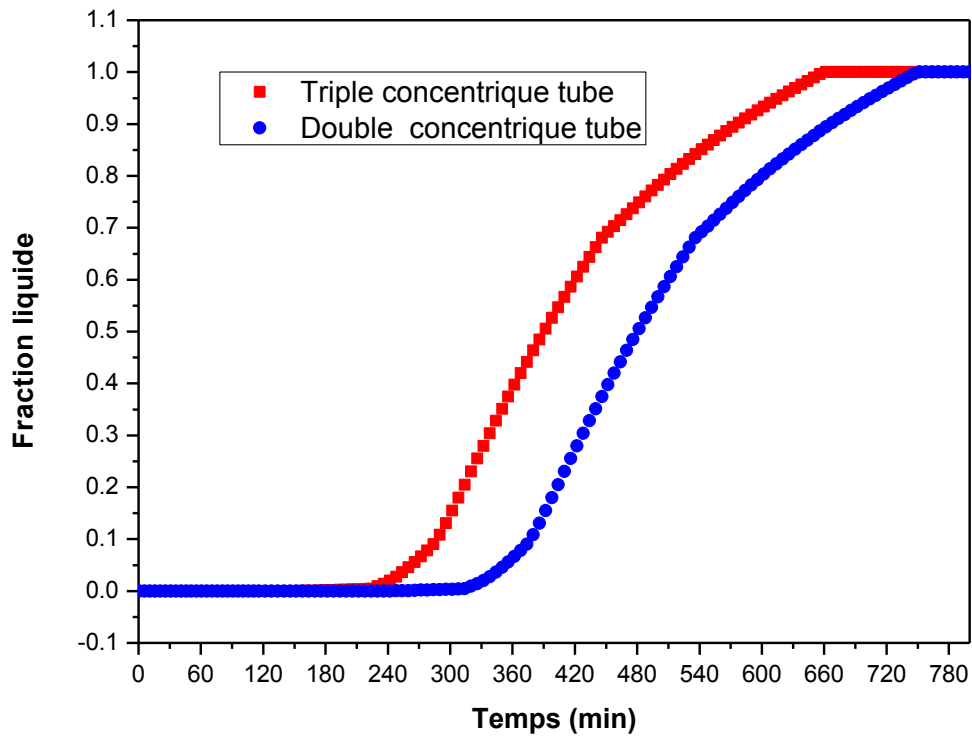


Figure 3.44 : Fraction liquide pour les systèmes à double et triple concentrique tube

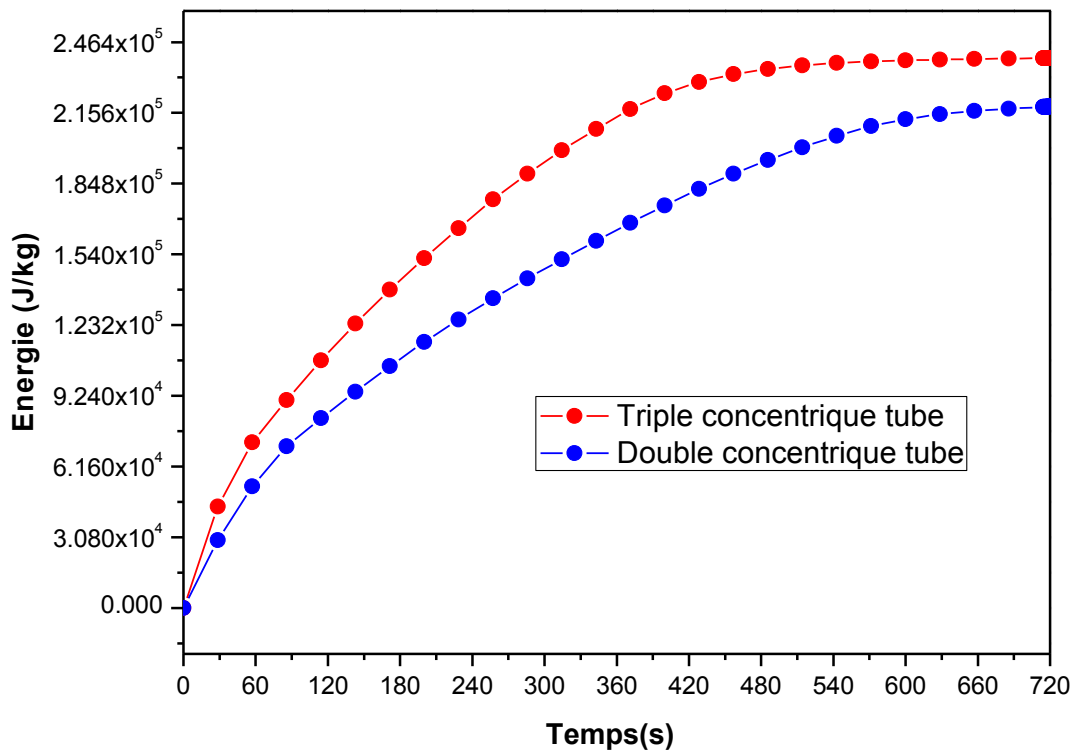


Figure 3.45 : Profil d'énergie totale stockée pour les systèmes de stockage à tube

Conclusion

Nous avons présenté dans cette section une étude numérique traitant le problème de stockage de l'énergie thermique par chaleur latente en utilisant les matériaux à changement de phase (PCM) dans une unité de stockage formé de trois tubes concentriques dont le MCP est inséré dans l'espace annulaire et le fluide caloporteur circulant dans les tubes centrale et extérieur. Dans ce système, on a utilisé les paraffines (RT35 et RT50) comme MCP ayant des points de fusion de 35°C et 49°C respectivement, le fluide caloporteur est l'eau. La méthode des volumes finis est utilisée pour résoudre les équations qui régissent le transfert de chaleur pendant le processus de changement de phase solide-liquide, en utilisant le logiciel CFD, ANSYS FLUENT 17.1.

On a étudié les performances d'une unité de stockage thermique par chaleur latente LHS (Latent Heat Storage), sous l'effet des paramètres de fonctionnement tel que: la température et le débit du fluide caloporteur sur le temps du processus de la fusion/solidification, le taux de stockage thermique et la fraction de fusion / solidification du MCP.

- D'après les résultats obtenus on a conclu que pour une différence de température élevée entre la température d'entrée du fluide caloporteur (HTF) et le point de fusion des MCP, plus le taux de transfert de chaleur est élevé et le processus de charge (fusion) est rapidement atteint.
- La capacité de stockage de chaleur est plus grande lorsque la différence de température entre la température d'entrée HTF et le point de fusion du PCM est importante.
- Pour une température d'entrée HTF donnée, On remarque que dans le cas de la fusion de RT50, le temps de fusion est plus long de 80.83% que celui de RT35. Contrairement dans le cas de la solidification, le temps de décharge de RT50 est moins long de 70.5% que celui de RT35.
- Les performances thermiques de l'unité de stockage à triples concentriques tubes étudiées ont été comparées à celles correspondant à l'unité de stockage à doubles concentriques tubes.
- L'énergie thermique stockée par le système à triple concentrique tube est beaucoup plus élevée par rapport à l'unité de stockage à double concentrique tube d'environ 12.5%.

Chapitre 4

*Étude expérimentale et numérique d'un
capteur solaire utilisant les matériaux
à changement de phase*

4.1. Introduction :

Depuis plusieurs années, l'amélioration des capteurs solaires s'est traduite par l'augmentation des performances et de la fiabilité. Cette amélioration n'a été rendue possible que par les progrès importants qu'ont connus les différents composants des capteurs solaires et l'introduction sur des unités importantes de systèmes de régulation et de contrôle performants [84]. Les nouvelles techniques de stockage et d'utilisation des MCP sont nécessaires pour la récupération des différentes énergies alternatives (récupération de l'énergie des installations industrielles géantes, stockage d'énergie électrique pour le chauffage pendant les heures de pointe, etc.). Nous sommes intéressés au stockage thermique par chaleur latente dans le but d'améliorer le rendement thermique des capteurs solaires utilisés pour le chauffage de l'eau sanitaire. Le travail effectué comprend une étude numérique des problèmes de la fusion et de la solidification des matériaux à changement de phase (MCP), complétée par une application expérimentale qui consiste à la réalisation d'un capteur solaire stockeur.

Ce modèle perfectionné concerne un capteur solaire cylindro-parabolique avec un absorbeur concentrique dans lequel un matériau à changement de Phase (PCM: Phase Change Materials) est inséré entre les deux tubes concentriques. Le PCM absorbe le rayonnement solaire direct intercepté par le capteur cylindro-parabolique pendant les périodes de pic d'ensoleillement et fournit un flux de chaleur stationnaire au fluide caloporteur pour éviter les fluctuations dues aux changements climatiques ou à un passage des nuages. Le surplus de l'énergie solaire absorbée par le PCM peut être transmis au fluide caloporteur pendant l'abaissement de l'intensité du rayonnement solaire. La chaleur transmise au fluide caloporteur peut être utilisée pour la génération de la vapeur (production de l'électricité), la distillation des eaux saumâtres, le chauffage, la climatisation, la réfrigération des locaux, etc.

4.2. Objectif

L'objectif principal de ce projet de recherche est de contribuer à l'étude des phénomènes de transfert de chaleur lors du stockage de l'énergie solaire dans les matériaux à changement de phases (MCP) et d'étudier la possibilité d'application de cette nouvelle technique au concentrateur cylindro parabolique. Dans cette étude on a réalisé deux types de capteurs solaires cylindro-paraboliques afin de valider l'efficacité de l'utilisation du PCM dans le tube absorbeur pour la production directe de la vapeur surchauffée, de l'eau distillée, etc. Le modèle proposé consiste en un PCM inséré entre deux tubes métalliques concentriques, qui composent le tube récepteur du PTC développé figure 4.1.

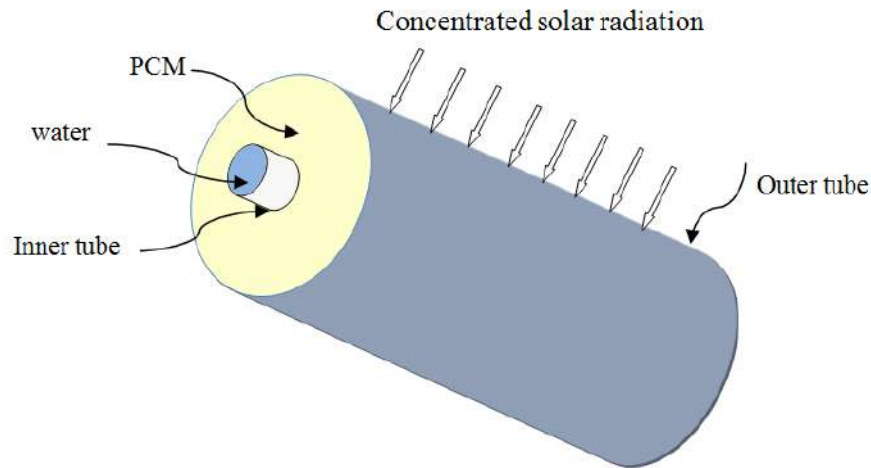


Figure 4.1: Modèle du capteur solaire cylindro parabolique proposé

4.3. Prototypage du concentrateur cylindro-parabolique (PTC)

On va présenter les différentes étapes afin de réaliser un concentrateur solaire cylindro-parabolique d'une longueur de 1.80m et d'une ouverture de 1m. Le capteur solaire cylindro-parabolique est principalement composé d'une surface réfléchissante, du tube récepteur (absorbeur) et d'une structure de support. Les performances adéquates du nouveau PTC utilisant un PCM sandwiché dans l'espace annulaire du tube absorbeur seront vérifiées et comparées aux résultats de simulation. Les dimensions géométriques et les propriétés optiques du système PTC sont définies dans le tableau 4.1. Un prototype PTC à petite échelle a été conçu et construit à l'Université de Batna 2, Algérie (Latitude 35°33'21 "Nord et Longitude 6°10'6" Est).

Tableau 4.1 : Données géométriques du capteur cylindro-parabolique

Angle d'ouverture	$\varphi=90^\circ$
Diamètre d'ouverture	D=1m
Longueur du collecteur	L=1.80m

4.3.1. Dimensionnement de la courbe

a) Calcul de la distance focale et la hauteur

Avant d'entamer la phase de réalisation nous avons procédé au dimensionnement du concentrateur solaire, dans le but de déterminer les différents paramètres géométriques du concentrateur. Un arc parabolique a été tracé à l'aide du logiciel Parabola Calculator 2.0, comme il est présenté dans la figure 4.2. Dans cette conception, la largeur du réflecteur est

égale à $W_a = 1m$, l'angle d'ouverture est égal $\varphi = 90^\circ$ et la longueur de l'arc est égale à $S = 1,15m$.

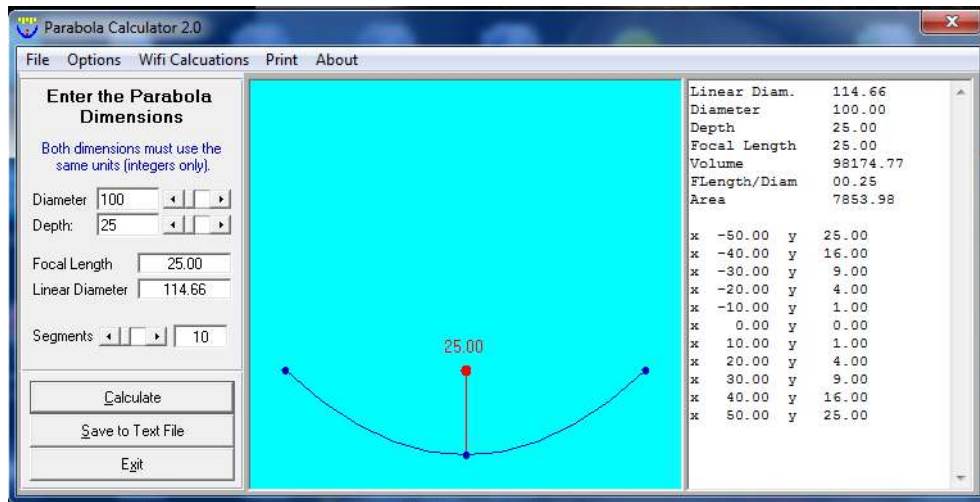


Figure 4.2: Interface du logiciel Parabola calculator

Pour pouvoir choisir un réflecteur cylindro-parabolique. On aura toujours intérêt à adopter la géométrie idéale pour obtenir une bonne concentration géométrique, voir Figure 4.2. Un réflecteur de bonne qualité peut réfléchir 97% du rayonnement solaire incident. Le réflecteur est conçu avec l'équation parabolique simple Kalogirou [85]. L'équation générale du réflecteur en coordonnées cartésiennes s'écrit :

$$x^2 = 4f y \tag{4.1}$$

Où : f distance focale du collecteur, comme le montre la figure 4.3.

b) Calcul de la hauteur h

$$f = \frac{W_a^2}{16h} \tag{4.2}$$

Avec : W_a : diamètre d'ouverture

h : profondeur (hauteur)

On a choisi l'angle d'ouverture $\varphi = 90^\circ$ et le diamètre de l'ouverture $W_a = 1m$.

c) Calcul de la distance focale :

$$W_a = 4f \Rightarrow f = \frac{W_a}{4} = 0.25m$$

d) Calcul de la hauteur h :
$$h = \frac{W_a^2}{16f} = \frac{1}{4} = 0.25m$$

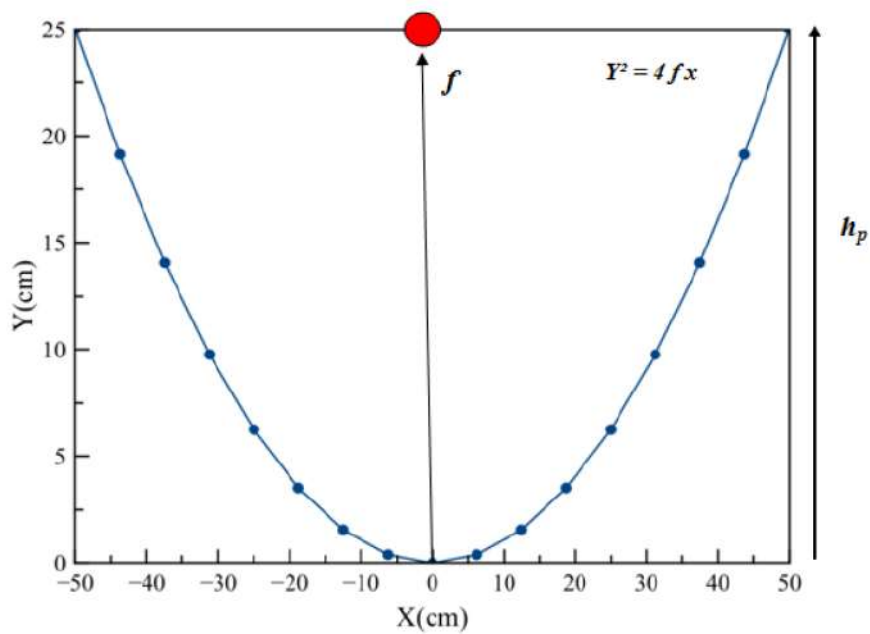
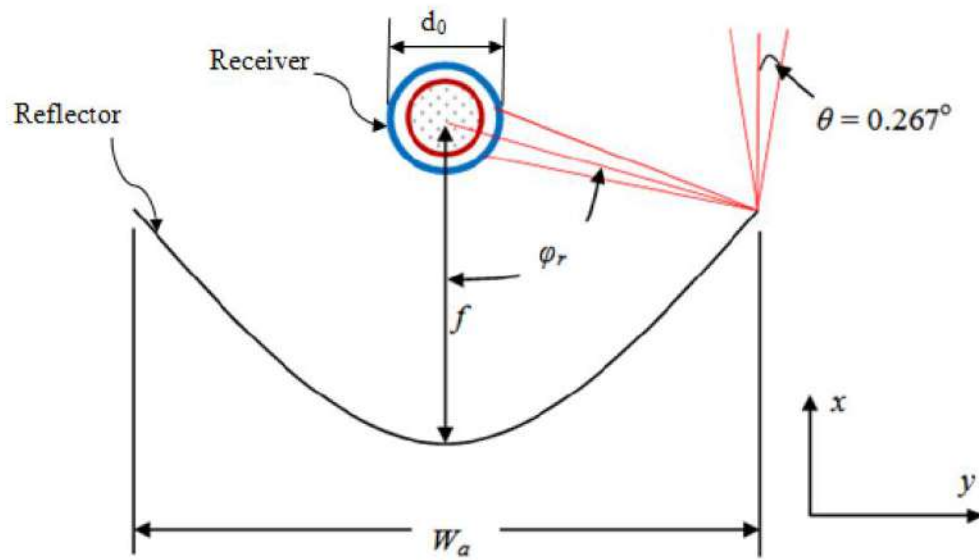


Figure 4.3: Géométrie du concentrateur cylindro-parabolique
 (a) schéma avec paramètres principaux (b) conception graphique

4.4. Etapes de réalisation du prototype CCP

4.4.1. Réalisation du réflecteur

Les dimensions caractéristiques du concentrateur solaire sont donnés sur le tableau 4.2. Le réflecteur solaire représente l'élément essentiel du concentrateur. Pour réaliser le réflecteur on utilise deux tôles en acier galvanisé pour éviter la corrosion (1.15m x 0.9m). Par conséquent, un dispositif de roulement spécial a été utilisé pour rouler et courbé les deux tôles en acier pour leurs donner la forme cylindro-parabolique figure 4.4.b.

Tableau 4.2: Caractéristiques géométriques du réflecteur

Caractéristiques géométriques du réflecteur	Valeur
Longueur de la tôle	$L=1.8\text{m}$
Largeur de la tôle	$l=1.15\text{m}$
L'ouverture	$W_a=1\text{m}$
Position du foyer	$f=0.25\text{m}$

4.4.2. Structure de support

Une structure de support est nécessaire pour maintenir et supporter l'ensemble absorbeur/réflecteur aux positions correctes. Il doit être mobile dans un axe horizontal afin que le concentrateur puisse suivre le soleil tout au long de la journée en direction est-ouest. Le cadre de structure supporte la surface réfléchissante parabolique. Il est généralement composé de poutres et de tiges en acier, ce qui donne et maintient la forme parabolique de la surface du réflecteur. Dans la conception actuelle, il est composé de cinq nervures en acier. La section transversale est renforcée à l'aide d'entretoises verticales et de cadres d'extrémité, fournissant les points d'appui pour le réflecteur. Le réflecteur est installé sur le support rigide par un axe qui permet de le tourner sur son axe horizontal. La structure est conçue pour assurer un suivi manuel facile, malgré le poids la structure qui est environ 30kg/m^2 , figure 4.4.a.



(a)



(b)

Figure 4.4: (a) : Structure de support (b) : Conception du réflecteur

La plaque d'acier est recouverte d'un film réfléchissant, dont le nom commercial réel est S-reflecT qui est fabriqué pour des applications solaires [86]. Ce type de film réfléchissant enroulable peut être appliqué sur les matériaux lisses non poreux. Il est composé d'un film de polyester optique, sur lequel une couche d'aluminium est vaporisée sous vide avec une réflectivité de 91% comme présenté dans le tableau 4.3. Cette solution de réflecteur a été adoptée car elle offre un avantage économique considérable par rapport aux miroirs en verre:

- Souple et modulable,
- Facilement découpable,
- Haute réflectivité ($\epsilon > 90\%$),
- Très léger et souple,
- Ne froisse pas,
- Résiste aux conditions extérieures.
- Il peut être utilisé dans différents domaines, industrie, four solaire, maison, etc.

Le miroir **S-ReflecT** est constitué d'un polymère recouvert d'une fine couche d'aluminium qui lui confère l'effet miroir. Il est ensuite protégé des radiations solaires (UV) et de l'humidité par un vernis spécifique. Il est le matériau idéal pour construire son barbecue ou son four solaire ou tout type de projet utilisant le principe de la concentration solaire (CSP Concentrated Solar Power), soit à plat, soit parabolique, soit cylindrique, voir figures 4.5 et Tableaux 4.3, 4.4 et 4.5.



(a)



(b)

Figure 4.5: (a) Miroir S-ReflecT, (b) Différentes couches qui composent le miroir [86]

Tableau 4.3: Efficacité du miroir utilisé [86]

	Normale/Hémisphérique	Normale/Diffuse	Normale/Directe
Réflexion lumineuse	91.28%	1.09%	90.19%
Réflexion énergétique	91.93%	1.09%	90.84%

Tableau 4.4: Caractéristiques physiques du matériau du miroir utilisé

Résistance à la rupture	Allongement à la rupture	Module élastique	Retrait après 30min à 150°C	Température de fusion
21 daN/mm ²	130%	400 daN/mm ²	1.6%	250°C

Tableau 4.5: Caractéristique optique du miroir [86]

Métal	Densité optique	Couche d'aluminium	Couche de vernis
Aluminium	2.0±0.2/face	0.08 g/m ² /face	1.5±0.3g/m ³

La durée de vie du S-Reflect est garantie pour une utilisation de 3 ans tout en conservant de fortes réflexions.



Figure 4.6: Capteur solaire cylindro-parabolique avec le miroir S-Reflect

4.4.3. Conception du tube absorbeur

La partie principale du récepteur solaire. Dans le but de prouver l'efficacité du nouveau model présenté dans ce travail en utilisant un matériau de changement de phase (PCM), deux absorbeurs ont été réalisés.

1. Absorbeur simple: Il est constitué d'un tube métallique (cuivre) recouvert d'une peinture noire pour améliorer l'absorption du rayonnement solaire. Le tube est enveloppé par un tube en pyrex pour réduire les pertes de chaleur par convection. Le rayonnement solaire absorbé fournit de l'énergie thermique au fluide déplaçant à l'intérieur du tube métallique.

2. Absorbeur avec PCM (tubes concentrique) : Le deuxième récepteur se compose d'une enveloppe en verre et de deux tubes métalliques concentriques en cuivre. Le PCM est rempli dans l'espace annulaire. En général, une dimension optimale d'un absorbeur produit un maximum d'énergie utile, ceci est obtenu par la réduction des pertes optiques et thermiques. Pour une grande dimension de l'absorbeur, il en résulte des pertes thermiques importantes et de faibles pertes optiques. Le tube extérieur de l'absorbeur doit avoir un diamètre suffisant pour avoir un facteur d'interception élevé du rayonnement solaire, il doit avoir une valeur optimale. Le diamètre extérieur minimal du tube récepteur doit intercepter tout le rayonnement solaire direct réfléchi est calculé par l'équation suivante [87]:

$$d_o = \frac{W_a \sin 0.267}{\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos(0.267)} \quad (4.3)$$

Il est nécessaire de bien optimiser la taille de l'absorbeur pour bien obtenir un coefficient d'interception acceptable au environ de 90 % afin d'intercepter le maximum d'énergie incidente. De même, la taille de l'absorbeur doit être légèrement surdimensionnée afin de compenser les différentes erreurs. Et qu'il soit parallèle à l'axe longitudinal, si le parallélisme existe, alors n'importe quel faible déplacement latéral considéré doit être compensé par le système de poursuite afin d'obtenir un rendement plus élevé



(a)



(b)

Figure 4.7: (a) Récepteur à tube concentrique, (b) Récepteur a simple tube

Le facteur de concentration (concentration géométrique) est calculé à travers l'équation si dessous :

$$C = \frac{A_a}{A_r} = \frac{2.07}{0.158} = 13.1 \quad (4.4)$$

Tableau 4.6: Paramètres Géométriques du collecteur et du tube absorbeur

Tube absorbeur [85]	
Matériau du tube absorbeur	Cuivre
Diamètre extérieur du tube avec PCM	0.027m
Diamètre intérieur du tube avec PCM	0.028m
Diamètre extérieur du tube intérieur	0.016m
Diamètre intérieur du tube intérieur	0.014m
Diamètre intérieur du tube en Pyrex	0.048 m
Diamètre extérieur du tube en Pyrex	0.050 m
Absorbance du revêtement	0.94
Emissivité du revêtement	0.9

Collecteur	
Distance focal	0.25m
Ouverture du collecteur	1.0m
Angle d'ouverture	90°
longueur	1.80m
Réflectivité du miroir	91%
Facteur de Concentration	13.1

4.4.4. Choix du MCP

L'exploitation rationnelle de l'énergie solaire nécessite le stockage d'une partie de la chaleur produite aux heures d'ensoleillement pour pouvoir la restituer aux heures de consommation, ou tout au moins pour assurer la continuité du fonctionnement pendant les passages nuageux. Les sels fondus en particulier apparaissent comme les meilleurs fluides de stockage thermique. En effet, ils permettent un stockage d'une grande densité pour un faible coût. Le choix du matériau de changement de phase est l'étape la plus préliminaire et la plus fondamentale dans la conception d'un système de stockage d'énergie thermique. La sélection est le plus souvent basée sur le domaine d'application. Comme notre objectif était de sélectionner un matériau pour une application de gamme de température moyenne à élever, il était nécessaire d'en avoir un avec moins de poids et d'espace. De plus, un matériau est choisi, qui servira une plage de température fixe et pour notre cas, il se situe autour de 222°C. Parmi les sels inorganiques, le sel solaire fondu de 60% NaNO₃ et 40% KNO₃ a été sélectionné en raison de son point de fusion qui correspond étroitement à notre température d'application. De plus parmi les sels inorganiques, il semble être prometteur en termes de disponibilité, de coût et de conductivité thermique plus élevée et de densité énergétique plus élevées qui nous permettra de concevoir des conteneurs PCM moins spacieux et moins lourds [88].

Tableau 4.7: Propriétés du matériau à changement de phase sélectionné [88]

hydrates de sels (60% NaNO ₃ + 40% NO ₃)	Valeurs
Température de fusion, °C	217
Chaleur latente de fusion, kJ	105
Masse volumique kg/m ³	2180
Capacité calorifique, kJ/kg.K	1.49
Conductivité thermique, W/m	0.8
Masse du PCM, kg	1.65

4.4.5. Acquisition de données et instruments de mesures

La température constitue une information importante dans plusieurs processus industriels et de laboratoire. Elle intervient comme une grandeur principale dont la valeur doit être connue avec précision ou comme paramètre influant sur la qualité d'autres mesures. Dans notre étude, nous devons surveiller à toute instant la variation des températures du PCM inséré entre les deux tubes concentriques qui peuvent atteindre des valeurs très élevées d'environ (200°C-240°C). On a recours à l'utilisation d'un équipement pour visualiser ou surveiller la variation des températures afin de suivre l'évolution du front de la fusion/solidification du MCP dans le but d'approuver l'efficacité d'un PCT équipé d'un PCM.

Les enregistreurs de données autonomes commerciaux sont coûteux et sont pour la plupart inflexibles pour s'adapter aux projets de recherche académique. Comme alternative, les données peuvent être acquises à l'aide d'un microcontrôleur Arduino à faible coût. Les possibilités offertes par l'utilisation de ce système à base de microprocesseur ont permis de traiter les signaux issus des capteurs numériquement (linéarisation et conversion). Ceci a conduit à des appareils précis et bon marché. Les systèmes à base de microcontrôleurs constituent la solution la plus attractive.

a) Acquisition de la température par Arduino

Dans notre travail un développement a été mise en place d'un système d'acquisition de température à 6 port utilisant le capteur de température MAX6675 et le microcontrôleur Arduino Mega 2560, figure 4.8. Arduino est un circuit imprimé en matériel libre (dont les plans sont publiés en licence libre) sur lequel se trouve un microcontrôleur qui peut être programmé pour analyser et produire des signaux électriques, de manière à effectuer des tâches très diverses comme la domotique (le contrôle des appareils domotiques - éclairage, chauffage...), le pilotage d'un robot, etc. C'est une plateforme basée sur une interface entrée/sortie simple. Il était destiné à l'origine principalement mais pas exclusivement à la programmation multimédia interactive en vue de spectacle ou d'animations artistiques [89]. La carte Arduino Mega 2560 comporte un microcontrôleur basé sur le microprocesseur ATmega2560 qui est le cerveau de la carte Arduino Mega.

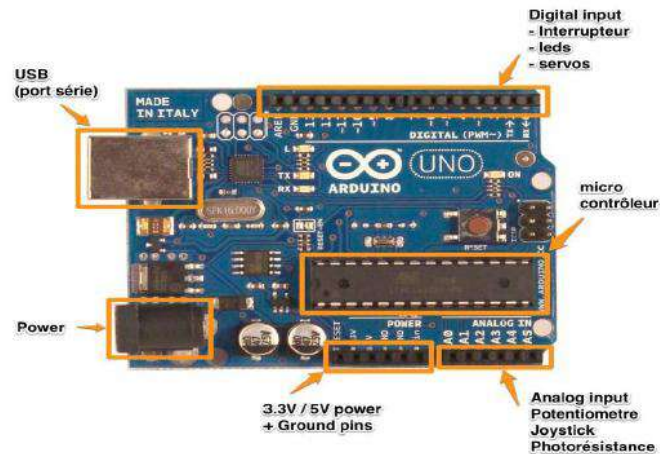


Figure 4.8: Architecture d'une carte Arduino [89]

b) Spécifications techniques:

- Microcontrôleur : ATmega2560
- Tension de fonctionnement : 5V
- Gamme de tension d'entrée (recommandée) : 7-12 V (limite) : 6-20V
- Broches digitaux I/O : 54 / PWM : 14 / entrées analogiques : 16
- Courant direct par broche I/O: 40 mA / broches 3,3V: 50mA
- Mémoires flash : 256 KB
- Mémoires Flash du Bootloader : 8 KB
- SRAM: 8 KB
- EEPROM: 4 KB
- Fréquence d'horloge de l'oscillateur à quartz: 16 MHz
- Dimensions: 101,52 x 53,3 mm²
- Poids : 37 g

c) Logiciel d'acquisition

Le logiciel de programmation des modules Arduino est une application Java, libre et multiplateformes, servant d'éditeur de code et de compilateur, et qui peut transférer le firmware et le programme au travers de la liaison série (RS-232, Bluetooth ou USB selon le module). Il est également possible de se passer de l'interface Arduino, et de compiler les programmes via l'interface en ligne de commande. Le langage de programmation utilisé est le C++, compilé avec `avr-g++3`, et lié à la bibliothèque de développement Arduino, permettant l'utilisation de la carte et de ses entrées/sorties. La mise en place de ce langage standard rend aisé le développement de programmes sur les plates-formes Arduino, à toute personne maîtrisant le C ou le C++ [90], voir la figure 4.9.



Figure 4.9: Structure d'un programme Arduino [90]

d) Principe de fonctionnement MAX6675

Les convertisseurs thermocouple-numérique compensés à jonction froide nommés MAX3185 effectuent une compensation de soudure froide et numérisent le signal d'un thermocouple de type K, J, N, T, S, R ou E [91]. Les données sont générées dans un format signé 14 bits, compatible SPI, en lecture seule. Les convertisseurs MAX6675 résolvent les températures jusqu'à 0,25°C, permettent des lectures aussi élevées que +1800°C et aussi basses que -270°C, et présentent une précision de thermocouple de $\pm 2^\circ\text{C}$ pour des températures allant de -200°C à +700°C pour les thermocouples de type K figure 4.10.



Figure 4.10: Kit thermocouple et capteur de Température MAX6675, [91]

Le MAX6675 suppose une relation linéaire entre la température et la tension. Tous les thermocouples ont un certain niveau de non-linéarité. Un modèle linéaire de la tension du thermocouple fonctionne raisonnablement bien pour une variation de la température entre zéro à quelques centaines de degrés mais elle est de plus en plus imprécise pour les valeurs négatives ou élevées.

e) Caractéristiques du kit thermocouple + MAX6675

- Mesure de température jusqu' à 1024°C.
- Résolution 0.25°C.
- Compensation de jonction de température froide.
- Alimentation 3.0-5V DC.

Pour concevoir un système de contrôle et une intégration mécatronique, la disposition du système d'acquisition de température est proposée ci-dessous. La figure 4.11, montre la conception du système de contrôle et divers composants interfacés les uns avec les autres.

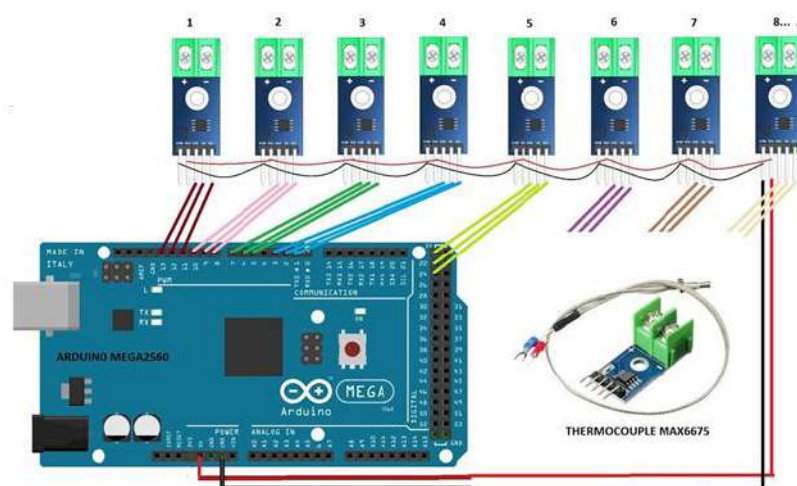


Figure 4.11: Schéma de conception du système de contrôle [91]

f) Visualisation des mesures

Le logiciel Arduino ne contient pas une suite d'outils pour l'ajustement et l'analyse des données. Les données sont généralement collectées d'abord, puis importées manuellement dans un programme d'analyse. Il existe cependant un moyen qui permet aux données collectées par l'Arduino d'être importées en temps réel dans un package d'analyse de données. Ils peuvent être des compléments pour Excel, MATLAB ou LabVIEW qui importent des données directement depuis l'Arduino et permettent un traçage et une analyse en temps réel [92].

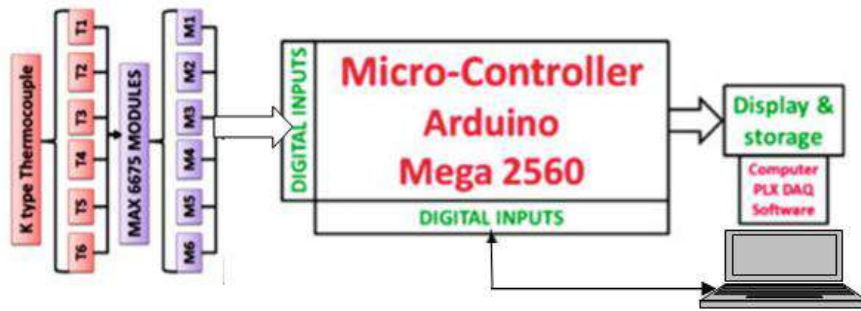


Figure 4.12: Schéma de montage du système de visualisation [92]

La carte Arduino devrait d'abord être programmée avec le logiciel Arduino illustré sur la figure 4.12. Le code ensuite est télé-versé vers la carte via le port USB. La visualisation de températures captées par les thermocouples (type K) liés au capteur de température, peut facilement être effectuée via Microsoft Excel en utilisant le logiciel Parallax Data Acquisition Tool (PLX-DAQ), gratuit pour Microsoft Excel afin d'interfacer l'Arduino à l'Excel figure 4.12. Une fois le code Arduino téléchargé sur la carte Arduino, nous cliquons sur l'icône de feuille de calcul PLX-DAQ. Après avoir choisi le port auquel l'Arduino est connecté, nous nous connectons. Cela, nous permettra d'obtenir la variation des températures en fonction du temps selon le pas de temps imposé dans le code arduino, ainsi que le graphe d'évolutions des températures en temps réel, comme indiqué dans la figure 4.13.

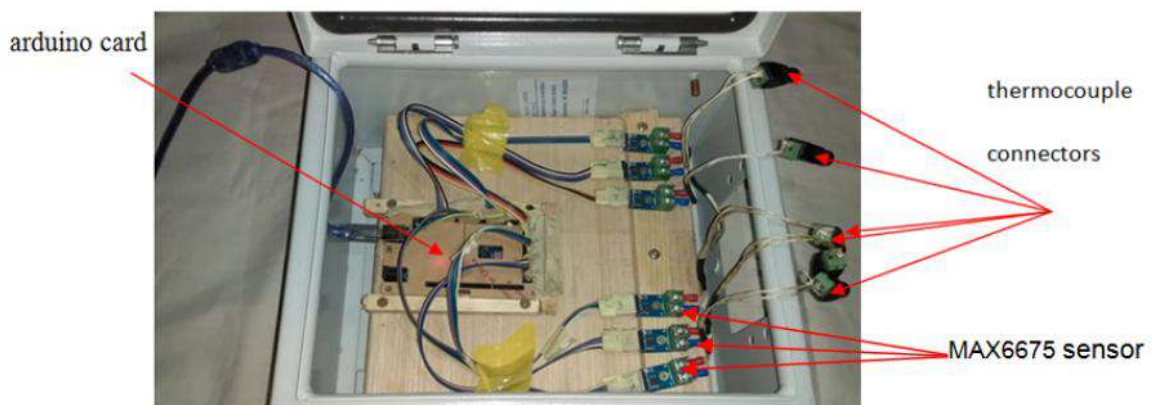


Figure 4.13: Carte d'acquisition développée

4.5. Déroulement de l'expérience

4.5.1. Réglage du système

Le concentrateur cylindro-parabolique est orienté vers l'Est dès le lever du soleil, on oriente le concentrateur vers le soleil selon la direction (Est-Ouest). Les rayons du soleil seront réfléchis vers le foyer du concentrateur qui forment une tâche (ligne) solaire qui devrait

apparaître sur l'absorbeur, voir Figure 4.14. La taille de la tache solaire obtenue d'après le dimensionnement du réflecteur W peut être calculée à partir de la formule [93]:

$$W = \frac{2r_r \sin 0.267}{\cos(\theta/2 + 0.267)} = \frac{a \sin 0.267}{\sin(\theta/2) \cos(\theta/2 + 0.267)} = 0.0066m \quad (4.5)$$



Figure 4.14: Tache solaire

On utilise le concentrateur solaire avec simple et concentrique tube absorbeur avec PCM respectivement pour deux journées typiques claires 21 Juin et le 21 Octobre. Le débit du fluide caloporteur (eau) a été testé et fixé à une valeur de 0.005 kg/s durant toute l'expérience de 10h00 à 16h00 pour les deux journées typiques. On prend les mesures chaque 5 minutes pour voir la variation des paramètres, que ce soit la température ambiante, la température d'entrée T_{in} , la température de sortie T_{out} de l'eau du tube absorbeur et la température dans la couche PCM pour trois positions axiales voir figure 4.15. Le dispositif expérimental est montré sur la figure 4.16.

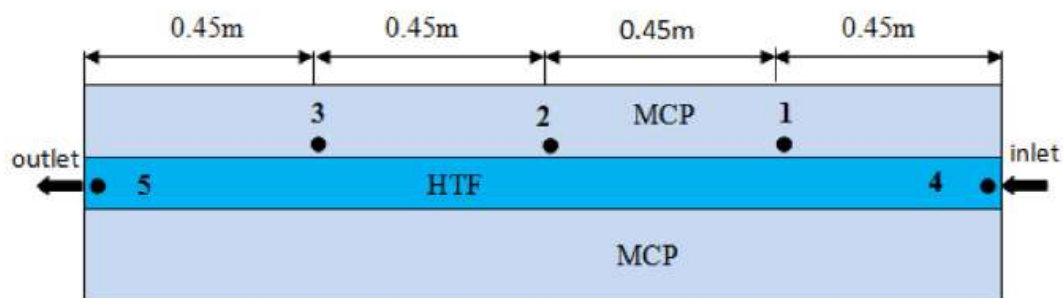


Figure 4.15.a: Positions des thermocouples dans le tube absorbeur



Figure 4.16: Dispositif expérimental

4.5.2. Affichage des résultats

La carte d'accusation développée liée au PC à l'aide du câble USB assure la visualisation des différentes positions des thermocouples, ainsi que le graphe d'évolution des températures en temps réel grâce à l'interface (PLX-DAQ), comme indiqué dans la figure 4.17. Les mesures seront automatiquement sauvegardées dans un fichier Excel déclaré dans le code arduino suivant un forma bien déterminé.



Figure 4.17: Affichage des températures via la carte d'acquisition développée

4.6. Model numérique et formulation mathématique

4.6.1. Analyse thermique

4.6.1.1. Bilan énergétique

La figure 4.18 montre le modèle de transfert de chaleur du collecteur cylindro parabolique (PTR), dont le bilan énergétique est décrit par les équations suivantes [94]:

$$Q_{solarabs} = Q_{a-f,conv} + Q_{stored} + Q_{loss,conv} + Q_{loss,radn} \quad (4.6)$$

Le rayonnement solaire incident sur le collecteur cylindro parabolique (PTC) est focalisé sur le tube récepteur après avoir tenu compte des pertes optiques dans le collecteur ($Q_{solarabs}$). Cette énergie est ensuite transmise à la couche PCM insérée entre les tubes intérieur et extérieur de l'absorbeur par conduction. Une certaine partie de l'énergie est stockée par le PCM (Q_{stored}) et une partie est transférée à l'eau circulant dans le tube intérieur par convection ($Q_{a-f,conv}$). L'énergie restante est perdue dans l'atmosphère par rayonnement ($Q_{loss,radn}$) et convection ($Q_{loss,conv}$).

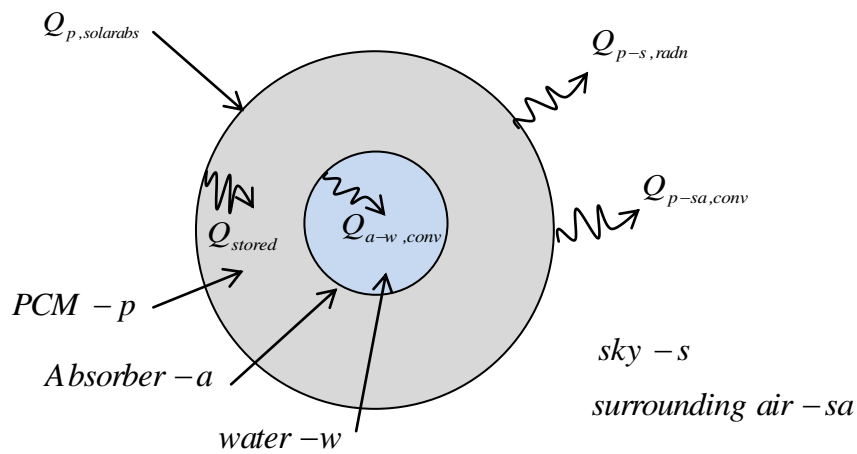


Figure 4.18: Bilan énergétique du tube absorbeur [94]

A) Energie solaire absorbée

L'absorption de l'énergie solaire sur le concentrateur est calculé en utilisant l'équation suivante qui est indépendante de la température mais proportionnelle aux pertes optiques du collecteur, facteur d'interception, largeur et longueur du miroir réfléchissant [95].

$$Q_{Solarabs} = \eta_0 \cdot I_b \cdot W \cdot L \quad (4.7)$$

Où:

η_o : rendement optique;

I_{in} : l'intensité du rayonnement solaire;

W et L : la largeur et la longueur du collecteur.

Le rendement optique η_o est défini comme le rapport entre l'énergie absorbée par le récepteur et l'énergie solaire d'incidente. C'est l'un des paramètres clés de la conception d'un système d'énergie solaire concentré. Il peut être étudiée indépendamment des paramètres thermiques, si nous supposons que les propriétés du matériau du collecteur sont invariantes de la température. Dans ce cas, Il prend en compte toutes les pertes optiques depuis la captation du rayonnement solaire, jusqu'à sa conversion en énergie thermique. Il dépend des propriétés optiques du matériau utilisé : la réflectivité (ρ), transmittivité (τ), absorptivité (α), du facteur d'interception (γ), de la géométrie du collecteur et de l'angle d'incidence du rayonnement solaire incident, il est donné par l'équation [93]:

$$\eta_o = (\rho\tau\alpha) \cdot \gamma \cos \theta \quad (4.8)$$

Le facteur d'interception γ est le facteur optique le plus compliqué dans le calcul de la performance optique d'un concentrateur CCP. Il est défini comme le rapport de l'énergie interceptée par le l'absorbeur à l'énergie réfléchi par le miroir réfléchissante. Il traduit le fait que certains rayons solaires peuvent être renvoyés vers l'extérieur du concentrateur ou bien passer à coté de l'absorbeur lorsque les surfaces optiques présentent des défauts ou des irrégularités et lorsque l'absorbeur est mal positionné dans le plan focal. Il dépend des propriétés optiques des matériaux utilisés et de certaines erreurs qui peuvent apparaître dans la construction du concentrateur ou sur le système de poursuite.

L'énergie solaire interceptée au niveau de l'ouverture du réflecteur cylindro parabolique dépend du rayonnement solaire directe (I_b), de la surface d'ouverture du concentrateur est donnée par l'équation.

$$\dot{Q}_i = A_b I_b \quad (4.9)$$

L'énergie atteignant la surface du récepteur est l'effet combiné de l'énergie incidente \dot{Q}_i sur le concentrateur et le rendement optique (η_o). Elle s'exprime par :

$$\dot{Q}_r = \eta_o \dot{Q}_i \quad (4.10)$$

L'énergie absorbée par le fluide caloporteur (HTF) dépend de la chaleur spécifique du fluide caloporteur C_p , le débit massique et la différence de température du fluide ($T_o - T_i$).

L'énergie utile absorbée par le fluide caloporteur est donné par l'équation suivante:

$$\dot{Q}_u = \dot{m} \cdot C_p (T_o - T_i) \quad (4.11)$$

B) Chaleur stockée par PCM

L'application de la loi de Fourier donne l'équation suivante pour l'énergie thermique stockée dans le PCM [96]:

$$Q_{st} = \dot{m} \left[a_m h_m + C_{sp} (T_m - T_i) + C_{lp} (T_f - T_m) \right] \quad (4.12)$$

Où: Q_{st} : quantité de chaleur stockée,

m : masse du PCM,

C_{lp} : capacité thermique moyenne entre T_m et T_f ,

C_{sp} : capacité thermique moyenne entre T_m et T_i ,

T_m : température de fusion du PCM,

T_i : température initiale du PCM,

a_m : fraction fondue

h_m : enthalpie de fusion.

Dans ce travail on étudié les performances thermiques du PTC pour deux types de capteur, la première configuration l'absorbeur se compose d'un seul tube métallique sans PCM et la configuration alternative l'absorbeur se compose de deux tubes métalliques concentriques où le PCM est placé dans l'espace annulaire.

Le rendement thermique instantané est défini comme le rapport de l'énergie utile instantanée au rayonnement incident total sur la zone d'ouverture du réflecteur comme suit :

$$\eta = \frac{Q_u(t)}{A_b I_b(t)} \quad (4.13)$$

$$A_c = W_a L \quad (4.14)$$

Où: W_a , L , A_b et A_c sont l'ouverture, la longueur, la surface latérale du tube absorbeur et la surface d'ouverture du collecteur respectivement.

4.6.2. Évaluation des performances optique et thermique du CCP

La prédiction des performances optiques et thermiques des concentrateurs est essentielle pour la conception et l'évaluation des performances des centrales solaires thermiques à concentration. Dans les dernières années, des études ont été présentées pour évaluer la performance du concentrateur solaire cylindro-parabolique, en supposant que la distribution de température est uniforme autour de la circonférence du tube récepteur, et en négligeant les influences de la distribution non uniforme du flux d'énergie solaire sur le tube [97].

Récemment, les auteurs [98,99] ont rapporté les résultats de la simulation numérique en 3D du récepteur lorsque la distribution non-uniforme du flux d'énergie solaire est considérée. Cheng et al.[98], ont présenté une simulation numérique d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique avec la condition du flux solaire non uniforme, par le couplage de la méthode des volumes finis et la méthode de Monte Carlo (Ray-Trace), dans laquelle les effets des propriétés des différents FTC sur la distribution de la température dans le récepteur, les pertes thermiques et le rendement du concentrateur ont été étudiés.

He et al.[99], ont utilisé la méthode de Monte Carlo Ray-Trace (MCRT) pour évaluer la distribution du flux solaire incident sur le tube récepteur d'un concentrateur cylindro-parabolique de type LS-2. Cette méthode emploie des mouvements aléatoires de photons, et à chaque réflexion ou transmission, elle juge si le photon frappe le tube récepteur.

Xiao et al.[100], ont simulé la distribution du flux solaire sur la surface extérieure du tube absorbeur d'un récepteur du concentrateur solaire cylindro-parabolique sur la base de la méthode de Monte Carlo. Ray-Trace. La distribution du flux non linéaire a été considérée comme une condition aux limites complexe utilisée pour simuler le problème de transfert de chaleur dans ce système.

Dans notre étude on va admettre une distribution non uniforme du flux solaire sur le tube absorbeur. La nouveauté de notre étude est de développer un nouveau modèle mathématique pour simuler les performances thermiques concentrateur cylindro-parabolique avec un tube absorbeur concentrique contenant un PCM, le sel fondu (60% NaNO_3 + 40% KNO_3) dans l'espace annulaire. Nous présentons une étude expérimentale et numérique en concédant la condition du flux solaire non uniforme, par le couplage de la méthode des volumes finis et la méthode de Monte Carlo (Ray-Tracing).

4.6.2.1. Modélisation optique (Méthode de Monte-Carlo (ray tracing) (MCRT))

La méthode de (MCRT) est une méthode mathématique basée sur les probabilités, cette méthode est très utilisée dans plusieurs domaines de traitement d'image, énergies renouvelables et surtout dans les phénomènes radiatifs). C'est une technique qui consiste à lancer un nombre de rayons ou bien des photons à partir d'une source lumineuse par exemple le soleil. Chaque particule transporte une certaine quantité d'énergie. On suit la trajectoire de chacune des particules. Cette méthode est bien adaptée aux géométries très complexes, et aux phénomènes de réflexion, réfraction et transmission, seulement il est nécessaire de lancer un nombre très important de rayons pour approcher correctement les phénomènes.

Aujourd'hui il existe plusieurs codes basés sur cette méthode, comme le code Soltrace et Tonatiuh, ces derniers sont utilisés pour la simulation optique des différents systèmes. Par exemple : la concentration du rayonnement solaire à l'aide d'un concentrateur cylindro-parabolique.

4.6.2.2. Présentation de code SolTrace

La simulation de la performance optique et de la distribution du rayonnement solaire autour du tube récepteur du concentrateur, dans notre travail, a été réalisée à l'aide de logiciel SolTrace, développé au sein de "National Renewable Energy Laboratory (NREL)" pour analyser et simuler les performances optiques et géométriques des systèmes solaires [96].

Le code utilise l'approche dite « Lancer des rayons » basée sur la méthode de Monte Carlo. L'utilisateur sélectionne un nombre de rayons qu'il souhaite lancer depuis le disque solaire, chaque rayon tracé interagit dans le système tout en rencontrant diverses interactions optiques. La méthode est basée sur le principe de choisir de manière aléatoire une série de rayons issus d'une surface A (disque soleil), et de déterminer la quantité de rayons de cette série qui arrive sur une surface B (le concentrateur).

À chaque étape de modélisation, le code calcule l'angle de réflexion de chaque rayon en fonction de son angle d'incidence, son point d'impact. Cette méthode représente le parcours réel des photons. En utilisant un grand nombre de rayons, elle permet d'avoir des résultats précis même avec des systèmes solaires complexes.

4.6.2.3. Méthodologie et étapes d'application du SolTrace

Dans le SolTrace, un système optique est organisé en rangées (stages) dans un système de coordonnées globales. Une rangée (stage) est définie comme une section de la géométrie optique qui, une fois que le rayon sort du disque solaire, ne sera pas réintégrée par le rayon sur le reste de son chemin à travers le système.

Une géométrie complète du système peut consister en une ou plusieurs étapes. Il incombe à l'utilisateur de définir la géométrie de scène en conséquence. La motivation derrière ce concept est d'utiliser un suivi efficace afin d'économiser le temps de traitement et de permettre une représentation modulaire d'un système. L'un des avantages importants des étapes est celle qui consiste sauvegarder et utiliser les paramètres dans d'autres géométries du système sans avoir à recalculer les positions et les orientations des éléments.

La définition du modèle du concentrateur cylindro-parabolique avec SolTrace se décompose en quatre étapes: définition des paramètres pour le soleil, définition des éléments optiques et géométrie du modèle et définition des paramètres de l'algorithme de « lancer des rayons », et définition des paramètres d'affichage des résultats.

a) Déclaration paramètres pour le soleil

Le soleil est défini par les coordonnées du vecteur solaire dans le repère global et par un écart type définissant la distribution de sa luminance, trois options sont disponibles à cet effet : Gaussian, PillBox, et la dernière approche est définie par l'utilisateur. Dans ce travail, nous avons choisi l'approche PillBox avec une distribution plate, qui est suffisante pour une large classe de problèmes, avec un demi-angle de 4,6 mrad, voir la figure 4.19.

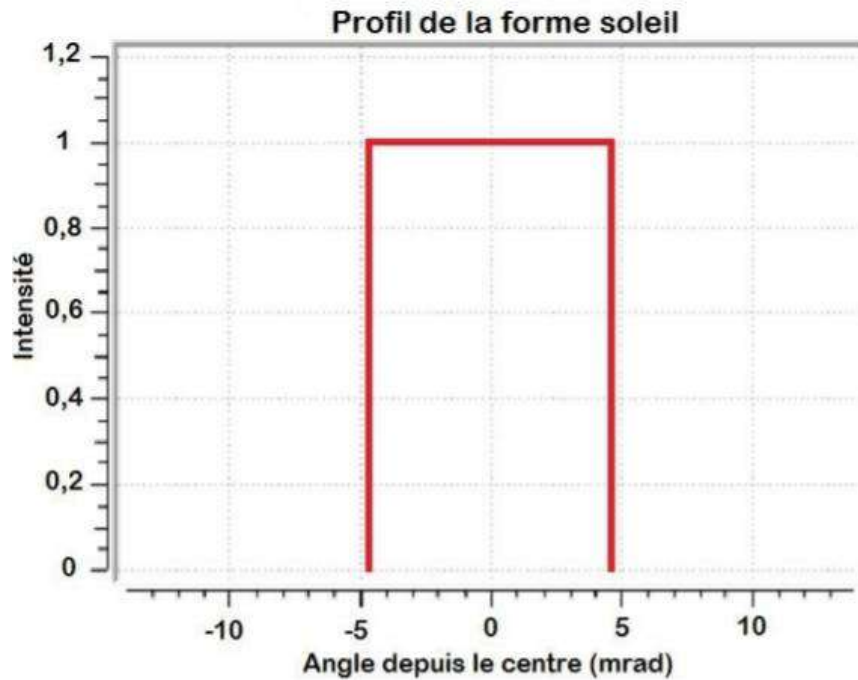


Figure 4.19: Approche de PillBox

b) Paramètres optiques

Les propriétés optiques sont définies sur la deuxième page d'entrée, Chaque projet SolTrace peut avoir de nombreux ensembles de propriétés optiques définis. Dans notre cas du concentrateur cyindro-parabolique sur lequel est monté un absorbeur, les propriétés optiques du concentrateur ainsi que l'absorbeur sont déclarées successivement dans des pages séparées comme illustré sur les deux figures 4.19 et 4.20.

Tableau 4.8: Propriétés optiques du concentrateur

	Miroir	Absorbeur	Enveloppe extérieur
Réfectivité	0,91	0,0500	0,0000
Transitivité	0,002	0,002	0,9600
Erreur de pente	3,5000	1,0000	0,9500
Erreur de spécularité	0,1000	0,0500	0,2000

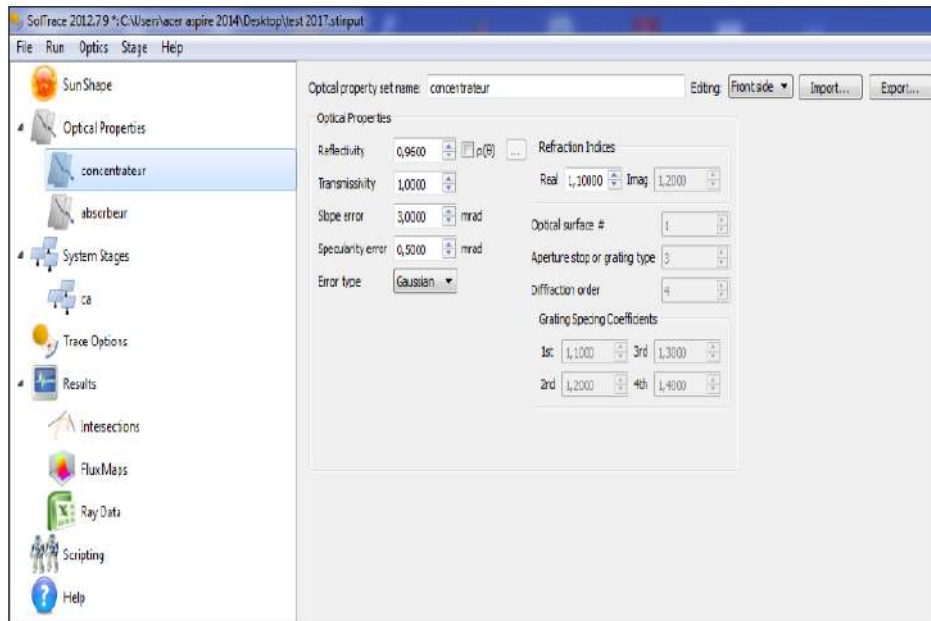


Figure 4.20: Fenêtre descriptive pour l'introduction des propriétés optiques du concentrateur

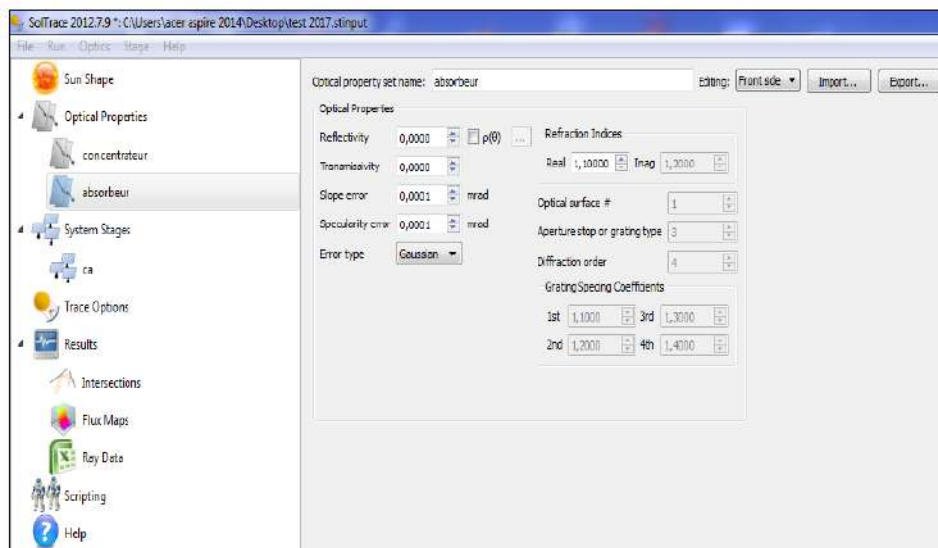


Figure 4.21: Fenêtre descriptive pour l'introduction des propriétés optiques de l'absorbeur

c) Paramètres géométriques

La deuxième étape dans la déclaration des données consiste à introduire les dimensions géométriques du concentrateur ainsi que l'absorbeur. Cette étape est de très grande utilité car, une erreur de dimensionnement engendre une fausse modélisation et par conséquent des résultats erronés. La géométrie du cylindro-parabolique est représentée par le code Soltrace après avoir introduit des paramètres géométriques demandés par le code. De même pour l'absorbeur, la géométrie doit être définie de manière que le code peut la modéliser

correctement. Le code Soltrace offre la possibilité de procéder à une déclaration faite sur la même page contenant les deux géométries (concentrateur et absorbeur), ou bien dans des pages séparées selon le choix de l'utilisateur. La figure 4.21 illustre une fenêtre de déclaration commune entre les deux surfaces.

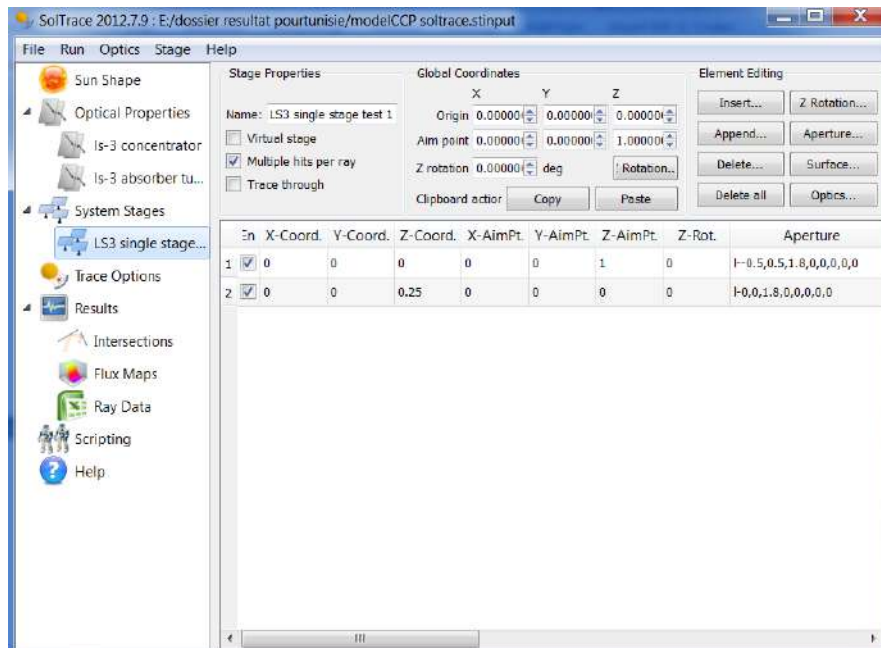


Figure 4.22: Fenêtre de déclaration des paramètres géométriques

d) Définition des paramètres de lancer des rayons

Lorsque l'utilisateur indique un certain nombre de rayons qui doivent être tracés, afin de mener les calculs optiques, de différentes simulations ont été réalisées en faisant varier ce paramètre. Pour cette étude, les simulations ont été réalisées avec 2.500.000 rayons issus du disque solaire lancés en direction du concentrateur avec un flux solaire direct normal égal à 1000 W/m^2 .

4.6.3. Résultat optique

Une fois l'étape de déclaration des données est achevée, on procède à l'exécution du programme. Le fichier des résultats peut afficher une modélisation géométrique du système solaire à concentration, associé à une image illustrative de la réflexion des rayons incidents à travers le concentrateur en direction de l'absorbeur. Le calcul de la densité du flux de chaleur solaire par SolTrace est effectué pour obtenir le profil de distribution du flux de chaleur en considérant une irradiation normale directe de 1000 W/m^2 .

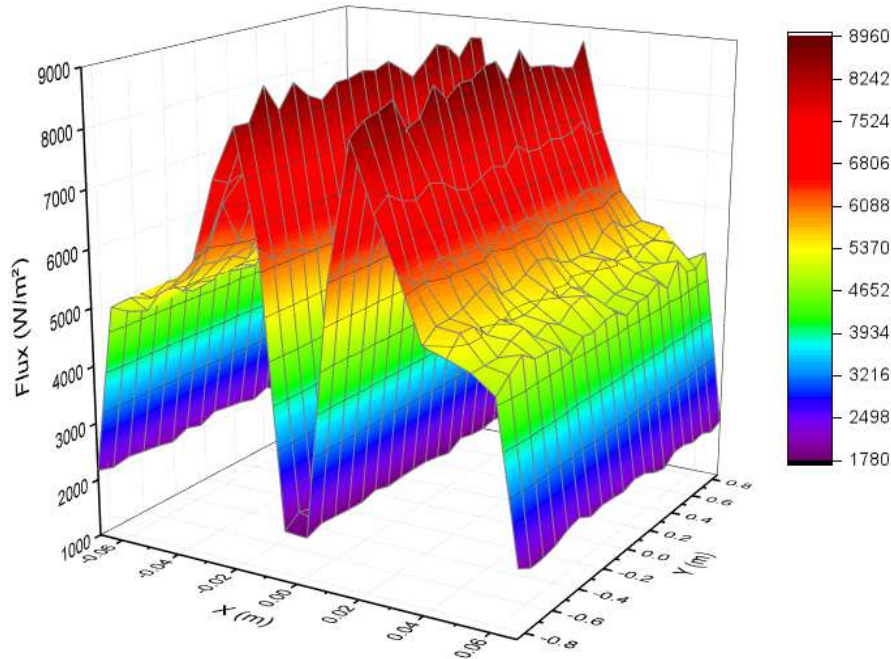


Figure 4.24: Vue tridimensionnelle de la distribution du flux de chaleur sur la surface extérieure du tube absorbeur en considérant ($I_b=1000\text{W/m}^2$)

Les figures 4.22 et 4.23, montrent la distribution du flux de chaleur solaire le long de la paroi externe du tube récepteur. Il est très clair que la distribution est uniforme suivant l'axe z. Par contre, elle est non uniforme dans la direction circonférentielle du tube. La distribution du flux de chaleur sur la partie basse de la périphérie du tube récepteur expose une distribution de pointe. La courbe de la figure 4.23 peut être divisée en trois parties détaillées comme suit:

Dans la première partie, le flux de chaleur solaire est très faible, puisque le tube absorbeur ne reçoit que le rayonnement direct. La deuxième partie est caractérisée par un faible nombre de rayons atteignant la périphérie du tube récepteur et par conséquent, la distribution du flux de chaleur solaire est très faible dans cette partie. Dans la troisième partie, le flux solaire augmente rapidement et atteint un pic d'environ 9860 W/m^2 . Il est montré que le flux de chaleur du rayonnement solaire concentré sur la périphérie inférieure du tube absorbeur.

4.6.4. Exploitation des résultats du code Soltrace

La distribution non uniforme du flux d'énergie solaire conduit à une distribution non uniforme de température, ce qui amène des contraintes mécaniques dans le récepteur. Ensuite, le résultat (la distribution du flux d'énergie solaire) est considéré comme un des conditions aux limites du flux de chaleur dans le modèle de simulation de la performance thermique. Afin de rendre ces résultats exploitables dans les simulations du code de calcul Fluent, il serait nécessaire de les exprimer sous forme de relation polynomiale $q=f(\phi)$. Cette expression sera

introduite dans Fluent sous forme de sous-programme en C++ interpréter par fluent comme étant une UDF (Used Define Function) qui fournit en temps réel la condition au limite imposant une densité de flux sur la surface externe de l'absorbeur.

A partir de la courbe de la figure 4.23, chaque segment continu des données, les fonctions polynomiales $Y_1(x)$, $Y_2(x)$ et $Y_3(x)$ ont été créées à l'aide des fonctions de lissage des courbes intégrées dans Microsoft Excel, voir figures 4.24 et 4.25. Ensuite ses fonctions sont développées dans un macro dans la simulation Fluent CFD en tant que fonction définie par l'utilisateur (UDF), qui est utilisée comme entrée pour la condition aux limites de la paroi du flux de chaleur sur la surface extérieure du tube absorbeur. Ce flux de chaleur prévu est utilisé dans la modélisation CFD du système effectuée ultérieurement dans la section 5.

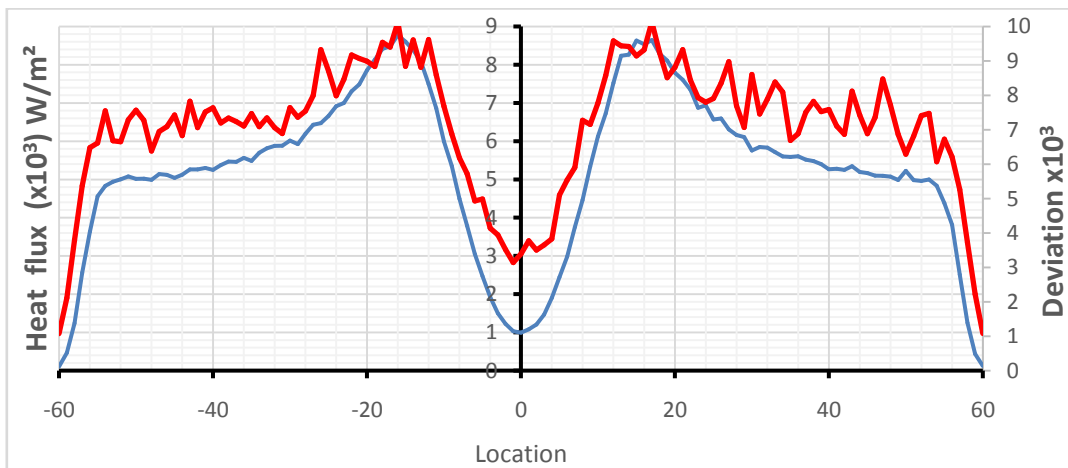


Figure 4.25: Distribution du flux sur la surface extérieure du tube absorbeur (2D)

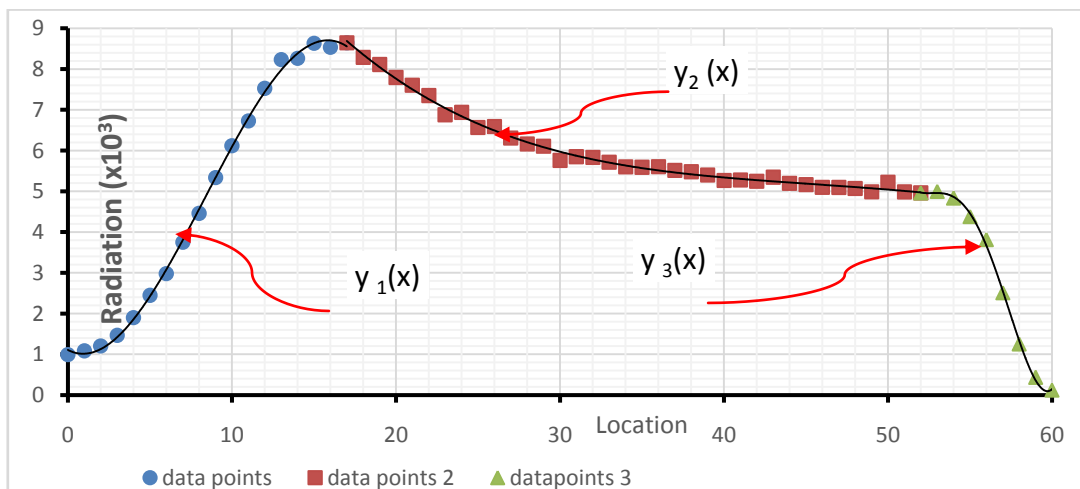


Figure 4.26: Fonctions polynomiales représentant le flux solaire

4.6.5. Etude thermique (Modélisation CFD)

Un outil logiciel de dynamique des fluides numérique (CFD) a été utilisé pour étudier numériquement en 3D afin d'étudier les performances thermiques d'un concentrateur cylindro-parabolique en adaptant un nouveau modèle où l'absorbeur est un tube concentrique dont l'espace annulaire est rempli par un matériau à changement de phase (MCP). La procédure impliquait la solution des équations de Navier-Stokes moyennées de Reynolds en utilisant la méthode des volumes finis mise en œuvre dans le code commercial de dynamique des fluides, Ansys Fluent 17.0. Le domaine de calcul est discrétisé à l'aide d'éléments hexaédriques et quadrilatéraux (figure.4.26.a). L'intensification du transfert thermique variable dans un capteur cylindro-parabolique sous un régime turbulent utilise un flux thermique non-uniforme distribué sur la paroi externe de l'absorbeur (figure.4.26.b)

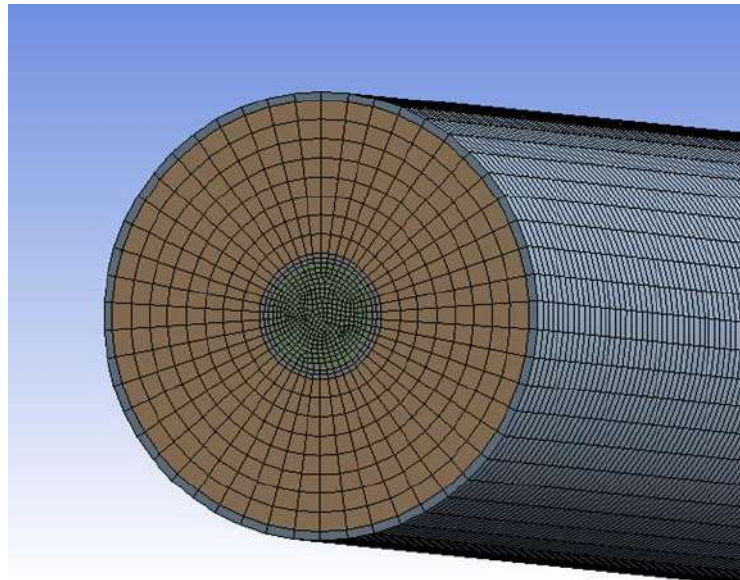


Figure 4.27.a: Maillage en 3D du tube absorbeur

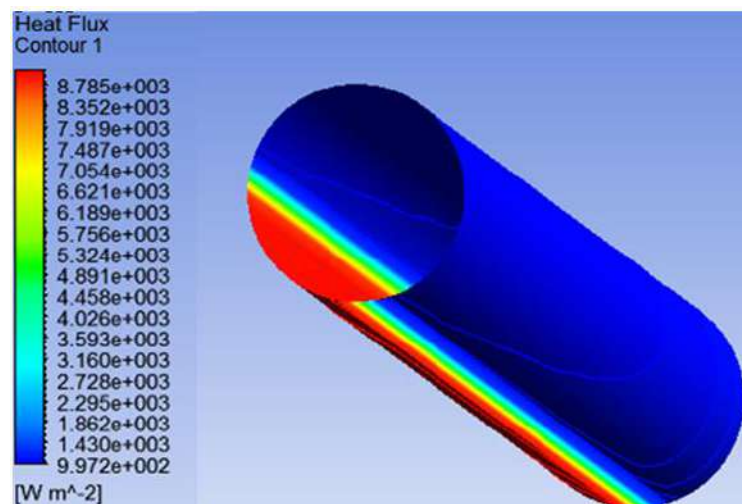


Figure 4.28.b: CFD Distribution de la densité du flux de chaleur sur la paroi externe du tube absorbeur

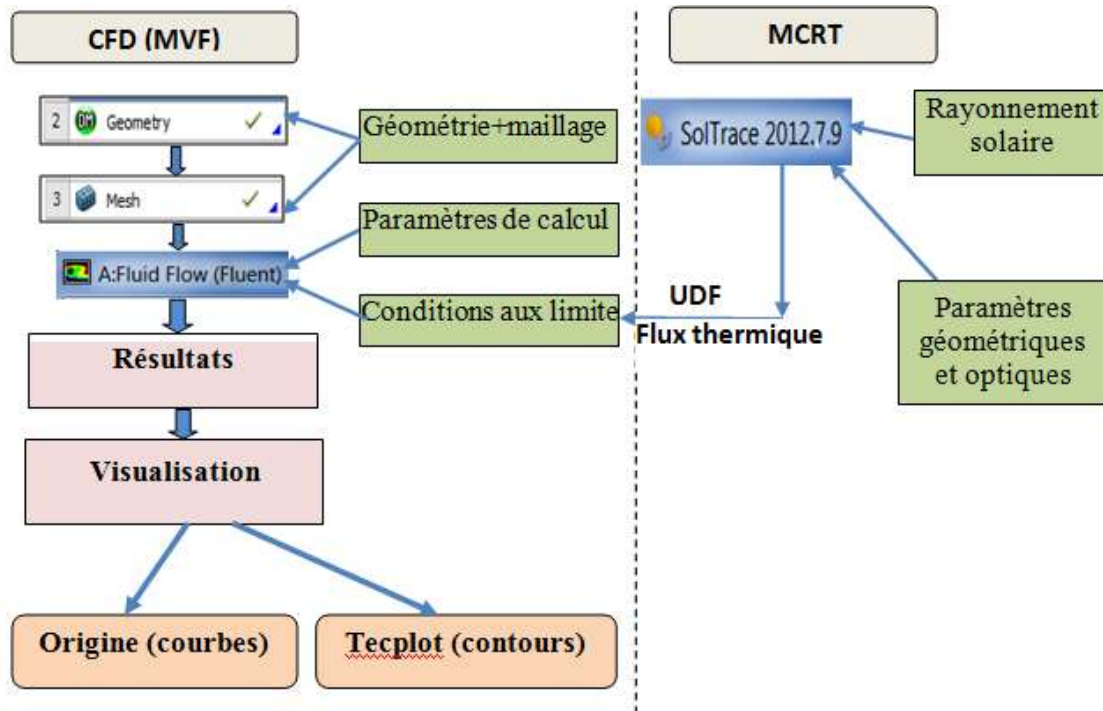


Figure 4.29: Etapes utilisées pour notre simulation

4.7. Résultats et discussions

4.7.1. Résultats expérimentaux

A. Distribution des températures du PCM et de l'eau

Les résultats expérimentaux menés dans la région de Batna pour deux journées typiques, le 21 juillet 2017 et le 21 octobre 2017 sont présentés et discutés dans cette section. L'intervalle quotidien typique de chaque test est défini entre 10h00 et 16h00 heure locale qui a été choisie en fonction de l'intensité du rayonnement solaire direct disponible. L'intensité du rayonnement atteint était de 950 W/m^2 et 750 W/m^2 pendant ces deux jours respectivement. Les tests ont été effectués avec et sans PCM dans le tube absorbeur. Le débit de l'eau considérée comme fluide caloporteur a été fixée à $0,005 \text{ kg/s}$ pour les deux jours.

Les figures 4.30 et 4.31, montrent les profils de température de sortie du HTF pour les deux journées typiques d'expériences. En raison de l'orientation Est-Ouest du collecteur, les températures augmentent avec le temps jusqu'à atteindre les valeurs maximales vers midi vrais et commencent à diminuer ensuite en raison du débit massique constant à travers le récepteur et de la variation quotidienne du rayonnement solaire concentré à l'extérieur de tube.

Dans une orientation Est-Ouest, le rayonnement solaire varie proportionnellement au temps au début de la journée pour diminuer ensuite en fin de la journée, c.-à-d. elle augmente dès le lever du soleil pour atteindre un maximum à midi solaire avant de décroître à nouveau en raison de l'effet de l'angle d'incidence qui est nul à midi solaire. Au cours de l'expérience, on observe également que l'augmentation de la température du fluide caloporteur à travers le PTC sans PCM est plus importante que l'augmentation de température avec PCM pendant le temps de charge, c'est-à-dire de 9h00 à 11h30 et de 9h00 à 12h30 pour les deux jours types considérés présentés. La température de sortie maximale atteinte dans le récepteur sans PCM est proche 98°C, ce qui est moins à celle atteinte dans le récepteur avec PCM, qui est égale à 120°C le 21 juillet.

Les figures 4.28 et 4.29 montrent la distribution de la température du PCM en fonction du temps à différentes positions axiales des thermocouples : $Z_1=0,45\text{m}$, $Z_2=0,90\text{m}$ et $Z_3=1,35\text{m}$, où se trouvent les capteurs de température. Les résultats montrent que la variation transitoire de la température du PCM passe par trois étapes distinctes pour achever les processus de charge et de décharge. Pendant la première étape, la température du PCM augmente avec le temps, jusqu'à ce que le matériau commence la fusion. Le transfert de chaleur est prédominé par la conduction dès le début du processus d'échauffement jusqu'au début de changement de phase le matériau stocke l'énergie uniquement par chaleur sensible de 9h00 à 11h30 et de 9h00 à 12h30 pour les deux jours de test le 21 Juillet et le 21 Octobre respectivement. Pendant la deuxième étape, le processus de fusion du PCM se déclenche et l'énergie thermique est stockée sous forme de chaleur latente à température constante à $T_m=217^\circ\text{C}$, l'énergie est stockée principalement par chaleur latente. Au cours de cette étape, la conduction thermique et la convection naturelle se produisent. Lorsque le PCM est complètement fondu, la température du PCM à chaque position augmente à nouveau. Enfin, la température du PCM diminue en raison de la libération de la chaleur stockée dans le PCM, qui est en phase liquide au début du processus de décharge, dès que la diminution du rayonnement solaire direct commence dans l'après-midi.

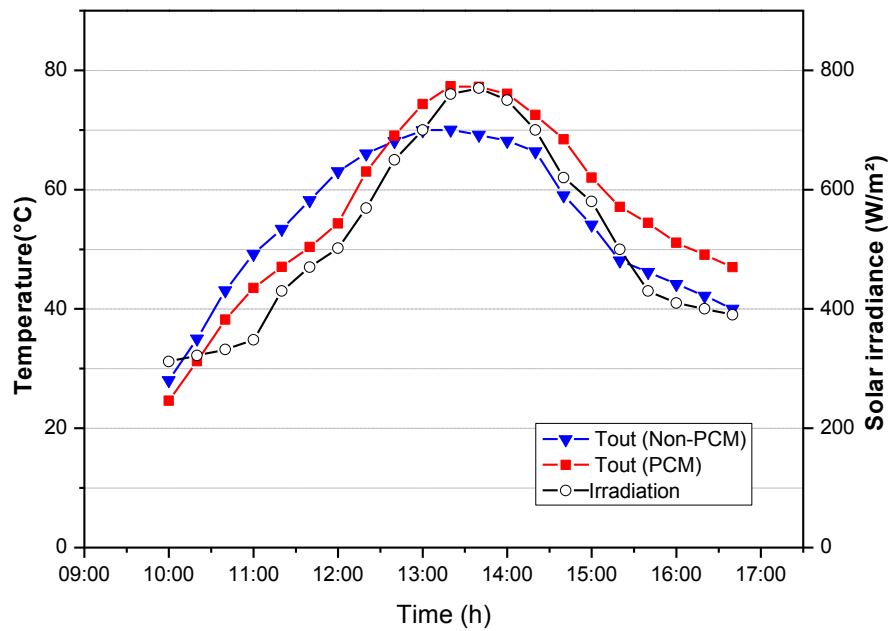


Figure 4.30: Profil du rayonnement solaire direct et la température T_{out} pour :
tube absorbeur avec et sans PCM, le 21 octobre 2017

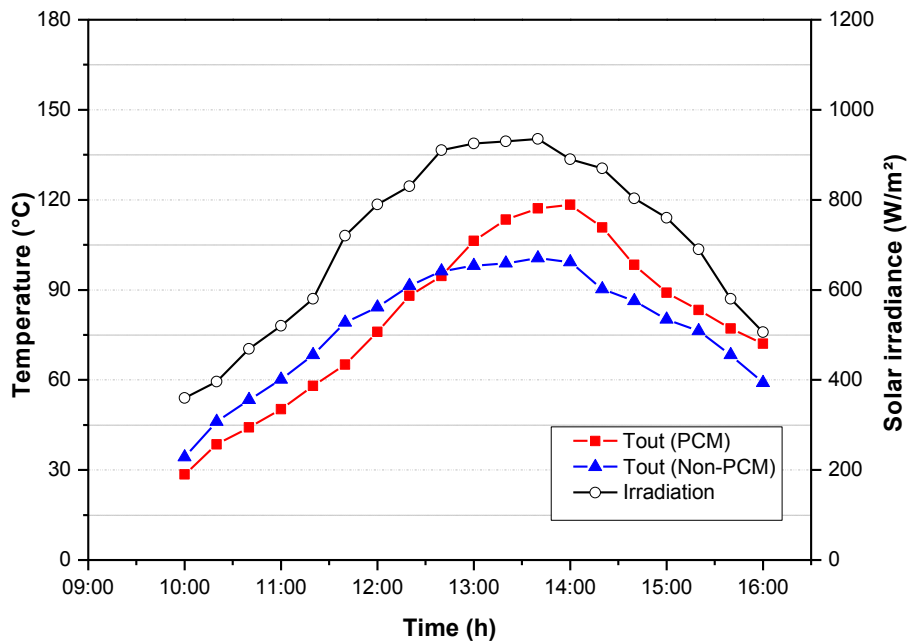


Figure 4.31: Profil du rayonnement solaire direct et la température T_{out} pour :
tube absorbeur avec et sans PCM, le 21 Juillet, 2017

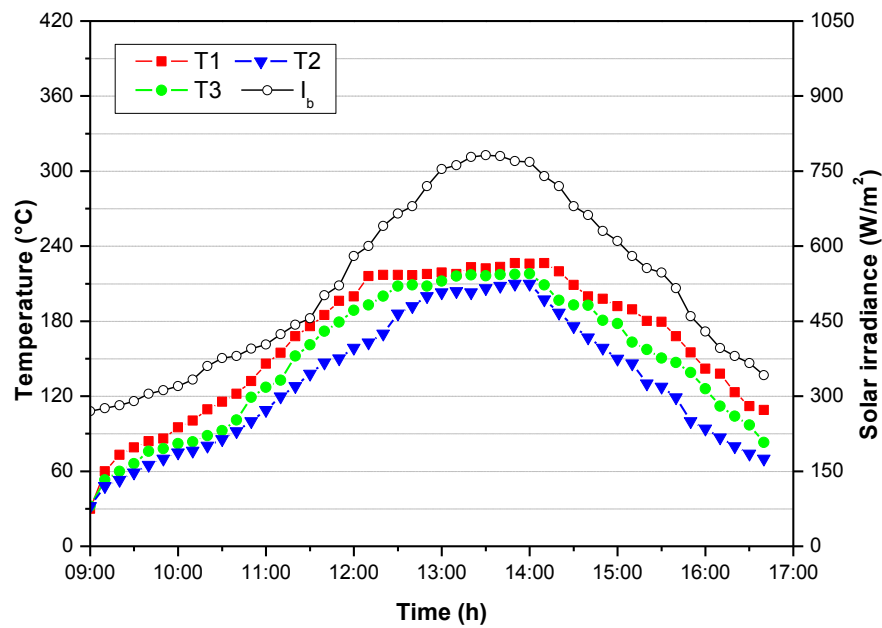


Figure 4.32: Température du PCM dans les trois positions des thermocouples 21 Octobre 2017

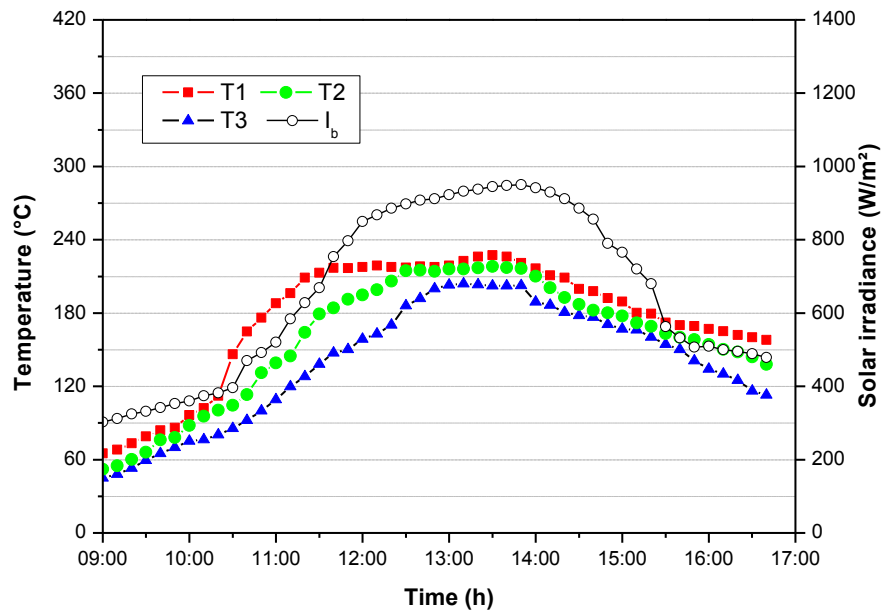
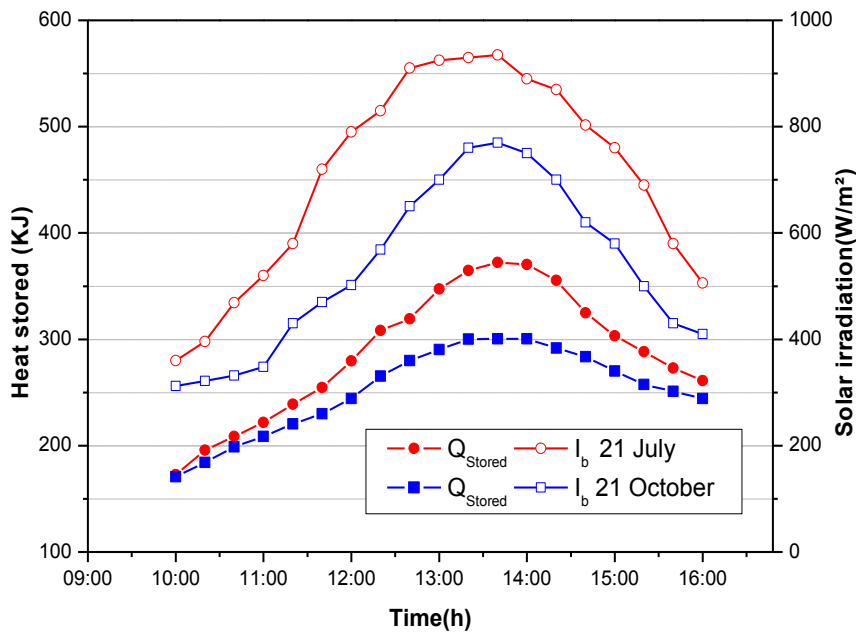


Figure 4.33: Température du PCM dans les trois positions des thermocouples 21 Juillet 2017

L'énergie stockée par le PCM est fournie sous forme de chaleur sensible et plus tard sous forme de chaleur latente pendant le processus de décharge. L'énergie stockée les deux jours a atteint des valeurs maximales d'environ 370 kJ et 300 kJ respectivement à 14h00(figure 4.35).



3

Figure 4.34: Profil d'énergie stockée pour le 21 Juillet et 21 Octobre 2017

L'erreur moyenne absolue en pourcentage (MAPE) a été choisie comme mesure pour prédire la précision des tests expérimentaux pour les variables moyennes, l'énergie utile et la température de sortie du système en utilisant la formule suivante:

$$MAPE = \frac{1}{n} \left(\frac{\sum_1^n Y_i(PCM) - Y_i(non-PCM)}{\sum_1^n Y_i(non-PCM)} \right) \tag{4.16}$$

Avec:

Y_i représente la variable

Les résultats comparatifs sont présentés dans le tableau 4.9

Tableau 4.9: Erreur moyenne relatif en pourcentage (MAPE) pour l'énergie utile et la température de sortie du fluide caloporteur

Jour	Variable	MAPE
21 juillet (système avec PCM et sans PCM)	Énergie utile	13.36%
	T_{out}	14.57%
21 Octobre (système avec PCM et sans PCM)	Énergie utile	12.28 %
	T_{out}	12.76%

B. Efficacité du système

Les figures 4.35, 4.36 et 4.37 présentent le rendement thermique instantané et l'énergie utile pour les deux types de concentrateur : avec simple tube absorbeur et absorbeur à tubes concentriques avec PCM aux 21 octobre et 21 juillet 2017. Selon ces résultats, la valeur moyenne du rendement thermique instantané maximal atteint en utilisant un récepteur avec PCM d'environ 60% au 21 juillet et pour le débit massique de 0,005 kg/s, cependant pour un récepteur simple sans PCM, il est égale à 52%. Au 21 octobre, il atteint 50% lors de l'utilisation de PCM, tandis que pour un récepteur simple sans PCM, il est égal à 42%.

L'efficacité thermique journalière du système peut être calculée à l'aide de l'équation ci-dessous:

$$\eta = \frac{\int_0^t Q_u dt}{\int_0^t Q_{sol} dt} \quad (4.17)$$

Où :

Q_u : l'énergie utile

Q_{sol} : l'énergie solaire.

Le tableau 4.10 récapitule les résultats comparatifs du rendement thermique journalier du système pour les deux journées typiques. Les résultats confirment, que l'utilisation d'un récepteur avec un tube concentrique contenant un MCP, l'efficacité thermique journalière du PTC augmente respectivement de 6,56% et 8,32% pour les deux journées typiques respectivement.

Tableau 4.10: Rendement thermique journalier du système avec et sans PCM

$\Sigma Q_u / \Sigma Q_s$ (Rendement thermique)		
	Système avec PCM	Système sans -PCM
21 Juillet	53.61%	50.31%
21 Octobre	35.38%	32.26%

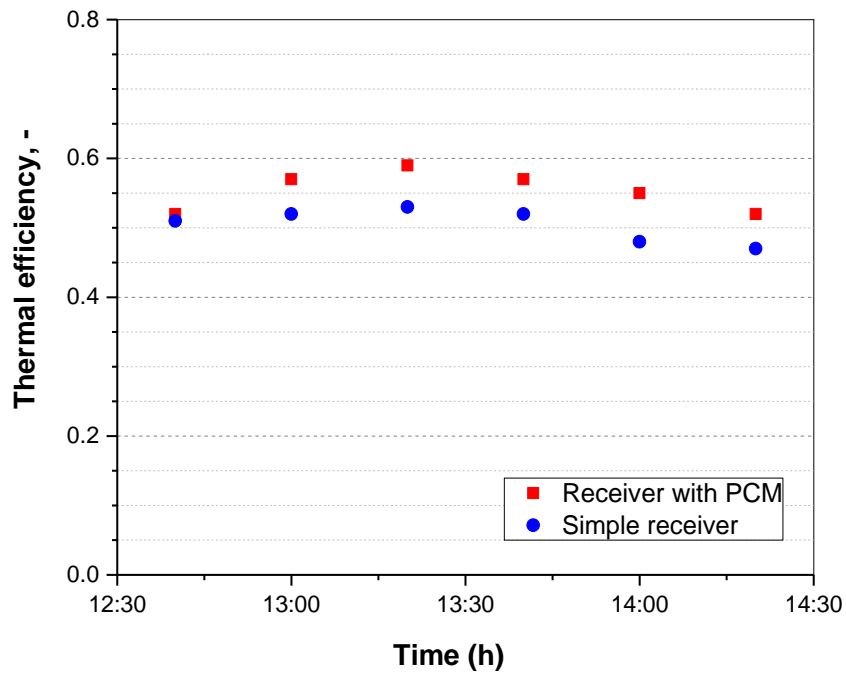


Figure 4.35: Rendement instantané du PTC avec et sans PCM le 21 Juin

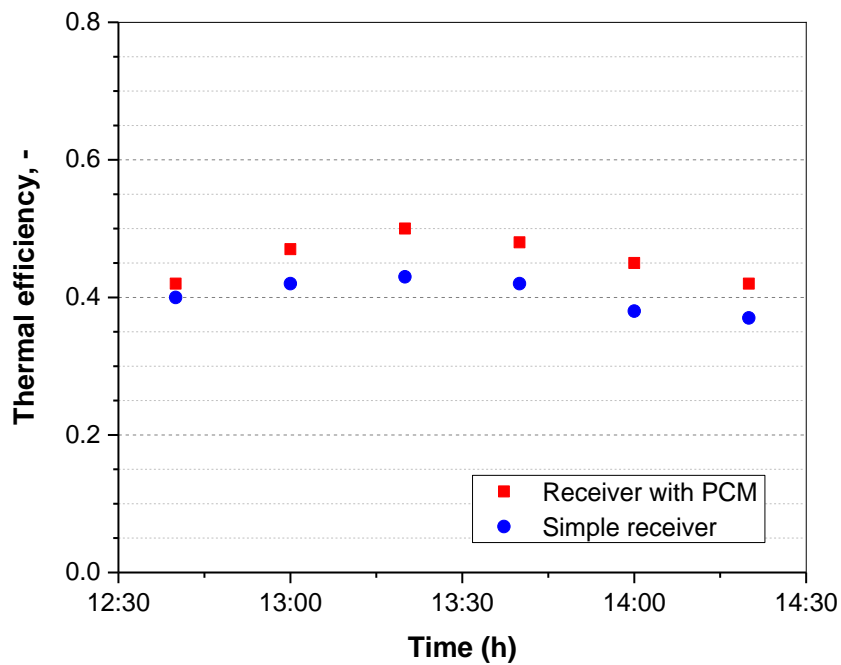


Figure 4.36: Rendement instantané du PTC avec et sans PCM le 21 Octobre

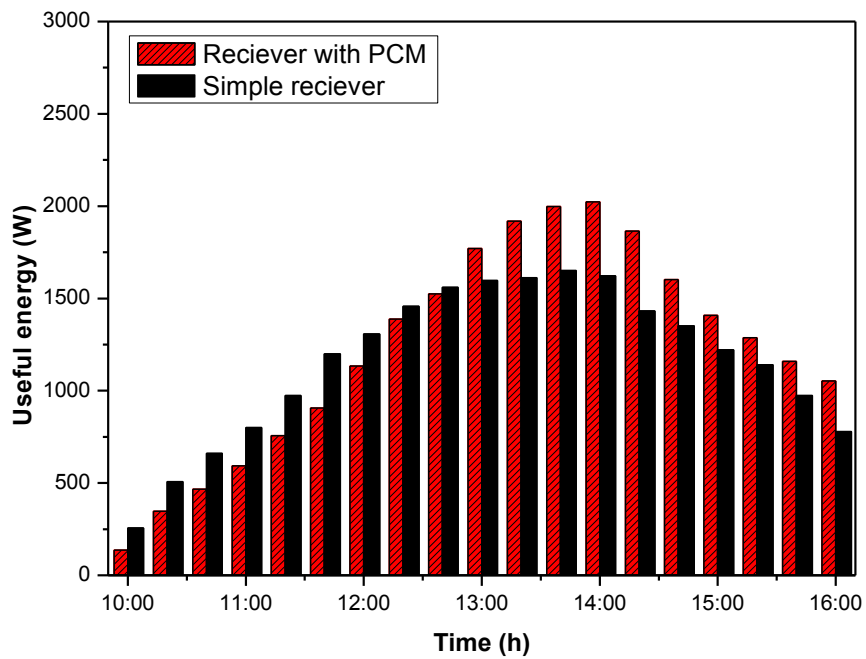
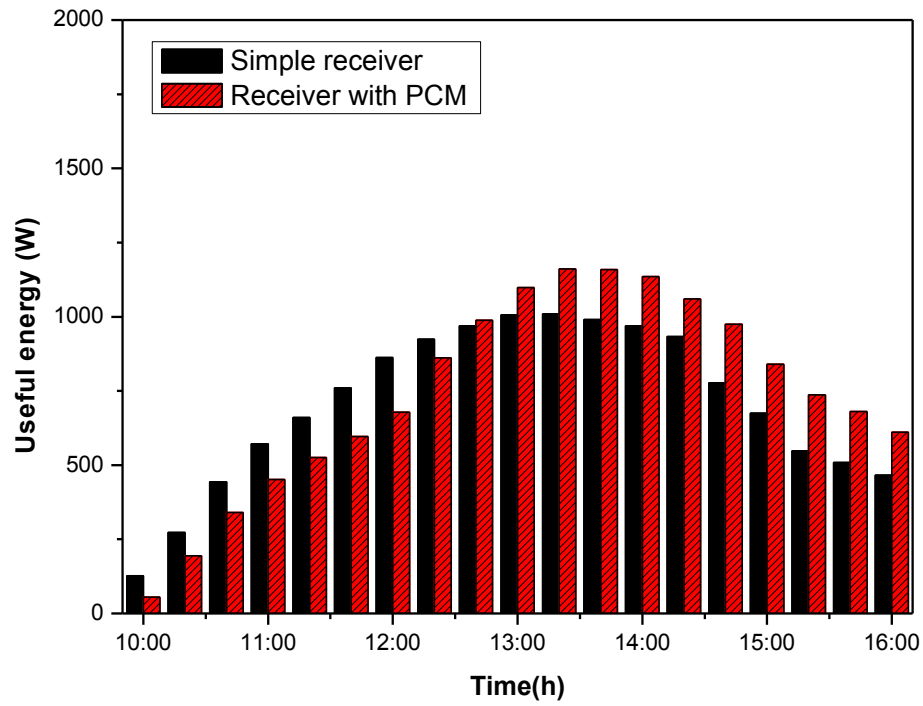


Figure 4.37: Energies utile du PTC avec et sans PCM le 21 Juillet et 21 Octobre 2017

4.7.2. Résultats de la modélisation CFD

Les résultats numériques sont présentés pour caractériser la distribution de la température de la surface externe du tube récepteur comme présenté sur la figure 4.36. Les gradients de température circumférentielle sont une conséquence de la non-uniformité de distribution de flux. Les températures de la surface des parois externes augmentent dans le sens de l'écoulement. La région inférieure à la sortie est la plus chaude. À mesure que les distributions de flux de chaleur augmentent, une plus grande partie de la surface extérieure du tube se trouve à des températures proches de la température maximale. Les températures dans les régions supérieures sont plus basses car il y a un faible flux de chaleur incident à ces endroits. La distribution de la température du tube absorbeur intérieur (domaine de l'eau) est présentée dans la figure 4.37. Pour un débit HTF défini de 0,005kg/s, la température moyenne de sortie de l'eau modélisée est égale à $T_{\text{out}}=130^{\circ}\text{C}$ (figures 4.38).

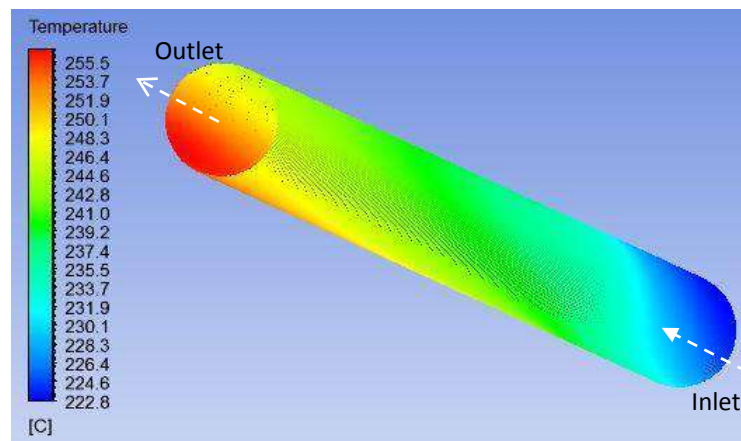


Figure 4.38 : Distribution de température de la surface externe du tube absorbeur

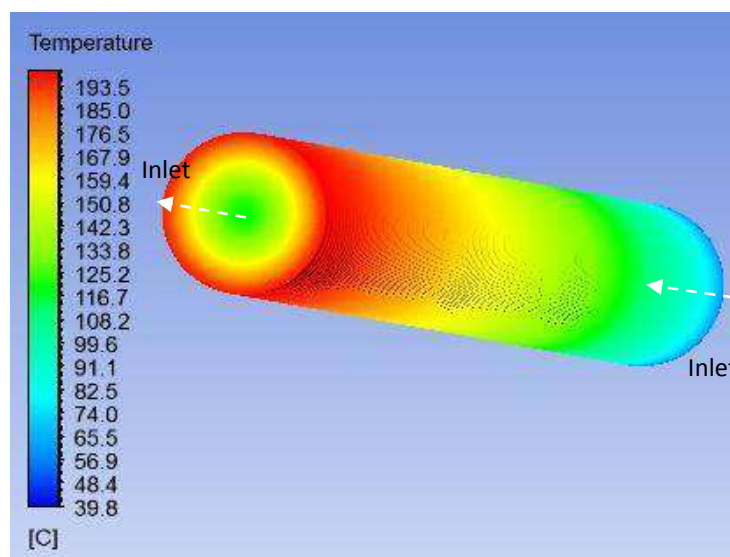
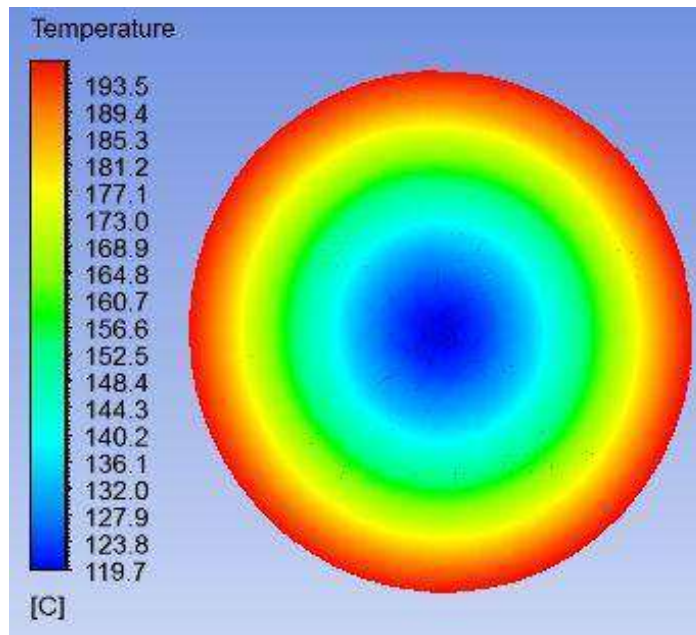
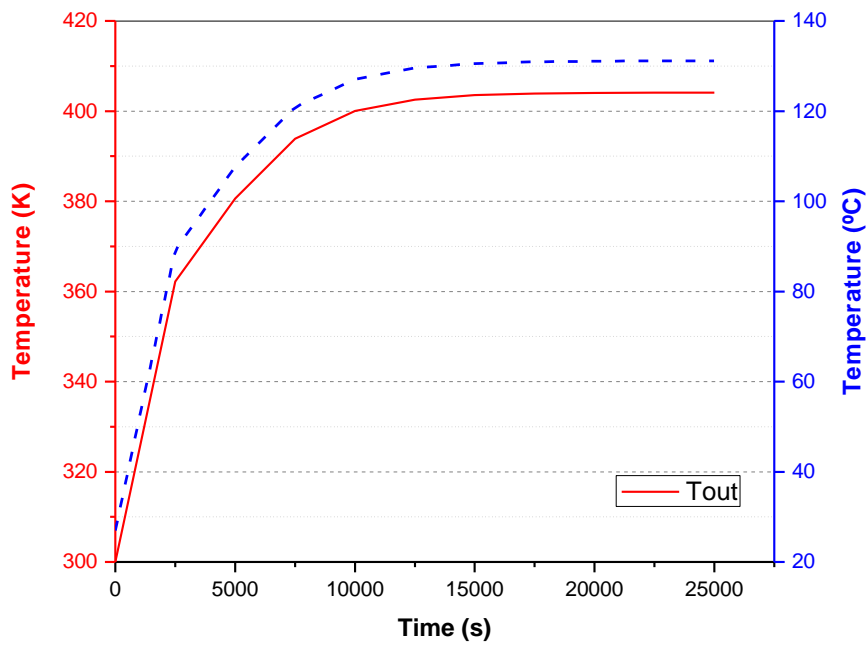


Figure 4.39: Répartition de la température dans le domaine de l'eau



(a)



(b)

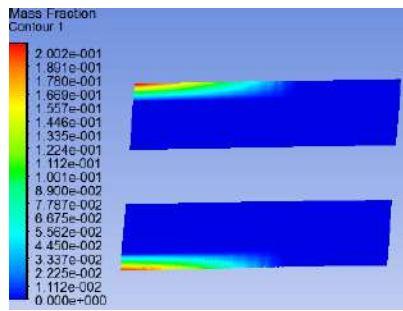
Figure 4.40: Résultats de la simulation CFD: (a) Distribution de la température de l'eau de sortie (b) Température moyenne de sortie de l'eau en fonction du temps

A. Progrès du front de la fusion et variation de température

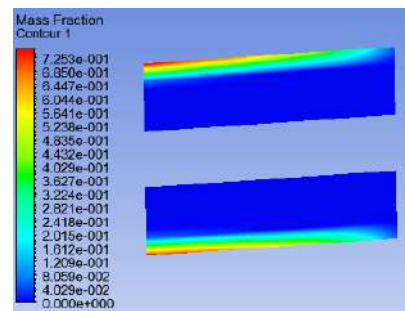
La figure 4.41 montre l'évolution de la façon dont le PCM dans le tube récepteur externe du capteur solaire commence à recevoir l'énergie thermique solaire collectée par la surface externe de l'absorbeur. Une partie de l'énergie solaire thermique reçue est ensuite transférée par convection forcée à l'eau du tube intérieur à travers la paroi d'échange thermique. Après 1h de fonctionnement, le processus de fusion commence à se produire dans le PCM, l'interface solide-liquide apparaît dans les sections les plus proches de la paroi de sortie du fluide caloporteur (HTF). Au fil du temps, la fraction de fusion augmente et l'interface solide-liquide pénètre davantage dans le PCM. Lors de la fusion, l'interface solide-liquide se déplace à contre-courant des flux HTF suivant la direction axiale. Par conséquent, la forme du front de fusion ne reste pas cylindrique mais elle peut être visualisée comme conique. On peut également noter qu'à la fin du processus de charge (2h40min), le PCM rempli dans le système de stockage à tube concentrique est presque complètement fondu. Cependant, le PCM n'est pas complètement fondu à la fin du processus de charge.

B. Effet de la température d'entrée de l'eau (HTF)

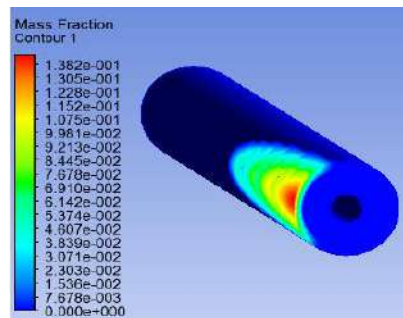
L'effet de la température de l'eau d'entrée est présenté sur les figures 4.41, 4.42 et 4.43. Le contour est affiché pour une température d'entrée de 30°C, 40°C et 50°C respectivement. Le PCM commence à fondre beaucoup plus tôt pour les températures de 50° et 40°C dans le récepteur que pour les températures d'entrée de 20°C et 30°C. Au cours de l'étape de chauffage solide, le transfert de chaleur est dominé par la conduction thermique tandis qu'à travers la phase de transition de phase, la conduction thermique et la convection naturelle se produisent. L'importance de la convection naturelle thermique augmente progressivement à mesure que la zone PCM fondue se développe. La différence de température entre le haut et le bas du PCM diminue, ce qui est attribué à l'amélioration de la convection naturelle thermique en phase liquide. La variation de la fraction de fusion du PCM en fonction du temps et pour différentes températures de l'eau d'entrée est représentée sur les figures 4.41, 4.42 et 4.43. Comme prévu, la température la plus élevée de l'eau d'entrée correspond à la vitesse de fusion la plus élevée, en effet le plus long temps de la vitesse de fusion. Le plus court du temps de fusion correspond au plus long du temps de solidification. Les temps requis pour achever le processus de fusion sont de 3h, 2h10min, 1h40min et 1h lorsque les températures d'entrée sont respectivement égales à 20°C, 30°C, 40°C et 50°C.



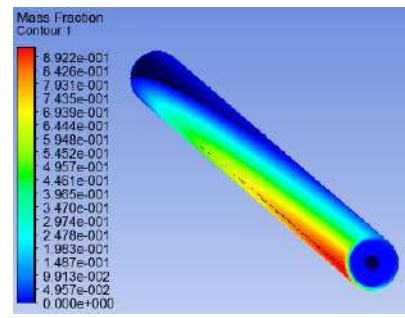
(a)



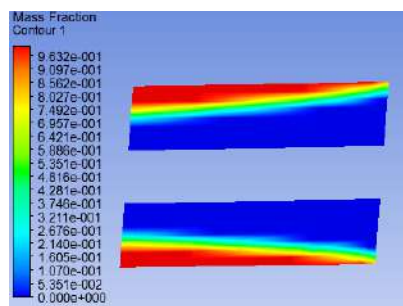
(b)



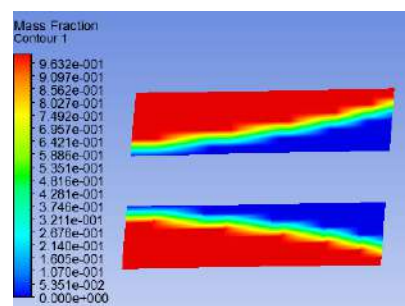
(c)



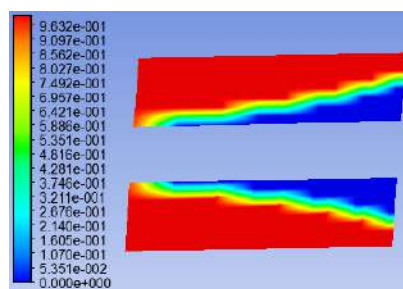
(d)



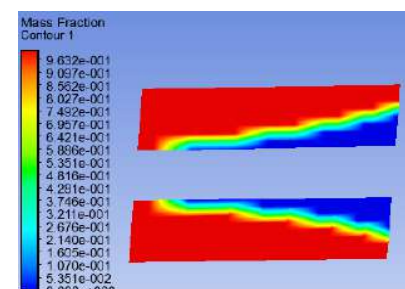
(e)



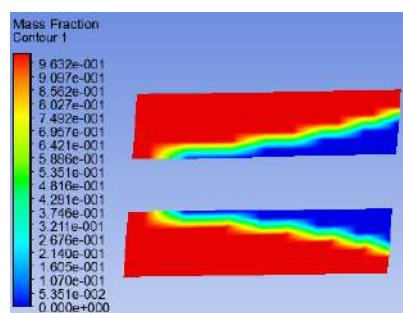
(f)



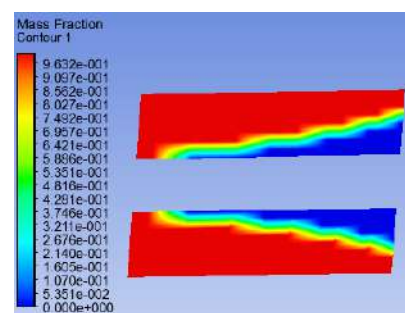
(g)



(h)



(i)



(j)

Figure 4.41: Fraction liquide du domaine PCM pour $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$ et débit massique $\dot{m}=0.005\text{kg/s}$: (a)/(b) après 30 min; (c)/(d) après 40 min; (e) après 1h10 min; (f) après 1h 40 min; (g) après 2h40min; (h) après 3h00min; (i) après 3h20min; and (j) après 3h40min

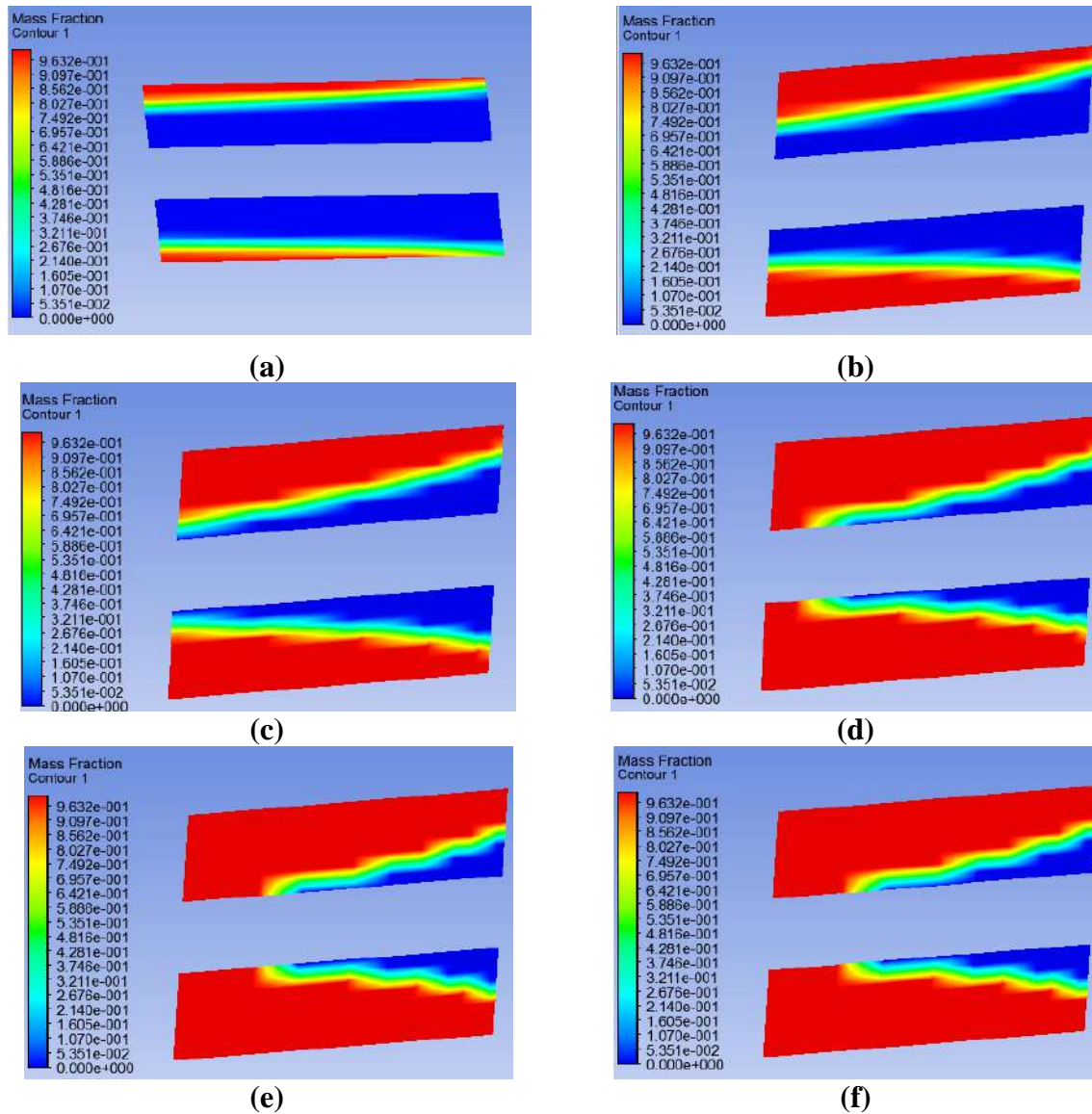


Figure 4.42: Contour de la fraction liquide: domaine MCP, pour $T_{in}=30^{\circ}\text{C}$ et $\dot{m} = .005\text{kg/s}$:
 (a) après 1h; (b) après 40 min; (c) après 1h20 min; (d) après 1h40 min;
 (e) après 2h00min; and (f) après 2h10min

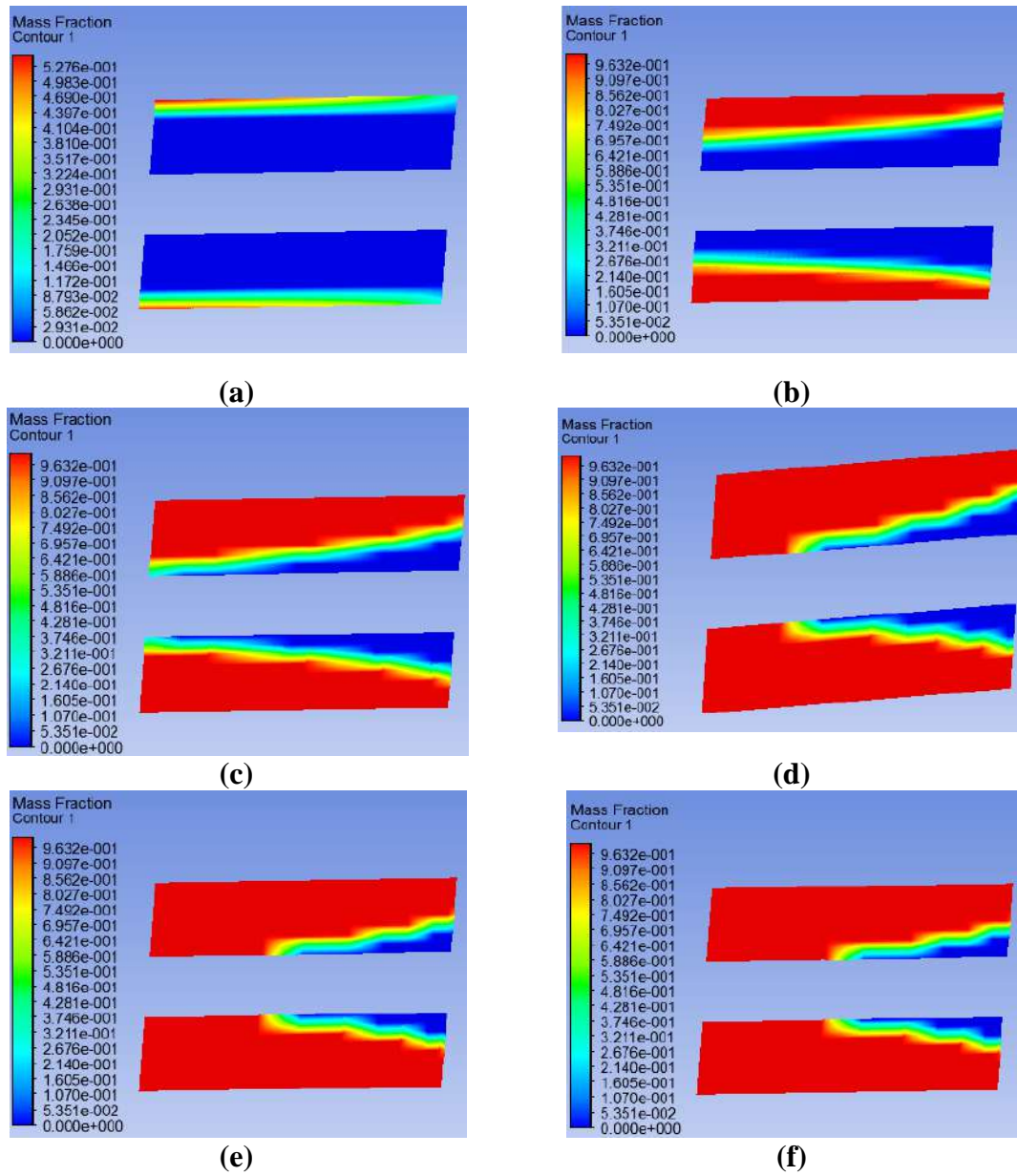


Figure 4.43 : Contour de la fraction liquide: domaine PCM pour $T_{in}=40^{\circ}\text{C}$ et $\dot{m}= 0.005 \text{ kg/s}$:
 (a) après 30min; (b) après 40 min; (c) après 1h00 min; (d) après 1h20 min;
 (e) après 1h40min; and (f) après 2h00min

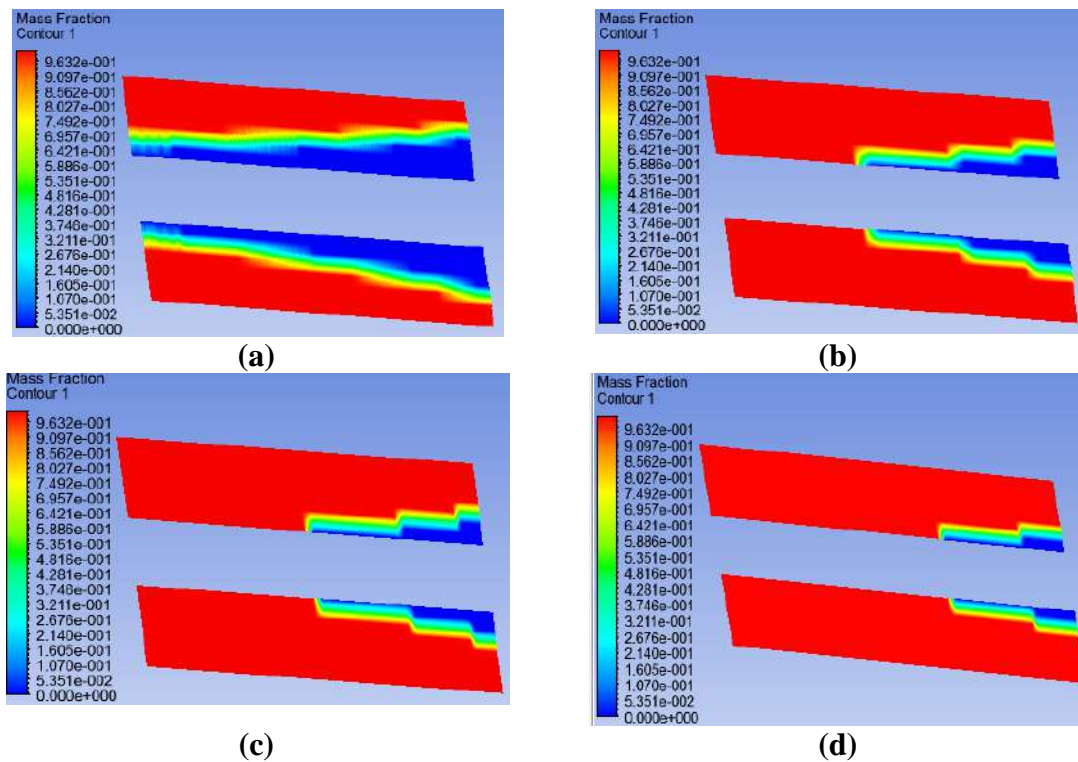


Figure 4.44: Contour de la fraction liquide: domaine PCM pour $T_{in}=50^{\circ}\text{C}$ et $\dot{m}=0.005\text{ kg/s}$: (a) après 40min; (b) après 1h; (c) après 1h20min; and (d) après 1h40min

4.8. Validation du modèle

L'étude expérimentale est utilisée pour valider le modèle CFD en comparant les résultats obtenus à partir des expériences. La température expérimentale de l'eau de sortie atteinte pour les deux jours en utilisant un récepteur concentrique avec PCM, est d'environ 80° et 120°C à 14h00, alors qu'elle est égale à 130°C après 5h30min en utilisant le modèle CFD pour un jour typique, avec une irradiation normale de 1000W/m^2 comme il est présenté dans la figure 4.44.

La température maximale atteinte dans le domaine PCM pour les résultats CFD est égale à 247°C , alors qu'elle est de 232°C à partir d'un résultat expérimental (voir figure 4.45). La variation de la température de sortie maximale et de l'énergie utile (figure 4.46) des résultats CFD est en accord avec les résultats expérimentaux avec un écart de 16,23%. La différence est certainement due au fait que l'irradiation solaire:

Pour le modèle CFD, il a été considéré comme constant. Dans Fluent et pour un concentrateur solaire, nous ne pouvons pas imposer un flux de chaleur solaire non uniforme et variable en fonction du temps, cela nécessite un immense espace mémoire pour le compilateur

numérique. Cependant, dans le cas du niveau expérimental d'irradiation solaire est variable dans le temps. Cependant, la variation sera minimisée en fournissant les valeurs en temps réel comme données d'entrée pour la simulation. L'erreur moyenne absolue en pourcentage (MAPE) comparant les résultats obtenus par la simulation CFD et les résultats expérimentaux pour l'énergie stockée par le matériau à changement de phase MCP pour une journée typique le 21 juillet 2017 est présenté dans le Tableau 4.11.

Tableau 4.11: MAPE CDF et expérimentale de l'énergie stockée

21 Juin (Exp et CFD)	MAPE	
	Energie stockée (CFD, Exp)	T _{out} (CFD, Exp)
	16.23%	16.23%

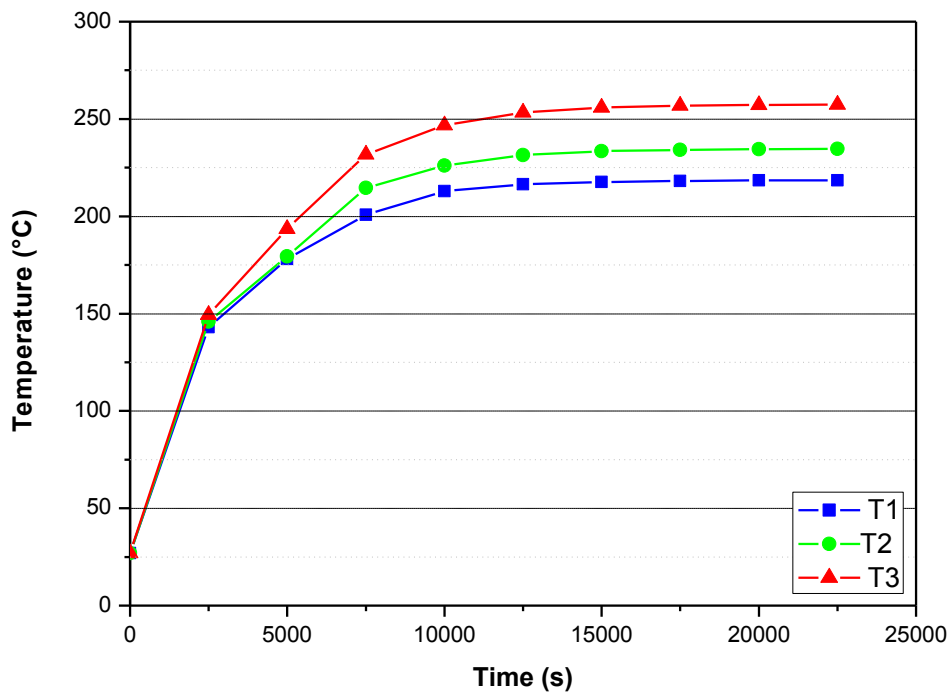


Figure 4.45: Température moyenne du PCM pour les trois positions des thermocouples

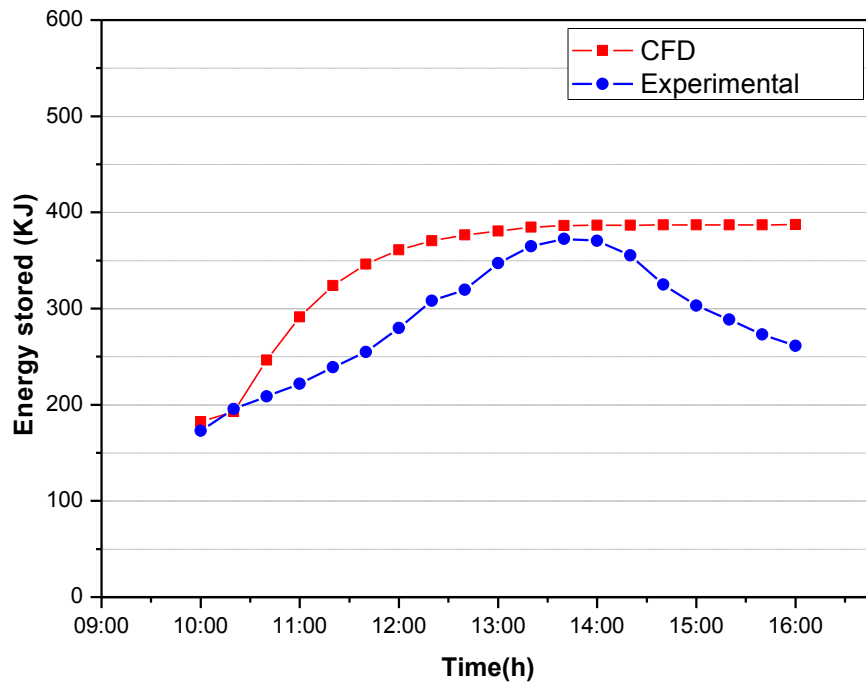


Figure 4.46: Température de sortie pour le tube l'absorbeur avec PCM pour le 21 Juillet, 2017 en fonction du temps, $T_{in}=40^{\circ}\text{C}$

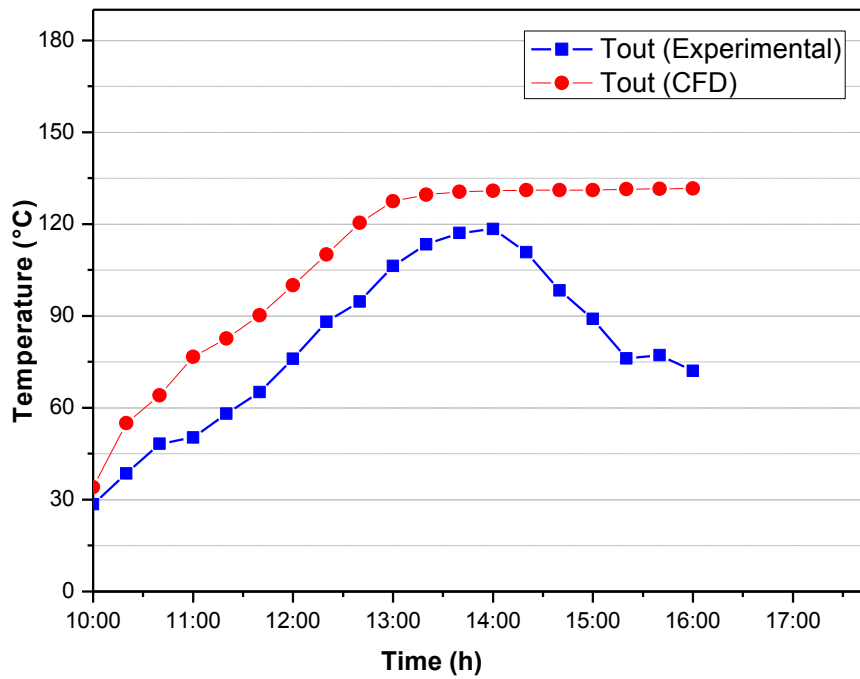


Figure 4.47: Expérimentales et CFD résultats : énergie stockée pour PTC avec tube absorbeur tubes avec PCM pour le 21 Juillet, 2017

Conclusion générale et perspectives

Dans ce travail, on a étudié les problèmes thermiques associés au processus de changement de phase solide/liquide.

On a présenté dans le chapitre 1 des généralités sur les matériaux à changements de phase (MCP) et leur utilisation dans le domaine de stockage de l'énergie thermique par chaleur latente. Suivi d'une aperçu bibliographique sur l'intégration des MCP dans les capteurs solaires.

Dans le chapitre 2, on a présenté la résolution du problème de l'évolution du front de solidification d'un matériau pur dans le cas où le système est gouverné par l'équation de la chaleur en géométrie (1-D). Les méthodes numérique et analytique ont été utilisées pour simuler le problème de changement de phase solide-liquide. les résultats obtenus par ces deux méthodes s'harmonisent plus étroitement durant le temps.

Dans le chapitre 3, nous avons présenté une étude numérique traitant le problème de stockage de l'énergie thermique par chaleur latente en utilisant les matériaux à changement de phase (PCM) dans des unités de stockage double et triple tubes concentriques dont le MCP est inséré dans l'espace annulaire. On a présenté une comparaison quantitative des performances d'une unité de stockage thermique par chaleur latente LHS (Latent Heat Storage), sous l'effet des paramètres de fonctionnement. Les performances thermiques de l'unité de stockage à triples concentriques tubes étudiées ont été comparées à celles correspondant à l'unité de stockage à doubles concentriques tubes. L'énergie thermique stockée par le système à triple concentrique tube est beaucoup plus élevée par rapport à l'unité de stockage à double concentrique tube de 12.5%.

le chapitre 4, présente une contribution à l'étude des transferts thermiques lors de la solidification d'un fluide dans un Capteur solaire . Le travail on a mené une étude numérique et expérimentale sur un modèle perfectionné concernant un capteur solaire cylindro-parabolique concentrique dans lequel un matériau à changement de phase (PCM) est serré entre les deux tubes. Le MCP agira comme un compensateur thermique qui permet au concentrateur solaire parabolique de stabiliser la production d'énergie en l'absence de rayonnement intense ou pendant de courtes conditions nuageuses.

L'efficacité thermique journalière de la nouvelle conception utilisant un tube concentrique avec un PCM était de 6,56% et 8,32% supérieure à celles correspondantes au collecteur sans PCM pour le 21 juillet et le 21 octobre respectivement. Cependant, l'utilisation du PCM augmente l'énergie utile et la température de sortie de l'eau d'une valeur moyenne de 13% et 12% par rapport au simple tube récepteur pour les deux jours.

Le PCM a montré une bonne rétention de chaleur de 2h à 1h40min pour une température d'entrée HTF d'environ 30°C et 40°C respectivement. Ces résultats démontrent l'intérêt de la conception proposée et confirment que l'utilisation d'un PTC avec PCM à la périphérie du récepteur peut améliorer les performances thermiques du système présenté en l'absence de rayonnement intense.

D'après les résultats, on peut conclure que le système proposé est faisable et pourrait être utilisé dans le système cylindro parabolique pour la production directe de vapeur. Les résultats expérimentaux sont en bon accord avec l'étude numérique.

Les résultats montrent que d'un point de vue thermique, l'efficacité du prototype avec PCM est supérieure à celle avec un simple absorbeur, mais d'un point de vue économique il est nécessaire d'étudier la rentabilité du nouveau système en considérant plusieurs critères d'analyse des performances économiques notamment: le prix du PCM, la durée de vie par rapport au nombre de cycle de charge et de décharge possible sous l'effet de la corrosion qui peut dégrader l'état de surface interne du tube absorbeur et le cout du réservoir du stockage. Ceci est utile dans la conception des récepteurs, pour les parties prenantes des capteurs solaires pour les applications industrielles et domestiques avec une meilleure convivialité et efficacité.

Le sel solaire fondu de 60% NaNO_3 et 40% KNO_3 est aujourd'hui utilisé par diverses industries depuis près d'un demi-siècle. Son utilisation comme fluide de stockage thermique bénéficie de cette expérience mais a nécessité l'approfondissement de certains problèmes : en particulier la dégradation du sel et le comportement des aciers qui sont simultanément soumis à l'action du sel et aux chocs thermiques dus aux variations d'ensoleillement.

Dans les travaux futurs, l'étude se concentrera sur l'effet thermique tampon du récepteur solaire à plusieurs PCM.

Références bibliographiques

- [1] Duffie J.A., Beckman W.A., Solar Engineering of Thermal Processes. First ed., John Wiley, New York, 1980.
- [2] Jamadi.F., Arabpour M., et Abdolzadeh M., Performance Comparison of Parabolic and Flat Plate Solar Collectors Utilizing in the Heating System of a Room-And Experimental Investigation, International Journal of Renewable Energy Research, Vol.7, No.4, 2017.
- [3] Calise.F., Damian R.F, and Vanoli.L., Experimental and Numerical Analyses of a Flat Plate Photovoltaic/Thermal Solar Collector, Energies 2017, 10, 491; doi:10.3390/en10040491.
- [4] Zalba B., J.M. Marin, Cabeza.L.F., Melhing.H., Review on thermal energy Storage with phase change materials, heat transfer analysis and applications, Applied Thermal Engineering, 23, 251-283.
- [5] Senthil.R., Recent developments in the design of high temperature solar receivers, International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET) 8 (8) (2017), 1223–1228.
- [6] Mehling.H., Cabeza. L.F., Hippeli.S., and Hiebler.S., Review on thermal energy Storage with phase change material, heat transfer analyze and applications, Applied thermal Engineering volume 23, pp, 251-283, 2003.
- [7] Dincer.I., Marc Rosen Thermal Energy Storage: Systems and Applications Second Edition, edition Wiley, 2010.
- [8] Jessica.K., and Giro.P., Types, method techniques. and applications for micro encapsulated phase change materials (MCP): A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53, 2016, pp 1059-1075.
- [9] Cabeza.L.F., Advances in Thermal Energy Storage Systems 1st Edition, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [10] El-Sebaïi.A., Al-Heniti.S., AlAgel.F., AlGhamdi.A., and A-Marzouki.F., One thousand thermal cycles of magnesium chloride hexahydrate as a promising PCM for indoor solar cooking, Energy Conversion and Management, vol. 52, no. 4, pp. 1771-1777, Apr.2011.
- [11] Farid.M.M, Khudhair.A.M., Razack.S.A., and AlHallaj.S.,A review on phase change energy storage: materials and applications, Energy Conversion and Management, vol. 45, no.910, pp 1597-1615, June2004.

- [12] Sharma.A., Tyagi.V.V., Chen.C.R., and Buddhi.D., Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 2, pp. 318-345, Feb.2009.
- [13] Cabeza L.F., Roca.J., Nogues.M., Mehling.H., and Hiebler.S., Immersion corrosion tests on metal-salt hydrate pairs used for latent heat storage in the 48°C to 58°C temperature range, *Materials and Corrosion*, vol. 53, no.12, pp. 902-907, 2002.
- [14] Liu.M.,Saman.W.,Bruno.F.,Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 2118-2132, 2012.
- [15] Sharma.A., Tyagi.C., Chen.R., and, Buddhi.D., Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol.13, pages 318–345, 2009.
- [16] Kotze.J.P., Von Backström.T.W., and Erens.P.J., A combined latent thermal energy storage and steam generator concept using metallic phase change materials and metallic heat transfer fluids for concentrated solar power, 2011.
- [17] Li.H., Ge.H., Mei.S., and Liu.J., Low melting point liquid metal as a new class of phase .change material: An emerging frontier in energy area, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 21, no. 0, pp. 331-346, 2013.
- [18] Zalba.B., Marin. J. M., Cabeza.L.F., and Mehling.H., Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, no. 3, pp. 251-283,2003.
- [19] Hasnain.S.M., Review on sustainable thermal energy storage technologies, PartI, Heat storage materials and techniques, *Energy research*, Vol.39 (11), pp.127-38, 1997.
- [20] Cabeza.L.F., *Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications*, Woodhead Publish, 2014.
- [21] Azzouz.K., modélisation dynamique d'un système frigorifique domestiquer couple à un matériau a changement de phase ,2007.
- [22] Zalba.J.M.B.and Lazaro.P.,A., Characterization of melting and solidification in a real scale PCM-air heat exchanger: Numerical model and experimental validation. *Energy Convers. Manag.* 52, 1890–1907. 2011.

- [23] George.A. Lane, Solar Heat Storage: Latent Heat Materials, Vol II:Technology, published Taylor & Francis Group 1986.
- [24] Ahmadi.M., Bontemps.S.A.,and Quenar.D.R., Etude expérimentale et simulation numérique du comportement thermique de cellules-test ayant des parois couplant Matériaux à Changement de Phase (MCP) et Super-Isolant (VIP), Congrès Français de Thermique, SFT, Reims,2005.
- [25] Sharma.S.D., Latent heat storage Materials and Systems, a Review, International, Journal of Green Energy, 2: 1-56, Taylor & Francis 2005.
- [26] Agyenim.F., Hewitt.N., Eames.P. and Smyth.M., A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS), Renewable and Sustainable Energy Reviews RSER-811; Page 14.
- [27] Kayugz .K., Experimental and theoretical investigation of latent heat storage of water based solar heating systems, Energy Convers Manage,V, 36, pp,315-323. 1995.
- [28] Sharma.A., Tyagib.V., Chena.C.R. and Buddhib.D., Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews; volume 13, Issue 2, , Pages 318-45.2009.
- [29] Senthil.R., Palanichamy.S., Manish.K., and AvinashL., Effect of integrated phase change material on thermal performance of the point focus concentrated solar receiver, International Journal of Pure and Applied Mathematics vol, 114 pp.135-143, 2017.
- [30] Sharma.A., Tyagi.V.V., Chen.C.R. and Buddhi.D., Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews,Vol,13, pp, 318-345,2009.
- [31] Salva.L.H., González.J E., Dukhan.N., Initial Analysis of PCM Integrated Solar Collectors, J. Sol. Energy Eng.,128(2) : 173-177, 2006.
- [32] Kurklu.A.,Ozmerzi.A., Bilgin.S.,Thermal performance of a water phase change material solar collector, Renewable Energy 26391-399, 2002.
- [33] Bellah.E, Mettaweea.S., Ghazy.M.R. and Assassab.A., Experimental study of a compact PCM solar collector, Energy 31 2958–2968,2006.
- [34] Malvi.C.S., Gupta.A., Gaur.M.K., Crook.R. and Dixon-Hardy.D.W., experimental investigation of heat removal factor in solar flat plate collector for

- various flow configurations, *International Journal of Green Energy* 14(4) (2017), 442-448. DOI: 10.1080/15435075.2016.1268619.
- [35] ElQarnia.H. Numerical analysis of a coupled solar collector latent heat storage unit using various phase change materials for heating the water. *Energy Conversion and Management* 50 (2) (2009), 247–254. DOI: 10.1016/j.enconman.2008.09.038.
- [36] Sandali.M., Boubekri.A., Benhamza.A., Settou.B., Halassa.D., Mennouche.D., A simulation study of a solar collector using phase change materials for air heating application needs, *AIP Conference Proceedings* 1814- 020010-2017. DOI: 10.1063/1.4976229.
- [37] Djim.S., Thiam.A., Sambou.V., and Azilinson.D., Détermination du front de fusion d'une Plaque De Paraffine Soumise à l'ensoleillement. *Journal des Sciences*, vol 9, N°01 pp 34-422009.
- [38] Summers.A. and Edward.K., Design and optimization of an air heating solar collector with integrated phase change material energy storage for use in humidification–dehumidification desalination, *Solar Energy*,vol.86, pp, 3417-3429, 2012.
- [39] Li.Y.Q., He.Y.L., Song.H.J., Xu.C., Wang.W.W.,Numeric alanalysis and parameters optimization of shell-and-tube heat storage unit using three phase change materials, *Renewable Energy*, vol.59, 92-99, 2013.
- [40] Hasan.A., Sarwar.J., Alnoman.H. and Abdelbaqi.S., Yearly energy performance of a photovoltaic-phase change material (PV-PCM) system in hot climate, *Solar Energy*, 146, 417–429. doi:10.1016/j.solener.2017.01.070.
- [41] Klemm.T., Hassabou.A., Abdallan.A. and Andersen.O., Thermal energy storage with phase change materials to increase the efficiency of solar Photovoltaicmodules,*EnergyProcedia*,135,193–202.2017.
- [42] Serale.G., Goia.F. and Perino.M., Numerical model and simulation of a solar thermal collector with slurry Phase Change Material PCM as the heat transfer fluid, *Solar Energy* 134 (2016) 429–444. DOI: 10.1016/j.solener.2016.04.030.
- [43] Chaabane.M., Mhiri.H. and Bournot.P., Thermal performance of an integrated collector storage solar water heater (ICSSWH) with phase change materials PCM, *Energy Conversion and Management* 78 (2014), 897–903. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.07.089.

- [44] Hailiot.D., Goetz.V., Py.X. and Benabdelkarim.M., High performance storage composite for the enhancement of solar domestic hot water systems: Part 1: Storage material investigation, *Solar Energy* 85 (5) (2011) 1021-1027. DOI: 10.1016/j.solener.2011.02.016.
- [45] Giovannelli.A., and Anser Bashir M., Charge and Discharge Analyses of a PCM Storage System Integrated in a High-Temperature Solar Receiver, *Energies* 10(12) (2017), 1943. DOI: 0.3390/en10121943.
- [46] Senthil.R. and Cheralathan.M., Simultaneous testing of a Parabolic Dish Concentrated PCM and Non-PCM Solar Receiver, *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development* 7-6 (2017), pp. 79-86.
- [47] Khalil.A.M., Yilbas.B.S., and Shuja.S.Z., A thermal battery mimicking a concentrated volumetric solar receiver, *Applied Energy* 175 (2016), 16–30. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.04.110.
- [48] Arunkumar.T., Velraj.R., Denkenberger.D., Sathyamurthy.R., Vinothkumar.K., Prokumaran.K., and Ahsan.A., Effect of heat removal on tubular solar desalting system. *Desalination* 379 (2016), 24-33. DOI: 10.1016/j.desal.2015.10.007.
- [49] Senthil.R., Recent developments in the design of high temperature solar receivers, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)* 8 (8) (2017), 1223–1228.
- [50] Kuhe.A., and Edeoja.A.O., Distillate yield improvement using a parabolic dish reflector coupled single slope basin solar still with thermal energy storage using beeswax, *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, Issue 28, 2016 (15), p. 137-146.
- [51] Hassan.E. and Fatah.S., Thermal performance of a simple design solar air heater with built-in thermal energy storage system, *Renewable Energy*, 1995, N°8, vol 6, pp. 1033-1039.
- [52] Jannot.Y., *cours de transfert thermique, thermique solaire*, édition : Mac Graw Hill, octobre 2003.
- [53] Comini.A., Fasano.G., and Primicerio.M., Numerical solution of phase-change problems. *International journal of Heat and Mass Transfer*, 1973. 16(10): p. 1825-1832.

- [54] Chen.W., Yang.Q., Dai.M. and Cheng.S., An analytical solution of the heat transfer Process during contact melting of phase change material inside a horizontal elliptical tube. *Int J Energy Res*, 22, 131-40, 1998.
- [55] Rubinsky.B. and Cravahlo.E.G., A finite element method for the solution of one dimensional phase change problems, *International Journal for Heat and Mass Transfer*,24.pp.1987-1989,1981.
- [56] Ayasoufi.A., Numerical simulation of heat conduction with melting and/or freezing by space-time conservation element and solution element method, PhD thesis, University of Toledo, 2004
- [57] Bricard.A. and Gobin.D., Techniques de l'ingénieur, transferts de chaleur avec changement d'état solide-liquide, BE2012.
- [58] Goodman.T.R., The heat-balance integral and its application to problems involving a change of phase, *Transactions of the ASME*, vol. 80, pp.335-342, 1958.
- [59] Bonacina.C., Comini.G., Fasano.A., Primicerio.M, Numerical solution of phase change problems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 973. 16(10): pp. 1825-1832.
- [60] Henry Huy and Stavros.A, Mathematical modelling of solidification and melting: a review, *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.*4 371–396.1996.
- [61] Cabeza .L.F., Ibanez. M., Solé.C., Roca. J. et Noués.M., Experimentation with a water tank including a PCM module» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol.90, pp. 1273-1282, 2006.
- [62] Goodman.T.R, Application of integral methods to transient non-linear heat transfer. *Advances in Heat Mass Transfer*, p. 51-122, 1964.
- [63] Hu.H.,Argyropoulos.S.A.,Mathematical modelling of solidification and melting, a review, *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.* 4, 1996, pp 371-96.
- [64] Vyshak.N.R., Jilani.G., Numerical analysis of latent heat thermal energy storage system ,*Energy Conversion and Management* 48 (2007) 2161-2168.
- [65] Sarler.B., Stefan's work on solid-liquid phase changes, *Engin Analysis*,vol.16, pp.83-92, 1995.
- [66] Voller.V. and M. Cross, Accurate solutions of moving boundary problems using the enthalpy method, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1. 24(3):p.545-56,981.

- [67] Bart.G.C.J. and Hoogendoorn.C.J., A model for the extracted heat and phase front position in solidification with boundary condition of the third kind, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 35 (2): 375- 382, 1992.
- [68] Hill.J.M., *One Dimensional Stefan Problems: an introduction*, Scientific and Technical, 1987.
- [69] Sahin.A.z., and Dincer.B, Analytical model in of transient phase-change problems, *Int. J. Energy. Res.* 24, 1029-1039, 2000.
- [70] Khedim.A., *l'énergie solaire et utilisation sous sa forme thermique et photovoltaïque*, éditions : centre de publication universitaire, 2003.
- [71] Bernard J., *énergie solaire calculs et optimisations*, édition : ellipses, 2004.
- [72] MARIF.Yacine, thèse doctorat, *Caractérisation d'un concentrateur cylindro-parabolique de dimensions réelles au sud de l'Algérie: Région d'Ouargla*, université de Ouargla, 2015.
- [73] Kalogirou.S.A., *Solar thermal collectors and applications*, *Progress in Energy and Combustion Science* N° 30, pp. 231-295, 2004.
- [74] Benabderahman.A.,Thèse doctorat, *Etude Numérique de l'application des Nanofluides dans l'amélioration du Transfert Thermique dans les Capteurs Solaires*, Université Djilali Lyabes de Sidi Bel abbes, 2108.
- [75] Kalogirou.S.A, *Solar thermal collectors and applications*, *Progress in Energy and Combustion Science* N° 30, pp. 231-295, (2004).
- [76] Arirabl.A., *active solar collectors and their applications*, New York Oxford university press, 1985.
- [77] El Gharbi.N., *Bulletin des Energies Renouvelables*, Publication du Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, N° 21 2011.
- [78] Comité de rédaction, *Bulletin des Energies Renouvelables*, Publication du Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, Semestriel N° 172010.
- [79] Raoux.S.,and Wuttig.M., *Phase Change Materials Science and Applications*, Springer, 2009, DOI 10.1007/978-0-387-84874-7.
- [80] Caron.A.S.,Marty.P., Fourmiguean.J.F and Couturier.R.,*Le stockage de chaleur dans les Matériaux à Changement de Phase étude expérimentale des transferts thermiques dans les échangeurs de stockage latent*, Conférence: Congrès Société Française de Thermique, 2014.

- [81] Elbahjaoui.R., and ElQarnia.H., Thermal performance analysis of combined solar collector with triple concentric-tube latent heat storage systems, *Energy and Buildings* (2018), doi: 10.1016/j.enbuild.2018.02.055.
- [82] Waghmare.A.V., and Pise.A.T., Numerical investigation of concentric cylinder latent heat storage with / without gravity and buoyancy, *Energy Procedia* 75 3133-3141.2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.646.
- [83] Tomasz.A., Kowalewski.D.,and Gobin.D., Phase change with convection: modeling and validation, Springer-Verlag Wien New York in 2004.
- [84] Anisur.M.R., Kibria.M.A., Mahfuz.M.H., Saidur.R., and Metselaar.I.H., cooling of air using heptadecane phase change material in shell and tube arrangement: Analytical and experimental study, *Energy and Buildings* 85 (2014) 98-106.
- [85] Kalogirou.S.A., Solar thermal collectors and applications, *Prog. Energy Combust.Sci.*30,(3).231–295.2004. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2004.02.001>.
- [86] Solar Brother, Accessed May 5, 2017, <https://www.idcook.com/products/s-eflect-175-reflecteur-solaire>.
- [87] Guerrraiche.D.,Benderradji.A., and Benmoussa.H., Facteurs optiques et géométrique caractérisant un concentrateur cylindro-parabolique, *Revue Energies Renouvelables* 14 (2) (2011) 229-238
- [88] Gabiza.E.W., and Aman.A., Characterization and experimental investigation of NaNO₃:KNO₃ as solar thermal energy storage for potential cooking application, *J. Solar Energy* (2016) 6, <https://doi.org/10.1155/2016/2405094> Article ID 2405094.
- [89] Bhujangrao.K.H., Design and development of prototype cylindrical parabolic solar collector for water heating application, *J. Renewable Energy Dev.* 5 (1) (2016) 49–55.
- [90] Yusuf Abdullahi Badamasi, *The Working Principle Of An Arduino*, IEEE,2014.
- [91] <https://www.best-microcontroller-projects.com/max6675.html>,Accessed May5, 2017.
- [92] Daniel.N., Data Acquisition into Excel, LabVIEW, and MATLAB Arduino Based, *The Physics Teacher*, vol.55, April 2017.
- [93] Kalogirou.S.A., *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*, Academic Press, Elsevier Science, 2009, pp. 125–176.

- [94] Li.L., Wang.Z.F., Li.J.B., and Lei.D.Q., A vacuum reliability analysis of parabolic trough receiver, *Sol.Energy.Mater.SOL.Cells*, 105, pp. 302-308.2012.
- [95] Eck.M., Feldhoff.J.F., and Uhlig.R., Thermal modelling and simulation of parabolic trough receiver tubes. *Proceedings of the ASME 4th International Conference on Energy Sustainability*, 2010. Phoenix
- [96] Wendelin.T., SolTRACE: a new optical modeling tool for concentrating solar optics, *ASME 2003 International Solar Energy Conference*, pp. 253–260. DOI: 10.1115/ISEC2003-44090.
- [97] Marif.Y., Benmoussa.H., Bouguettaia.H., Belhadj.M. and Zerrouki.M. Numerical simulation of solar parabolic trough collector performance in the Algeria Saharan region. *Energy. Convers. Manage.* 85, 2014,521-529.
- [98] Cheng Z.D., HeF.Y.L., CuiR.Q., XuY. J.,and Tao.B., Numerical simulation of a parabolic trough solar collector with non-uniform solar flux conditions by coupling FVM and MCRT method. *Sol. Energy.* 86, 2012, 1770-1784. doi:10.1016/j.solener.2012.02.039
- [99] He.Y., Xiao.J., Cheng.Z.,Tao.Y., A MCRT and FVM coupled simulation method for energy conversion process in parabolic trough solar collector, *Renew. Energy.* 36, 2011, 976-985, doi:10.1016/j.renene.2010.07.017.
- [100] Xiao.J., He.Y.,Cheng.Z.,Tao.Y.,Xu.R, Performance analysis of parabolic trough solar collector, *J, Eng. Thermophys.*, 30(5), 729-733, 2009.

Résumé

Dans ce travail nous avons présenté une étude numérique et expérimentale afin d'étudier les performances d'un concentrateur solaire cylindro parabolique à petite échelle intégré à un système de stockage d'énergie thermique. Une nouvelle conception du tube absorbeur a été présentée utilisant un matériau de changement de phase (MCP) pour stocker l'énergie thermique. Un nouveau modèle d'un concentrateur solaire cylindro parabolique a été proposé et construit avec un absorbeur à tube concentrique utilisant un matériau à changement de phase inséré dans l'espace annulaire. L'absorbeur est considéré comme un composant de stockage temporaire de l'énergie thermique. Le MCP agit comme un compensateur thermique qui permet au concentrateur solaire parabolique de stabiliser la production d'énergie en l'absence de rayonnement intense ou pendant de courtes conditions nuageuses. Le PCM utilisé est un sel composé d'un mélange de 60% NaNO_3 et 40% KNO_3 . L'énergie solaire est convertie en chaleur, stockée dans le matériau de changement de phase et transmet au fluide caloporteur (eau) circulant dans le tube intérieur du récepteur. La simulation numérique du système est étudiée en utilisant un logiciel CFD Ansys Fluent 17.1. Les résultats numériques sont comparés aux résultats expérimentaux, qui ont été effectués avec et sans matériau de changement de phase dans le tube récepteur. La température maximale de sortie de l'eau obtenue en utilisant matériaux de changement de phase dans le tube récepteur est d'environ 16,80% et 14,86 % plus élevée que pour le système à simple tube pour le 21 juillet et le 21 octobre respectivement. Le rendement thermique journalier du concentrateur solaire augmente de 6,56 % et de 8,32 % respectivement pendant les deux journées typiques à l'aide d'un récepteur avec un tube concentrique. Le matériau à changement de phase a montré une bonne rétention de 2h à 1h40min pour une température d'entrée du fluide caloporteur de 30°C et 40°C.

Mots-clés: capteur cylindro parabolique, Matériel à changement de phase, Énergie solaire, Stockage de chaleur, Transfert de chaleur, CFD.

ABSTRACT

The present work present numerical and experimental investigations to study the performance of a small-scale parabolic trough solar concentrator integrated with thermal energy storage system. A new design of receiver which uses the phase change material to store the thermal energy is built. A parabolic-trough solar concentrator was proposed and constructed using a concentric absorber tube with phase change material. The absorber is considered as a temporary thermal heat storage component. The heat storage-recovery mechanism will act as a thermal compensator that allows the parabolic trough solar concentrator to stabilizing energy output during the absence of intense radiation or for short time cloudy conditions. The PCM used a binary salt composed of a mixture of 60% NaNO_3 and 40% KNO_3 , filling the annular space of the absorber tube. Solar energy is converted to heat, stored in the phase change material and is discharged to cold water, which is the final heat transfer fluid in the inner pipe of the receiver. The simultaneous testing of the receiver with and without phase change material is investigated. A commercial computational fluid dynamics model of the whole system is presented and numerical results are compared to experimental results, which were conducted with and without phase change material in the receiver tube. The maximum outlet water temperature achieved using phase change material in the receiver tube is about 16.80% and 14.86% higher than the simple tube for 21 July and 21 October respectively. The daily thermal efficiency of the parabolic trough solar concentrator increases by 6.56% and 8.32% respectively for a both days using a receiver with a phase change material concentric tube. The phase change material showed good heat retention of 2 h to 1 h 40 min for water inlet temperature 30°C and 40°C respectively.

Keywords: Parabolic trough collector, Phase change material, Solar energy, Heat storage, Heat transfer, CFD

ملخص

يُدرج هذا العمل ضمن الدراسات العددية والتجريبية ، حيث تم دراسة أداء مركز شمسي مكافئ صغير الحجم متكامل مع نظام تخزين الطاقة الحرارية، وتم بناء تصميم جديد من المتلقي الذي يستخدم مادة تغيير الحالة لتخزين الطاقة الحرارية، مع اقتراح استخدام مكثف شمسي مكافئ وأنبوب امتصاص متحد المركز مع مواد تغيير الحالة، حيث أنبوب امتصاص مكوناً مؤقتاً لتخزين الطاقة الحرارية، ويتم استعادة الحرارة كتعويض حراري يسمح للمركز الشمسي للحوض المكافئ بنشيط إنتاج الطاقة أثناء غياب الإشعاع المكثف أو غياب الشمس لفترة قصيرة، استخدم PCM ملح ثنائي يتكون من خليط من 60% NaNO_3 و 40% KNO_3 في ملئ المساحة الحلقية لأنبوب الامتصاص ليتم تحويل الطاقة الشمسية إلى حرارة وتخزينها في مرحلة تغيير الحالة ويتم تصريفها إلى الماء البارد وهو السائل الناقل للحرارة النهائي في الأنبوب الداخلي للمستقبل . يتم التحقيق في الاختبار المتزامن للمستقبل مع مواد تغيير الحالة أو بدونها. يتم تقديم نموذج ديناميات السوائل الحسابية التجارية للنظام بأكمله ويتم مقارنة النتائج العددية بالنتائج التجريبية التي أجريت مع أو بدون مواد تغيير الحالة في أنبوب الاستقبال ، تكون درجة حرارة المياه منفذ الحد الأقصى الذي تحقق باستخدام مواد تغيير المرحلة في أنبوب المتلقي هو حوالي 16.80% و 14.86% أعلى من أنبوب بسيط ل21 جويلية و 21 أكتوبر على التوالي ، كانت الكفاءة الحرارية اليومية للمحور الشمسي للحوض المكافئ يزيد بنسبة 6.56% و 8.32% على التوالي لليومين باستخدام جهاز استقبال مع أنبوب المواد تغيير الحالة. تم التوصل إلى أن الاحتفاظ بالحرارة لمواد تغيير الحالة جيد من 1ساعة إلى 2ساعة و40 دقيقة لدرجة حرارة تسرب المياه 30 درجة مئوية و 40 درجة مئوية.

الكلمات المفتاحية: المجمع الاسطواني الشمسي، المواد تغيير الحالة ، الطاقة الشمسية، تخزين الحرارة، نقل الحرارة، CFD.