

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



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



Thèse

Préparée au sein du laboratoire d'étude des systèmes énergétiques industriels

Présentée pour l'obtention du titre de:
Docteur en Sciences en Mécanique
Option: Energétique

Sous le Thème:

**Stockage de l'énergie thermique: Etude et optimisation des
procédés**

Présentée par:
Fouzi BENMOUSSA

Soutenue publiquement le 26/09/2018 devant le jury composé de:

Cherif BOUGRIOU	Prof.	Université de Batna 2	Président
Ahmed BENZAOUI	Prof.	Université d'Alger (USTHB)	Rapporteur
Hocine BENMOUSSA	Prof.	Université de Batna 2	Co-Rapporteur
Samir RAHAL	Prof.	Université de Batna 2	Examineur
Saadi BOUGOUL	Prof.	Université de Batna 1	Examineur
Belgacem ADOUANE	Prof.	Université de Batna 1	Examineur

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicaces

Je dédie ce travail:

A ma mère et mon père qui me sont les plus chers au monde

A ma femme

A mes frères et sœurs, à ma famille

A tous mes amis et collègues

A tous ceux qui m'ont aidé à finir cette thèse.

...Fouzi BENMOUSSA...

Remerciements

Mes remerciements vont tout premièrement à dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donné durant tous ces années d'études.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à mon directeur de thèse le Professeur Ahmed BENZAOUI et mon co-directeur, le Professeur Hocine BENMOUSSA, pour la qualité de sujet qu'ils m'ont proposé, pour ses encourageants conseils et pour l'entière disponibilité qu'ils m'ont accordé durant toutes les étapes de la réalisation de cette thèse, Grand Merci.

J'adresse aussi mes vifs remerciements aux membres du jury, le Professeur Samir RAHAL de l'université de Batna 2, ainsi que le Professeur Saadi BOUGOUL et le Professeur Belgacem ADOUANE de l'université de Batna 1 d'avoir accepté de lire et juger la présente thèse, et ce malgré leurs préoccupations et leur emploi du temps assez chargé.

Je tiens à remercier également le Professeur Cherif BOUGRIOU de l'université de Batna 2 d'avoir accepté de présider mon jury ainsi que de m'avoir accueilli dans son bureau, où j'ai pu exploiter les informations nécessaires qui m'ont permis de finir mes travaux.

En fin, mes remerciements vont également à tous ceux et celles qui de près ou de loin m'ont apporté aide et encouragement, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

...Fouzi BENMOUSSA...

Table des matières

Remerciement	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	

Nomenclature.....	1
Introduction générale.....	3

Chapitre I: Stockage thermique: Généralités et synthèse bibliographique

Introduction	7
I.1. Etude bibliographique.....	7
I.1.1. Objectifs de l'étude bibliographique.....	7
I.2. Stockage de l'énergie thermique.....	8
I.2.1. Nécessité de stockage thermique.....	8
I.2.2. Fonctionnement d'un procédé de stockage d'énergie thermique.....	9
I.2.3. Classification des systèmes de stockage thermique.....	9
I.2.4. Critères de choix et de conception d'un système de stockage.....	10
I.3. Différentes techniques de stockage de l'énergie thermique.....	11
I.3.1. Stockage d'énergie thermique par chaleur sensible.....	11
I.3.1.1. Principe de fonctionnement.....	11
I.3.1.2. Matériaux de stockage par chaleur sensible.....	11
I.3.1.3. Critères de choix d'un matériau de stockage sensible.....	12
I.3.1.4. Température de stockage par chaleur sensible.....	13
I.3.1.5. Solutions technologiques: Stockage par chaleur sensible.....	13
I.3.2. Stockage d'énergie thermique par chaleur latente.....	16
I.3.2.1. Principe de fonctionnement.....	16
I.3.2.2. Classification des matériaux à changement de phase.....	17
I.3.2.3. Phénomènes thermo-physiques liés aux PCM.....	20
I.3.2.4. Critères de choix d'un matériau à changement de phase.....	21
I.3.2.5. Solutions technologiques: Stockage par chaleur latente.....	22
I.4. Comparaison des différents types de stockage d'énergie thermique.....	23
I.5. Synthèse du chapitre I.....	24
Bibliographie du chapitre I.....	25

Chapitre II: Stockage thermique par chaleur latente: Système shell-and-tube avec PCM

Introduction.....	27
II.1. Etat de l'art sur les unités shell-and-tube avec PCM.....	28
II.1.1. Analyse comparative et conclusion.....	33
II.2. Modèle physique et équations gouvernantes.....	34
II.2.1. Description du système considéré.....	34
II.2.2. Hypothèses simplificatrices.....	35
II.2.3. Formulation mathématique.....	36
II.2.3.1. Formulation mathématique pour HTF.....	36
II.2.3.2. Conditions initiales et aux limites pour HTF.....	36
II.2.3.3. Formulation enthalpique pour PCM.....	36
II.2.3.4. Conditions initiales et aux limites pour PCM.....	38
II.2.3.5. Présentation des conditions aux limites.....	39
II.2.4. Expression des nombres adimensionnels.....	40
II.3. Méthodes d'analyse des problèmes avec changement de phase.....	41
II.3.1. Méthode à maillage mobile.....	41
II.3.2. Méthode à maillage fixe.....	42
II.3.2.1. Méthode enthalpie-porosité.....	42
II.4. Procédure de résolution et validation.....	43
II.4.1. Etude du maillage.....	43
II.4.2. Etude du time step size.....	44
II.4.3. Validation.....	45
II.5. Résultats et discussion.....	47
II.5.1. Evolution instationnaire de la température de PCM.....	47
II.5.2. Evolution instationnaire de la fraction liquide de PCM.....	48
II.5.3. Effet de la température d'entrée du fluide caloporteur HTF.....	50
II.5.3.1. Variation de la température de PCM.....	50
II.5.3.2. Variation de la fraction liquide.....	51
II.5.3.3. Variation du temps de fusion et de solidification.....	52
II.5.3.4. Variation de l'énergie totale stockée.....	53
II.5.4. Effet de la vitesse d'entrée du fluide caloporteur HTF.....	54
II.5.4.1. Variation de la température de PCM.....	54
II.5.4.2. Variation de la fraction liquide.....	55
II.5.4.3. Variation du temps de fusion et de solidification.....	56
II.5.4.4. Variation de l'énergie totale stockée.....	57
II.5.5. Effet du rayon interne de tube.....	58
II.5.5.1. Variation de la fraction liquide.....	58
II.5.5.2. Variation du temps de fusion et de solidification.....	59
II.5.5.3. Variation de l'énergie totale stockée.....	60
II.6. Synthèse du chapitre II.....	61

Bibliographie du chapitre II.....	62
-----------------------------------	----

Chapitre III: Stockage thermique par chaleur latente: Système shell-and-tube avec multiple PCMs

Introduction.....	65
III.1. Techniques d'amélioration du transfert thermique.....	66
III.1.1. Techniques d'amélioration agissant sur le PCM.....	66
III.1.2. Augmentation de la surface d'échange.....	67
III.2. Etat de l'art sur les unités shell-and-tube avec multiple PCMs.....	69
III.2.1. Analyse comparative et conclusion.....	72
III.3. Modèle physique et équations gouvernantes.....	72
III.3.1. Modèle physique pour l'unité de stockage.....	72
III.3.2. Propriétés thermo-physiques du HTF et de PCMs.....	73
III.3.3. Formulation mathématique.....	74
III.3.3.1. Formulation mathématique pour HTF et PCMs.....	74
III.3.3.2. Conditions initiales et aux limites pour HTF.....	75
III.3.3.3. Conditions initiales et aux limites pour PCMs.....	75
III.4. Résultats et discussion.....	76
III.4.1. Cas test avec vitesse d'entrée du fluide caloporteur 0.004 m/s.....	76
III.4.1.1. Comportement thermique de l'unité de stockage.....	76
III.4.1.2. Température de sortie du fluide caloporteur.....	79
III.4.1.3. Evolution du taux de stockage.....	80
III.4.1.4. Evolution du temps de fusion et solidification pour chaque PCM	81
III.4.1.5. Evolution de l'énergie totale stockée dans chaque PCM.....	82
III.4.2. Cas test avec vitesse d'entrée du fluide caloporteur 0.03 m/s.....	83
III.4.2.1. Comportement thermique de l'unité de stockage.....	83
III.4.2.2. Evolution du temps de fusion pour chaque PCM.....	84
III.4.2.3. Evolution de l'énergie totale stockée dans chaque PCM.....	85
III.5. Synthèse du chapitre III.....	86
Bibliographie du Chapitre III.....	88

Chapitre IV: Effet des propriétés thermo-physiques des PCMs sur les performances de stockage

Introduction.....	90
IV.1. Description de l'unité considérée.....	91
IV.1.1. Modèle physique pour l'unité de stockage.....	91
IV.1.2. Propriétés thermo-physiques du HTF et de PCMs.....	91
IV.2. Résultats et discussion.....	92
IV.2.1. Effet de la température de fusion de chaque PCM.....	92
IV.2.2. Effet de la conductivité thermique.....	94
IV.2.3. Effet de la chaleur spécifique.....	95
IV.2.4. Effet de l'enthalpie de changement de phase.....	97
IV.3. Synthèse du chapitre IV.....	99
Conclusion générale et perspectives.....	100
Publication.....	102

Liste des figures

Chapitre I: Stockage thermique: Généralités et synthèse bibliographique

- Figure. I.1. Évolution de l'apport solaire et de la demande de chaleur dans le secteur résidentiel.
- Figure. I.2. Classification des systèmes de stockage thermique.
- Figure. I.3. Principe de fonctionnement d'un chauffe-eau solaire direct.
- Figure. I.4. Maison individuelle avec des collecteurs solaire.
- Figure. I.5. Chauffage solaire urbain. Tiré de (Quaschnig, 2014).
- Figure. I.6. Communauté Drake Landing. Tiré de (The Edmonton Journal, 2008).
- Figure. I.7. Principe de fonctionnement d'une centrale à tour.
- Figure. I.8. Photo de la centrale Thémis (France).
- Figure. I.9. Principe de fonctionnement des matériaux à changements de phase.
- Figure. I.10. Classification des matériaux à changement de phase.
- Figure. I.11. Principe de fonctionnement d'une centrale solaire fonctionne avec PCM.
- Figure. I.12. Faisceau de tube contenu dans le module de stockage.

Chapitre II: Stockage thermique par chaleur latente: Système shell-and-tube avec PCM

- Figure. II.1. Fonctionnement d'un système de stockage latent montre le circuit de stockage/déstockage.
- Figure. II.2. Dispositif expérimental de stockage.
- Figure. II.3. Schéma de l'unité de stockage.
- Figure. II.4a. Récipient de stockage par chaleur latente.
- Figure. II.4b. Unité de stockage par chaleur latente.
- Figure. II.5. Enthalpie de PCM en fonction de la température (Transition isothermique).
- Figure. II.6. Enthalpie de PCM en fonction de la température (Transition non-isothermique).
- Figure. II.7. Présentation des conditions aux limites.
- Figure. II.8. Différents types de maillage testés.
- Figure. II.9a. Variation de température pour différents maillages.
- Figure. II.9b. Variation de température pour différents maillages (Résultats agrandis).
- Figure. II.10a. Variation de température pour différents time step.
- Figure. II.10b. Variation de température pour différents time step (Résultats agrandis).
- Figure. II.11a. Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux, $T_{f,in}=305.7 K$.
- Figure. II.11b. Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux, $T_{f,in}=310.7 K$.
- Figure. II.11c. Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux, $T_{f,in}=320.7 K$.
- Figure. II.12a. Evolution instationnaire de la température de PCM durant le mode de fusion ($T_{f,in}=305.7 K$).
- Figure. II.12b. Evolution instationnaire de la température de PCM durant le mode de fusion ($T_{f,in}=310.7 K$).
- Figure. II.13a. Evolution instationnaire de la température de PCM durant le mode de solidification ($T_{f,in}=295.7 K$).
- Figure. II.13b. Evolution instationnaire de la température de PCM durant le mode de solidification ($T_{f,in}=290.7 K$).

- Figure. II.14a. Evolution instationnaire de la fraction liquide durant le mode de fusion ($T_{f,in}=305.7\text{ K}$).
- Figure. II.14b. Evolution instationnaire de la fraction liquide durant le mode de fusion ($T_{f,in}=310.7\text{ K}$).
- Figure. II.15a. Evolution instationnaire de la fraction liquide durant le mode de solidification ($T_{f,in}=295.7\text{ K}$).
- Figure. II.15b. Evolution instationnaire de la fraction liquide durant le mode de solidification ($T_{f,in}=290.7\text{ K}$).
- Figure. II.16. Mécanisme de changement de phase à l'intérieur de l'unité durant la fusion et la solidification.
- Figure. II.17a. Effet de la température d'entrée du fluide HTF sur la variation de la température durant la fusion, $A(x=0.51, r=0.0099)\text{ m}$.
- Figure. II.17b. Effet de la température d'entrée du fluide HTF sur la variation de la température durant la fusion, $B(x=0.95, r=0.0089)\text{ m}$.
- Figure. II.18a. Effet de la température d'entrée du fluide HTF sur la variation de la température durant la solidification, $A(x=0.51, r=0.0099)\text{ m}$.
- Figure. II.18b. Effet de la température d'entrée du fluide HTF sur la variation de la température durant la solidification, $B(x=0.95, r=0.0089)\text{ m}$.
- Figure. II.19a. Effet de la température d'entrée du fluide HTF sur la variation de la fraction liquide, Fusion, $A(x=0.51, r=0.0099)\text{ m}$.
- Figure. II.19b. Effet de la température d'entrée du fluide HTF sur la variation de la fraction liquide, Solidification, $A(x=0.51, r=0.0099)\text{ m}$.
- Figure. II.20a. Effet de la température d'entrée du fluide HTF sur la variation du temps de fusion.
- Figure. II.20b. Effet de la température d'entrée du fluide HTF sur la variation du temps de solidification.
- Figure. II.21. Energie stockée pour différentes températures d'entrées du fluide HTF.
- Figure. II.22a. Effet de la vitesse d'entrée du fluide HTF sur la variation de la température durant la fusion, $A(x=0.51, r=0.0099)\text{ m}$.
- Figure. II.22b. Effet de la vitesse d'entrée du fluide HTF sur la variation de la température durant la fusion, $B(x=0.95, r=0.0089)\text{ m}$.
- Figure. II.23a. Effet de la vitesse d'entrée du fluide HTF sur la variation de la température durant la solidification, $A(x=0.51, r=0.0099)\text{ m}$.
- Figure. II.23b. Effet de la vitesse d'entrée du fluide HTF sur la variation de la température durant la solidification, $B(x=0.95, r=0.0089)\text{ m}$.
- Figure. II.24a. Effet de la vitesse d'entrée du fluide HTF sur la variation de la fraction liquide, Fusion, $A(x=0.51, r=0.0099)\text{ m}$.
- Figure. II.24b. Effet de la vitesse d'entrée du fluide HTF sur la variation de la fraction liquide, Solidification, $A(x=0.51, r=0.0099)\text{ m}$.
- Figure. II.25a. Effet de la vitesse d'entrée du fluide HTF sur la variation du temps de fusion.
- Figure. II.25b. Effet de la vitesse d'entrée du fluide HTF sur la variation du temps de solidification.
- Figure. II.26. Energie stockée pour différentes vitesses d'entrées du fluide HTF.
- Figure. II.27a. Effet du rayon interne de tube sur la variation de la fraction liquide, Fusion, $A(x=0.51, r=0.0099)\text{ m}$.
- Figure. II.27b. Effet du rayon interne de tube sur la variation de la fraction liquide, Solidification, $A(x=0.51, r=0.0099)\text{ m}$.
- Figure. II.28a. Effet du rayon interne de tube sur la variation du temps de fusion.
- Figure. II.28b. Effet du rayon interne de tube sur la variation du temps de solidification.
- Figure. II.29. Energie stockée pour différents rayons internes du tube.

Chapitre III: Stockage thermique par chaleur latente: Système shell-and-tube avec multiple PCMs

- Figure. III.1. Unité de stockage couplée avec un collecteur solaire pour le chauffage de l'eau domestique.
- Figure. III.2. Chaleur latente et conductivité thermique d'un matériau composite en fonction de la quantité de graphite.
- Figure. III.3. Unité de stockage thermique rempli avec multiples PCMs.
- Figure. III.4. Technique d'encapsulation des PCMs, a) Container à lit fixe avec capsules, b) Géométries des macrocapsules.
- Figure. III.5. Echangeurs ailetés, a) Echangeur à ailettes transversales; b-c-d) Echangeur à ailettes longitudinales.
- Figure. III.6. Dispositif expérimental montre des capsules cylindriques remplis avec PCMs.
- Figure. III.7. Schéma de l'unité de stockage thermique remplie avec trois types de PCMs.
- Figure. III.8. Schéma de l'unité de stockage remplie avec deux types de paraffine.
- Figure. III.9. Modèle physique de l'unité de stockage.
- Figure. III.10a. Evolution instationnaire de la température de PCM1 et PCM2 durant le mode de fusion ($T_{f,in}=338\text{ K}$).
- Figure. III.10b. Evolution instationnaire de la température de PCM1 et PCM2 durant le mode de fusion ($T_{f,in}=343\text{ K}$).
- Figure. III.10c. Evolution instationnaire de la température de PCM1 et PCM2 durant le mode de fusion ($T_{f,in}=353\text{ K}$).
- Figure. III.11a. Evolution instationnaire de la température de PCM1 et PCM2 durant le mode de solidification ($T_{f,in}=318\text{ K}$).
- Figure. III.11b. Evolution instationnaire de la température de PCM1 et PCM2 durant le mode de solidification ($T_{f,in}=313\text{ K}$).
- Figure. III.11c. Evolution instationnaire de la température de PCM1 et PCM2 durant le mode de solidification ($T_{f,in}=303\text{ K}$).
- Figure. III.12a. Température de sortie du fluide caloporteur durant la fusion.
- Figure. III.12b. Température de sortie du fluide caloporteur durant la solidification.
- Figure. III.13a. Taux de stockage thermique durant le processus de fusion.
- Figure. III.13b. Taux de stockage thermique durant le processus de solidification.
- Figure. III.14a. Variation du temps de fusion pour différents températures d'entrées.
- Figure. III.14b. Variation du temps de solidification pour différents températures d'entrées.
- Figure. III.15a. Variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=338\text{ K}$).
- Figure. III.15b. Variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=343\text{ K}$).
- Figure. III.15c. Variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=353\text{ K}$).
- Figure. III.16a. Variation instationnaire de la température de PCM1 et PCM2 durant le mode de fusion ($T_{f,in}=338\text{ K}$).
- Figure. III.16b. Variation instationnaire de la température de PCM1 et PCM2 durant le mode de fusion ($T_{f,in}=343\text{ K}$).
- Figure. III.16c. Variation instationnaire de la température de PCM1 et PCM2 durant le mode de fusion ($T_{f,in}=353\text{ K}$).
- Figure. III.17. Variation du temps de fusion pour différents températures d'entrées.
- Figure. III.18a. Variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=338\text{ K}$).
- Figure. III.18b. Variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=343\text{ K}$).
- Figure. III.18c. Variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=353\text{ K}$).

Chapitre IV: Effet des propriétés thermo-physiques des PCMs sur les performances de stockage

- Figure. IV.1a. Schéma de l'unité de stockage remplie avec trois types de paraffine.
- Figure. IV.1b. Modèle physique de l'unité de stockage.
- Figure. IV.2a. Effet de la température de fusion sur la variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=343\text{ K}$).
- Figure. IV.2b. Effet de la température de fusion sur la variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=348\text{ K}$).
- Figure. IV.2c. Effet de la température de fusion sur la variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=358\text{ K}$).
- Figure. IV.3. Influence de la température de fusion sur l'énergie stockée dans chaque PCM et sur le temps de stockage estimé.
- Figure. IV.4a. Effet de la conductivité thermique sur la variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=343\text{ K}$).
- Figure. IV.4b. Effet de la conductivité thermique sur la variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=348\text{ K}$).
- Figure. IV.4c. Effet de la conductivité thermique sur la variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=358\text{ K}$).
- Figure. IV.5. Influence de la conductivité thermique sur l'énergie stockée dans chaque PCM et sur le temps de stockage estimé.
- Figure. IV.6a. Effet de la chaleur spécifique sur la variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=343\text{ K}$).
- Figure. IV.6b. Effet de la chaleur spécifique sur la variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=348\text{ K}$).
- Figure. IV.6c. Effet de la chaleur spécifique sur la variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=358\text{ K}$).
- Figure. IV.7. Influence de la chaleur spécifique sur l'énergie stockée dans chaque PCM et sur le temps de stockage estimé.
- Figure. IV.8a. Effet de l'enthalpie sur la variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=343\text{ K}$).
- Figure. IV.8b. Effet de l'enthalpie sur la variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=348\text{ K}$).
- Figure. IV.8c. Effet de l'enthalpie sur la variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=358\text{ K}$).
- Figure. IV.9. Influence de l'enthalpie de changement de phase sur l'énergie stockée dans chaque PCM et sur le temps de stockage estimé.

Liste des tableaux

Chapitre I: Stockage thermique: Généralités et synthèse bibliographique

- Tableau. I.1. Critères de choix et de conception d'un système de stockage.
- Tableau. I.2. Caractéristiques de quelques matériaux de stockage par chaleur sensible.
- Tableau. I.3. Propriétés thermo-physiques des paraffines.
- Tableau. I.4. Exemple des propriétés physiques de quelques paraffines.
- Tableau. I.5. Propriétés thermo-physiques des acides gras.
- Tableau. I.6. Propriétés thermo-physiques des principaux sels hydratés.
- Tableau. I.7. Comparaison des avantages et inconvénients des PCM organiques et inorganiques.
- Tableau. I.8. Critères à respecter lors du choix d'un matériau à changement de phase.
- Tableau. I.9. Caractéristiques des deux systèmes de stockage thermique.

Chapitre II: Stockage thermique par chaleur latente: Système shell-and-tube avec PCM

- Tableau. II.1. Propriétés thermo-physiques du n-octadécane.
- Tableau. II.2. Propriétés thermo-physiques du fluide caloporteur.

Chapitre III: Stockage thermique par chaleur latente: Système shell-and-tube avec multiple PCMs

- Tableau. III.1. Propriétés thermo-physiques de PCM1 et PCM2.
- Tableau. III.2. Propriétés thermo-physiques du fluide caloporteur.

Chapitre IV: Effet des propriétés thermo-physiques des PCMs sur les performances de stockage

- Tableau. IV.1. Propriétés thermo-physiques de PCM1, PCM2 et PCM3.
- Tableau. IV.2. Propriétés thermo-physiques du fluide caloporteur.

Nomenclature

Symboles Latin

C_p	Chaleur spécifique	$kJ\ kg^{-1}\ K^{-1}$
dT	Variation de la température	K
E	Quantité d'énergie stockée	kJ
H	Enthalpie totale	kJ
h	Coefficient de transfert thermique convectif local	$W\ m^{-2}\ K^{-1}$
k	Conductivité thermique	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$
L	Longueur de la conduite de stockage	m
m	Masse du matériau de stockage	kg
Nu	Nombre de Nusselt	/
Pe	Nombre de Peclet	/
Pr	Nombre de Prandtl	/
Q_m	Débit massique du fluide caloporteur	$kg\ s^{-1}$
r	Coordonnée radiale	m
R_1	Rayon intérieur du tube	m
R_2	Rayon extérieur du tube	m
Re	Nombre de Reynolds	/
$S(x,t)$	Interface solide-liquide	m
Ste	Nombre de Stefan	/
t	Dimension temporelle	s
T	Température	K
T_M	Température de fusion	K
U	Vitesse d'écoulement	$m\ s^{-1}$
x	Coordonnée axiale	m
xe	Coordonnée axiale adimensionnelle	/

Symboles Grecs

ΔH	Enthalpie de changement de phase	$kJ\ kg^{-1}$
ν	Viscosité cinématique du fluide	$m^2\ s^{-1}$
μ	Viscosité dynamique du fluide	$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$
ρ	Masse volumique	$kg\ m^{-3}$
f	Fraction liquide (ou Porosité)	/
θ	Température relative ($T - T_M$)	K

Indices

pcm	Matériau à changement de phase.
f, l, s	Fluide, PCM-liquide, PCM-solide.
in	Condition aux limites.
ini	Valeur initiale.

Abréviations

PCM	Matériau à changement de phase (Phase Change Material).
HTF	Fluide caloporteur (Heat Transfer Fluid).
HHTF	Fluide caloporteur chaud (Hot Heat Transfer Fluid).
CHTF	Fluide caloporteur froid (Cold Heat Transfer Fluid).
UTES	Stockage souterrain (Underground Thermal Energy Storage).
SDH	Chauffage solaire urbain (Solar District Heating).
DSC	Scanner différentiel calorimétrique (Differential Scanning Calorimeter).

Introduction générale

Introduction générale

Au cours de ces dernières décennies, la demande de l'énergie sous ses différentes formes n'a cessé d'augmenter, vue le développement et la croissance de l'activité industrielle et la demande du confort dans la vie quotidienne comme dans le transport, le chauffage et la climatisation. Les énergies fossiles dont le pétrole, le charbon et le gaz naturel fournissent actuellement la majeure partie des besoins mondiaux. Cependant elles sont des sources épuisables et responsables de l'augmentation des émissions des gaz à effet de serre et du réchauffement climatique. Ainsi, des protocoles stricts sont imposés pour préserver l'environnement, tel que le protocole Kyoto, ce protocole a tiré la sonnette d'alarme sur la réduction des gaz à effet de serre. A ce propos, l'implication sur l'utilisation rationnelle de l'énergie et l'exploitation des énergies renouvelables sont deux voies nécessaires afin de lutter contre le réchauffement climatique.

Ce contexte énergétique a poussé les scientifiques à réfléchir l'utilisation de l'énergie solaire qui possède le triple avantage d'être gratuite, propre et inépuisable. Toutefois, l'inconvénient principal de cette source est son intermittence. En effet, souvent l'apport d'énergie est décalé par rapport aux besoins. L'une des solutions envisagées pour faire face à ce problème est le stockage de l'énergie, qui consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure. Principalement, il existe deux techniques de stockage de l'énergie thermique (solaire): le stockage par chaleur sensible et le stockage par chaleur latente.

Dans le stockage par chaleur sensible, l'énergie stockée est le résultat d'une élévation de la température du matériau de stockage. La quantité d'énergie stockée est proportionnelle à la différence de température entre les états initial et final, à la capacité calorifique et à la masse du matériau. Ainsi, le choix de ce type de stockage est intéressant lorsque l'écart de température est grand. Cependant, la faible densité de stockage de ces matériaux et les déperditions thermiques liées à la qualité de l'isolation sont des inconvénients majeurs. Le stockage d'eau chaude sanitaire représente l'axe principal de la chaleur sensible, en permettant de stocker la chaleur de manière journalière. Dans le cas du stockage thermique saisonnier, des systèmes à grande échelle sont donc mis en œuvre; il s'agit le plus souvent de stockages souterrains (UTES, Underground Thermal Energy Storage), [Stéphanie \[1\]](#).

Dans le stockage par chaleur latente, l'énergie est stockée/déstockée sous la forme d'un changement de phase à température presque constante des matériaux appelés matériaux à changement de phase (PCM, Phase Change Material). La capacité de stockage thermique dépend alors de la chaleur latente et de la quantité du matériau qui change l'état. Contrairement au stockage sensible, le stockage latent est performant pour stocker de grandes quantités d'énergie lorsque l'écart de température est faible. Dans le cas d'un changement de phase solide/liquide, ce type de stockage nécessite moins de volume que le stockage sensible du fait que la chaleur latente est beaucoup plus élevée que la capacité calorifique. Les installations solaires thermiques, tel que les centrales solaires représentent l'utilisation la plus courante du stockage latent, intégrant différents types de PCM dans différentes applications notamment dans la production de l'électricité, ou le chauffage/refroidissement des bâtiments.

Les PCMs ont suscité alors beaucoup d'intérêt du fait de leur grande capacité énergétique pendant la fusion ou la solidification comparativement aux matériaux de stockage sensibles, ces matériaux peuvent jouer un rôle important dans l'optimisation des systèmes de stockage latent. Cependant, ils présentent un inconvénient majeur, à savoir leur faible conductivité thermique, de l'ordre de $0.3 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, qui est responsable de la lenteur des transferts de chaleur en charge ou en décharge. L'amélioration de ce paramètre est donc nécessaire. Plusieurs possibilités d'amélioration dans le domaine de la science des matériaux ont été étudiées: intégrant des supports métalliques comme des additifs en aluminium et en cuivre ou des mousses métalliques, [Hasnain \[2\]](#), [Himran et al. \[3\]](#); autres techniques basées sur l'ajout de graphite, [Xiao et al. \[4-5\]](#). D'autres parts, afin d'optimiser ce type de stockage, l'utilisation de multiple PCMs avec différentes propriétés thermo-physiques, notamment leur température de fusion a été appliquée dans une grande variété de système. Ainsi, plusieurs auteurs ont démontré numériquement et expérimentalement que le taux de transfert thermique est amélioré lorsque le système de stockage inclue multiple PCMs, [Ait Adine & El Qarnia \[6\]](#), [Gong & Mujumdar \[7\]](#), [Farid & Kanzawa \[8\]](#), [Li et al. \[9\]](#), [Watanabe et al. \[10\]](#).

L'objectif principal de cette thèse s'inscrit dans une volonté d'apporter des connaissances supplémentaires et nécessaires pour le développement de la technologie de stockage thermique par chaleur latente. Une étude numérique du comportement thermique associé au phénomène de stockage/déstockage de l'énergie thermique par chaleur latente, dans un élément de stockage constitué de deux tubes concentriques (shell-and-tube) a été développée, en utilisant le code de simulation Fluent 6.3.26. L'espace annulaire de l'unité de stockage est rempli de PCMs, celui-ci est chauffé/refroidi par un fluide caloporteur (HTF, Heat Transfer Fluid) en écoulement

laminaire dans le tube intérieur. Afin d'optimiser ce type de stockage et déterminer la configuration optimale du dispositif qui assure une grande quantité d'énergie stockée dans un temps de stockage bien déterminé, l'effet des différents paramètres physiques, thermo-physiques et géométriques sur le comportement thermique et le processus de charge et de décharge sont étudiés.

Dans cet objectif, le manuscrit va être décomposé selon quatre grands chapitres:

Le premier chapitre de cette thèse présente une introduction à la problématique de stockage d'énergie thermique, notamment dans les installations solaires. Ensuite, un état de l'art des technologies de stockage de chaleur est effectué. Deux modes de stockages sont recensés: le stockage par chaleur sensible, basé sur l'élévation de la température du matériau de stockage (eau, huile minérale ...), et le stockage par chaleur latente, exploitant la chaleur de changement de phase des PCMs. Des critères thermodynamiques, cinétiques, chimiques et économique seront présentés aux matériaux afin de choisir le type de stockage le plus prometteur. Des exemples d'applications pour chaque type de stockage sont présentés. Ces recherches bibliographiques ont conduit au choix du système le plus approprié au stockage thermique.

Le deuxième chapitre est consacré pour présenter un modèle mathématique pour une unité de stockage par chaleur latente constitué de deux tubes concentriques. Le modèle mathématique est basé sur l'équation de conservation d'énergie pour le HTF et le PCM, employant la méthode d'enthalpie et la technique d'enthalpie-porosité. Ce chapitre débute par une exploration de la littérature scientifique sur les unités de stockage latentes sous la configuration shell-and-tube avec un type de PCM, dans le but de définir les dimensions du modèle physique et les conditions de fonctionnements. Afin d'étudier numériquement le comportement thermique de l'unité de stockage pendant le processus de charge et de décharge, l'effet de la température et la vitesse d'entrée du fluide caloporteur ainsi que le rayon du tube interne sur l'évolution de la température de PCM, sa fraction de fusion, le temps de fusion et de solidification, le temps de charge et de décharge et l'énergie totale stockée sont étudiées et présentées graphiquement. Les résultats obtenus sont comparés avec des résultats expérimentaux tirant de la littérature.

Dans le but de bien maîtriser le processus de charge et de décharge, une technique d'amélioration de transfert thermique basée sur l'augmentation du flux échangé entre le fluide caloporteur et le matériau à changement de phase fait l'objet du troisième chapitre. La même configuration a été étudiée mais avec multiple PCMs. Ce chapitre s'articule sur deux parties. D'abord une revue des travaux numériques et expérimentaux traitant le stockage latent dans une

configuration constitué de deux tubes concentriques avec multiple PCMs est évoquée. Ensuite, l'unité de stockage remplie avec deux types de Paraffine, avec différentes propriétés thermo-physiques en fixant uniquement leur valeur de conductivité thermique est étudiée. Plusieurs simulations numériques et des cas tests ont été également faits pour étudier l'effet des différents paramètres physiques et thermo-physiques sur le processus de charge et de décharge. L'évolution de la température en fonction du temps pour chaque PCM, l'énergie totale stockée dans chaque PCM, le taux de stockage thermique, le temps de fusion et de solidification, le temps de charge et de décharge sont étudiés sous l'effet de différentes températures et vitesses d'entrées du fluide caloporteur.

Dans le quatrième chapitre, on se focalise sur une étude numérique de l'effet des propriétés thermo-physiques des PCMs (température de fusion, conductivité thermique, chaleur spécifique et chaleur latente) sur les performances de stockage thermique et sur la quantité d'énergie thermique stockée. L'ensemble des simulations numériques seront effectuées selon des cas tests. L'objectif est donc visualisé l'influence de chaque paramètre sur la quantité d'énergie stockée dans le PCM considéré ainsi que sur le temps de stockage estimé.

Il est noté que la méthode et les différents cas tests ont été uniquement effectués dans un cadre de simulation numérique; aucun test expérimental n'a été effectué.

Les résultats du chapitre III ont permis de publier deux articles scientifiques :

- i. Le premier article « **Thermal behavior of latent thermal energy storage unit using two phase change materials: Effects of HTF inlet temperature** ». L'article a été soumis au journal scientifique: **Case Studies in Thermal Engineering** 10 (2017) 475-483, le 26 août 2017. La version intégrale de cet article est présentée à la fin de cette thèse.
- ii. Le deuxième article « **Numerical analysis of concentric double pipe latent thermal energy storage unit using two phase change materials for solar water heating applications** ». L'article a été soumis au journal scientifique: **Computational Thermal Sciences, An International Journal, (Begell House)** 10 (2018) 355-374.

Chapitre I

Stockage thermique: Généralités et synthèse bibliographique

Introduction.....	7
I.1. Etude bibliographique.....	7
I.1.1. Objectifs de l'étude bibliographique	7
I.2. Stockage de l'énergie thermique.....	8
I.2.1. Nécessité de stockage thermique.....	8
I.2.2. Fonctionnement d'un procédé de stockage d'énergie thermique.....	9
I.2.3. Classification des systèmes de stockage thermique.....	9
I.2.4. Critères de choix et de conception d'un système de stockage.....	10
I.3. Différentes techniques de stockage de l'énergie thermique.....	11
I.3.1. Stockage d'énergie thermique par chaleur sensible.....	11
I.3.1.1. Principe de fonctionnement.....	11
I.3.1.2. Matériaux de stockage par chaleur sensible.....	11
I.3.1.3. Critères de choix d'un matériau de stockage sensible.....	12
I.3.1.4. Température de stockage par chaleur sensible.....	13
I.3.1.5. Solutions technologiques: Stockage par chaleur sensible.....	13
I.3.2. Stockage d'énergie thermique par chaleur latente.....	16
I.3.2.1. Principe de fonctionnement.....	16
I.3.2.2. Classification des matériaux à changement de phase.....	17
I.3.2.3. Phénomènes thermo-physiques liés aux PCM.....	20
I.3.2.4. Critères de choix d'un matériau à changement de phase.....	21
I.3.2.5. Solutions technologiques: Stockage par chaleur latente.....	22
I.4. Comparaison des différents types de stockage d'énergie thermique.....	23
I.5. Synthèse du chapitre I.....	24
Bibliographie du chapitre I.....	25

Chapitre I

Stockage thermique: Généralités et synthèse bibliographique

Introduction

Dans ce chapitre d'étude bibliographique, plusieurs points vont être abordés afin de bien comprendre le choix du système de stockage étudié et la méthodologie effectuée dans ce travail de thèse. Tout d'abord quelques généralités sur la nécessité de stockage thermique notamment dans les installations solaires thermiques, le principe de fonctionnement, classification et critères de choix et de conception d'un système de stockage thermique vont être présentées. Ensuite, les différentes techniques de stockage d'énergie thermique seront décrites et comparés en termes de densité énergétique, température et durée de stockage, transport de l'énergie, maturité et complexité de mise en œuvre du système. Ce chapitre présente les bases indispensables à la compréhension du sujet traité.

I.1. Etude bibliographique

I.1.1. Objectifs de l'étude bibliographique

L'étude bibliographique menée au cours de cette thèse vise les deux principales modes de stockage d'énergie thermique connus à ce jour, stockage par chaleur sensible et stockage par chaleur latente. Ces recherches bibliographiques ont permis de faire le point sur les technologies de stockage étudiées et sur les matériaux appropriés à chaque technologie. Des critères thermodynamiques, cinétiques, chimiques et économique seront présentés et confrontés aux matériaux afin de choisir le type de stockage le plus prometteur. Chaque technologie de stockage thermique est associée à deux étapes, qui constituent un cycle de fonctionnement: une phase de stockage de chaleur, la charge, succède ou précède une phase de production de chaleur, la décharge.

L'étude de faisabilité de chaque type de stockage thermique débute par le choix du matériau de stockage. La sélection des matériaux repose sur les critères suivants, [Stéphanie \[1\]](#):

- a) Une grande densité, pour minimiser les dimensions du récipient contenant le matériau;
- b) La durée de vie, qu'il est parfois préférable de définir en nombre de cycles de charge/décharge;
- c) Une toxicité et inflammabilité aussi faible que possible;
- d) De la disponibilité du matériau de stockage;
- e) Une bonne stabilité chimique du matériau face au vieillissement;
- f) Une bonne compatibilité chimique et une résistance à l'oxydation avec le contenant.

I.2. Stockage de l'énergie thermique

I.2.1. Nécessité de stockage thermique

Les installations solaires domestiques sont toujours accompagnées d'un système de stockage de chaleur. La raison en est simple: faire coïncider la disponibilité de l'énergie solaire avec les besoins en chaleur. Le problème est que l'énergie solaire n'est fournie que durant la journée et que la demande de chaleur est surtout située en début de matinée et en soirée. Sans stockage de chaleur, on ne profiterait donc que très peu de l'énergie solaire.

Son principe est simple: accumuler la chaleur en journée dans un système de stockage et la récupérer quand c'est nécessaire. Son rôle est donc de différer la disponibilité de l'énergie solaire.

On en distingue deux catégories: le stockage journalier et le stockage saisonnier. Le stockage journalier permet de disposer de l'énergie accumulée à court terme, cela peut être dans les minutes, dans les heures voire dans les quelques jours qui suivent le stockage. Il est indispensable pour profiter de l'énergie solaire au quotidien. Le stockage saisonnier est le stockage à long terme qui va permettre de différer l'apport en énergie solaire de plusieurs mois. Il permet donc d'accumuler l'énergie solaire non exploitée en été pour en bénéficier durant l'hiver. La **figure I.1** présente l'évolution de l'apport solaire et de la demande de chaleur dans le secteur résidentiel.

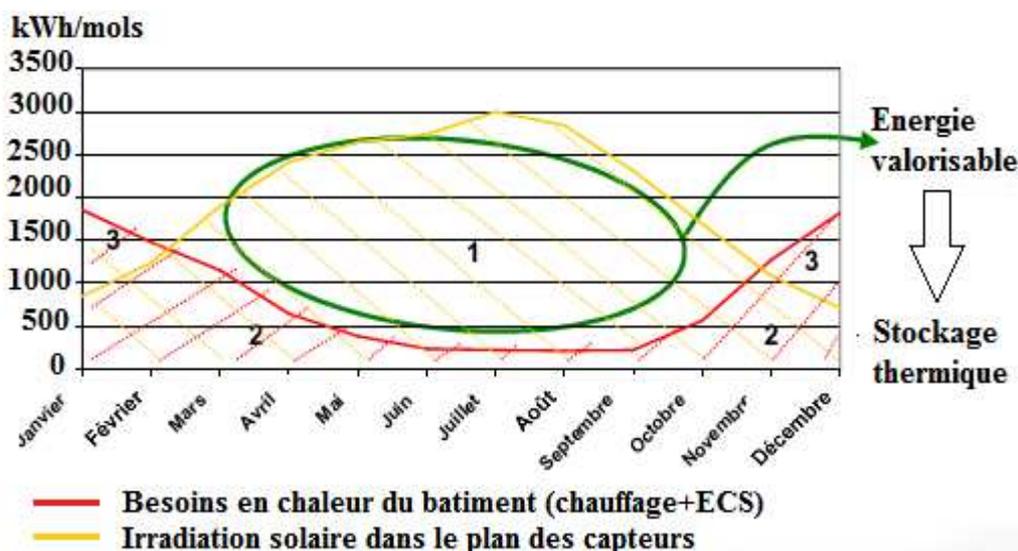


Figure I.1. Évolution de l'apport solaire et de la demande de chaleur dans le secteur résidentiel.

I.2.2. Fonctionnement d'un procédé de stockage d'énergie thermique

Selon [Stéphanie \[1\]](#), chaque technologie de stockage thermique fonctionne avec deux étapes principales, qui constituent un cycle de fonctionnement: une phase de stockage de chaleur, la charge, succède ou précède une phase de production de chaleur, la décharge. Selon [Pardo \[14\]](#), les procédés de stockage de l'énergie thermique se déroulent en trois étapes: La charge, durant laquelle l'énergie thermique issue du champ thermique est emmagasinée, le stockage de la chaleur, de durée plus ou moins longue selon les besoins et/ou le procédé de mise en œuvre, la décharge qui correspond à la phase de restitution de l'énergie thermique.

I.2.3. Classification des systèmes de stockage thermique

Selon les ouvrages et les auteurs, il existe différents critères de classification des systèmes de stockage thermique, ces critères sont présentés sur la **figure I.2**. Ils peuvent être classés selon le type de stockage ou le principe physique {stockage par chaleur sensible et stockage par chaleur latente}, [Sharma et al. \[11\]](#). Un autre critère basé sur la plage de température, les systèmes de stockage sont divisés donc en deux types {stockage de la chaleur et stockage du froid}, [Oro et al. \[12\]](#). Pour le stockage de chaleur, si la température de stockage est inférieure à 100°C, on parle du stockage à basse température, si la température de stockage est supérieure à 500°C, on parle du stockage à haut température. Dans le cas où le critère est la durée de stockage, deux classes sont considérées {le stockage à court terme, journalier et le stockage à long terme, saisonnier}, [Xu et al. \[13\]](#). Selon le critère d'application, il existe trois principaux types de stockage {stockage résidentiel, industriel et commercial}.

Dans les centrales solaires thermodynamiques, les systèmes de stockage d'énergie thermique peuvent être classés suivant deux catégories: {les systèmes de stockage actifs et les systèmes de stockages passifs}. Lorsque le matériau de stockage circule dans le procédé, le type de stockage s'appelle stockage actif. Ce type de stockage se sous divise encore en deux catégories: stockage actif direct quand le matériau circule dans le champ thermique et stockage actif indirect dans le cas contraire. À l'opposer, dans le cas d'un système de stockage d'énergie thermique passif (aussi appelé régénérateur), le matériau de stockage ne circule pas dans le procédé. L'énergie thermique transitant via un fluide caloporteur, est transférée vers le matériau de stockage à l'aide d'un échangeur, [Pardo \[14\]](#), [Gil et al. \[15\]](#).

Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressant au critère du principe physique, les deux types de stockage sensible et latent seront introduits en détail dans ce chapitre. En revanche la technologie de stockage par chaleur latente fera l'objet d'un état de l'art détaillé.

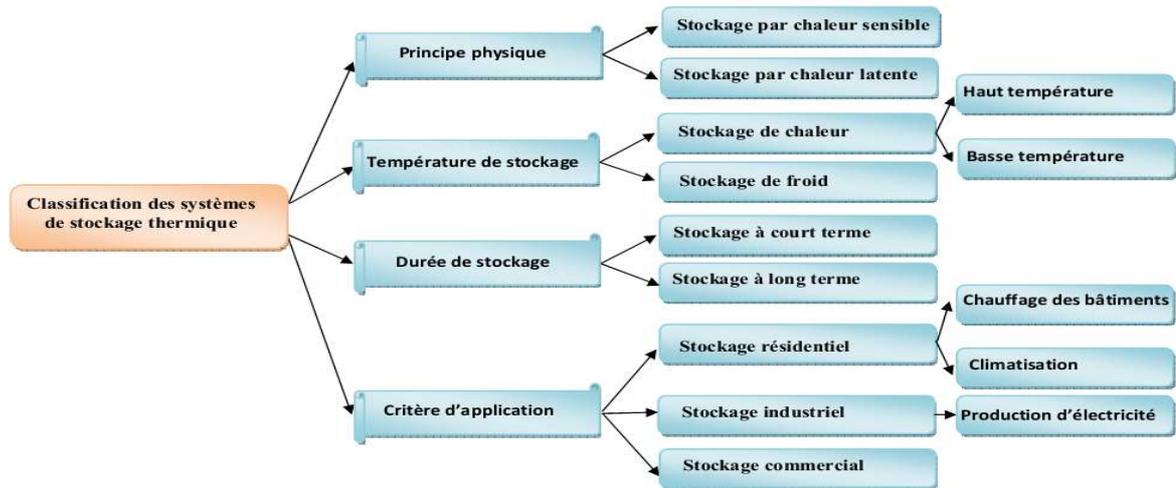


Figure I.2. Classification des systèmes de stockage thermique.

I.2.4. Critères de choix et de conception d'un système de stockage

Selon la technologie de stockage et le mode de fonctionnement souhaité, les critères de choix et de conception d'un système de stockage sont nombreux. Si la capacité ou l'efficacité thermique, définie comme le rapport entre l'énergie stockée et l'énergie restituée est un point clé dans la conception d'un système de stockage, d'autres critères doivent être pris en compte, qu'ils soient économiques et techniques, Pardo [14]. Le **tableau I.1** répertorie l'ensemble de ces critères.

Tableau I.1. Critères de choix et de conception d'un système de stockage.

Critères économiques	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Coût du matériau de stockage et de l'échangeur de chaleur; ▪ Disponibilité du matériau de stockage; ▪ Coûts d'investissement liés à l'encombrement du système de stockage;
Critères techniques	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Densité énergétique élevée (par unité de masse ou de volume); ▪ Une grande conductivité thermique de matériau de stockage, de sorte que le gradient de température nécessaire pour le stockage et le déstockage soit faible; ▪ Transferts de chaleur efficaces entre le fluide caloporteur et le matériau de stockage; ▪ Bonne capacité d'autodécharge liée à la stabilité chimique et mécanique du matériau; ▪ Une bonne compatibilité chimique entre le fluide caloporteur, l'échangeur de chaleur et le matériau de stockage; ▪ Réversibilité du matériau de stockage pour un nombre élevé de cycles de charge et de décharge; ▪ La tenue au cyclage, qui dicte la durée de vie du système; ▪ Pertes thermiques faible; ▪ Contrôle/commande du procédé maîtrisé .

I.3. Différentes techniques de stockage de l'énergie thermique

Deux principales techniques de stockage thermiques sont disponibles dans la littérature suivant la transformation du matériau, qui peut désigner une variation de température (stockage par chaleur sensible) ou un changement de phase (stockage par chaleur latente).

I.3.1. Stockage d'énergie thermique par chaleur sensible

I.3.1.1. Principe de fonctionnement

Dans un système de stockage par chaleur sensible, l'énergie stockée est le résultat d'une élévation de la température du matériau de stockage. La quantité d'énergie stockée est directement proportionnelle à la différence de température entre les états initial et final, à la capacité calorifique et à la masse du matériau. Ainsi, la quantité d'énergie stockée peut être exprimée mathématiquement par l'équation suivante:

$$E = \int_{T_{\text{froid}}}^{T_{\text{chaud}}} m.C_p .dT \quad (\text{I.01})$$

Où, E est la quantité d'énergie stocké (J), m est la masse du matériau de stockage (kg), C_p est la chaleur spécifique du matériau de stockage (J/kg.K) et dT est la variation de la température durant l'étape de charge (K).

Durant l'étape de charge, l'énergie thermique est transférée au matériau de stockage afin d'augmenter sa température, celui-ci est stocké à la température de travail de l'étape de charge. Durant l'étape de décharge, le matériau est refroidi afin de récupérer l'énergie thermique emmagasinée. Pour une élévation de température donnée, la capacité de stockage d'un matériau dépend alors de la valeur du produit entre sa masse volumique et sa chaleur spécifique. Néanmoins, les paramètres comme: La gamme de fonctionnement en terme de température, la conductivité thermique du média, la capacité d'autodécharge liée à la stabilité chimique et mécanique du matériau et le coût sont aussi importants, [Pardo \[14\]](#).

I.3.1.2. Matériaux de stockage par chaleur sensible

[Gil et al. \[15\]](#) ont présenté un état de l'art du stockage thermique à haute température, une liste très complète des matériaux de stockage à chaleur sensible a été proposé dans le cas de la production d'énergie à grande échelle. Les principales caractéristiques de quelques-uns de ces matériaux sont regroupées dans le **tableau I.2**.

Tableau I.2. Caractéristiques de quelques matériaux de stockage par chaleur sensible.

Matériau	Etat	Température (°C)		Densité (kg/m ³)	Conductivité thermique (W/m.K)	Capacité thermique (J/kg.K)	Capacité thermique volumique (kWh/m ³)
		Basse	Haute				
Béton armé HT	Solide	200	400	2500	1.5	850	118
NaCl (Sel)	Solide	200	500	2160	7	850	153
Fonte	Solide	200	400	7200	37	560	224
Acier trempé	Solide	200	700	7800	40	600	650
Briques réfractaires	Solide	200	1200	3500	5	1150	958
Cofalit	Solide	200	1200	3000	2	1000	833
Eau liquide	Liquide	0	100	1000	0.6	1180	32
HITES sel solaire	Liquide	120	133	/	/	/	/
Sels fondus solaires	Liquide	265	565	1870	0.52	1600	250
Huile minérale	Liquide	200	300	770	0.12	2600	55
Sels de carbonate	Liquide	450	850	2100	2	2000	420
Vapeur surchauffée	Gaz	100	300	0.4	0.04	2	4.10⁻⁵

La chaleur peut être stockée dans un matériau solide, liquide, ou gazeux. L'unique gaz présenté dans la liste des matériaux est la vapeur surchauffée, un très mauvais matériau conducteur et stockeur de la chaleur, en plus d'être très corrosif sous pression. En revanche, la meilleure capacité de stockage est remarquable dans les huiles minérales. Les sels fondus présentent une conductivité thermique et une capacité thermique acceptable comparés aux métaux et bétons. Cela explique leur large utilisation dans les centrales solaires commerciales actuelles. Pour les températures élevées (supérieures à 500°C), les bétons réfractaires, le Cofalit® (déchets industriels rendus inertes par vitrification), et les sels de carbonates sont des matériaux candidats. Dans les conditions de basse température (inférieures à 100°C), l'eau est le matériau le plus utilisé dans les systèmes de stockage par chaleur sensible, comme le chauffage des bâtiments. Toutefois, pour les plus basses températures, la capacité de stockage par chaleur sensible demeure plus modeste que celle permise par chaleur latente.

I.3.1.3. Critères de choix d'un matériau de stockage sensible

Lors du choix d'un matériau pour un système de stockage par chaleur sensible, plusieurs critères sont à prendre en compte; ces critères sont répertoriés ci-dessous:

- a) Les gammes de fonctionnement en termes de température et de pression doivent être adaptées au procédé;
- b) La conductivité thermique du média doit être élevée (diminution de l'inertie);
- c) La masse volumique et la chaleur spécifique du média doivent être élevées (amélioration de la densité de stockage);
- d) Le média doit être stable dans le temps et résistant aux cyclages;
- e) Le média doit être compatible avec les matériaux de construction;
- f) Le coût du média doit être faible.

I.3.1.4. Température de stockage par chaleur sensible

Le stockage par chaleur sensible peut être réalisé à basse température ou à haute température, en fonction de la température du fluide caloporteur requise et en fonction de l'installation mise en œuvre.

a) Stockage à basse température

L'eau liquide, la roche et le béton sont les matériaux les plus souvent utilisés pour les stockages sensibles à température inférieure à 100°C. L'eau a cependant l'inconvénient d'être corrosive. Son utilisation est avantageuse si le fluide de travail est aussi l'eau, comme c'est le cas dans le cumulus utilisé dans les chauffe-eau solaires.

b) Stockage à haute température

Par haute température dans le domaine solaire, on entend des températures supérieures à 500°C. C'est la gamme de températures qu'on rencontre dans la production d'électricité avec capteurs à concentration. Les matériaux idéaux pour cette gamme de température sont: les sels fondus solaires, les sels de carbonates, les huiles organiques hautes températures, le béton de haute température, les céramiques réfractaires.

I.3.1.5. Solutions technologiques: Stockage par chaleur sensible

a) Stockage sensible à basse température

Comme il a été mentionné en introduction, les problèmes liés à l'intermittence de l'énergie solaire peuvent être résolus par un système de stockage thermique à basse température, fonctionne avec des cycles diurnes ou à court terme. Les technologies de chauffage solaire thermique représentent l'axe principal de la chaleur sensible à basse température, en permettant de stocker la chaleur de manière journalière. Il existe deux types de systèmes: le chauffage de l'eau domestique et le chauffage solaire urbain.

C'est Clarence Kemp en 1980 qui a commercialisé le premier système de chauffage solaire de l'eau, [Lane \[16\]](#). On distingue deux types de système de chauffe-eau solaires: les systèmes directs et les systèmes indirects. Dans les systèmes directs, le fluide de stockage (eau domestique) circule dans l'installation, il entre dans le collecteur solaire ou elle est chauffée. Dans les systèmes indirects, un échangeur thermique permet d'assurer le transfert d'énergie entre le fluide caloporteur (boucle solaire) et le fluide de stockage (eau chaude domestique). C'est le cas le plus fréquent. La **figure I.3** montre le principe de fonctionnement d'un chauffe-eau solaire direct. Une illustration d'une maison individuelle avec des collecteurs solaire montre la technologie chauffage solaire est présenté sur la **figure I.4**.

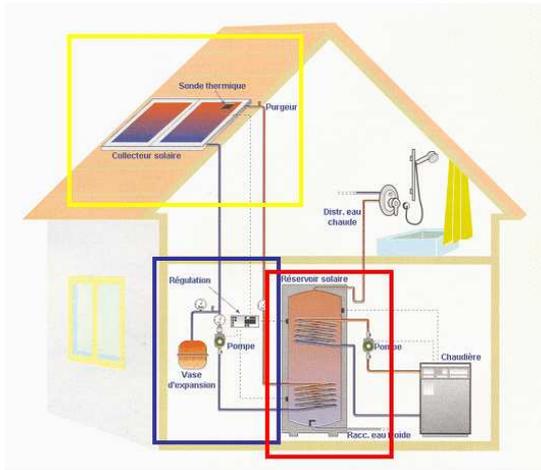


Figure I.3. Principe de fonctionnement d'un chauffe-eau solaire direct.

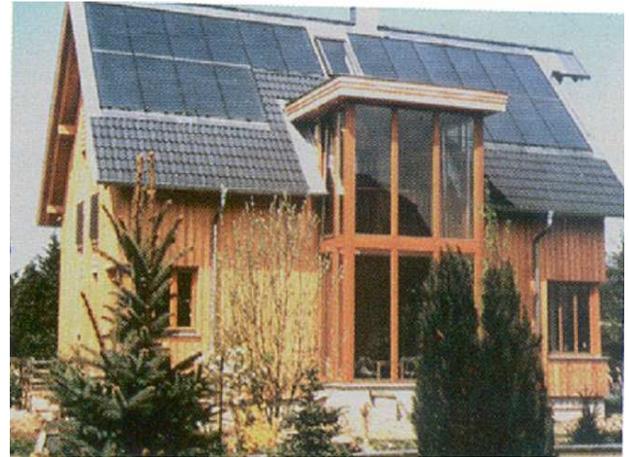


Figure I.4. Maison individuelle avec des collecteurs solaire.

Le chauffage solaire urbain (Solar District Heating, SDH) est le deuxième système de stockage basé sur le stockage sensible à basse température. Le principe de fonctionnement de ce système de stockage est similaire à celui utilisé dans le cadre du chauffage solaire de l'eau. Cependant, le chauffage solaire urbain utilise une plus grande surface de collecteurs et emmagasine l'énergie solaire captée dans un grand volume de stockage centralisé. Le principe de fonctionnement de ce type de stockage est montré sur la **figure I.5**. Une illustration d'une communauté montre le chauffage solaire urbain est présenté sur la **figure I.6**.

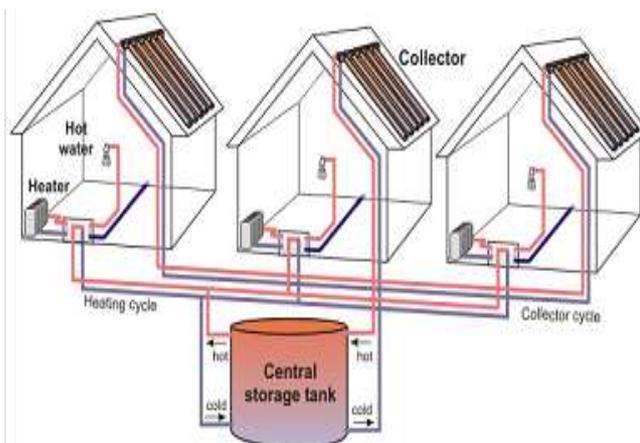


Figure I.5. Chauffage solaire urbain
Tiré de (Quaschnig, 2014).



Figure I.6. Communauté Drake Landing.
Tiré de (The Edmonton Journal, 2008).

b) Stockage sensible à haute température

Le stockage sensible haut température concerne principalement les centrales solaires thermodynamiques, il s'agit de stocker la chaleur emmagasinée au cours de la journée

d'ensoleillement. Les centrales à tour ont été développées pour des installations destinées à une production à grande échelle, développant de fortes puissances et travaillant à haute température. Pour bien comprendre le fonctionnement d'une centrale solaire thermodynamique à tour, on la décompose en cinq principaux éléments. Le champ d'héliostats, la tour, le récepteur solaire, le stockage thermique à l'aide d'un échangeur thermique et le groupe turbo-alternateur.

Le principe de fonctionnement de la centrale est décrit sur la **figure I.7**. Le fluide caloporteur passe à travers le récepteur, il emmagasine l'énergie thermique produite, puis il circule jusqu'à un échangeur thermique relié à deux réservoirs de sels fondus (matériau de stockage sensible). Les sels fondus froids passent à travers l'échangeur et emmagasinent à leur tour la chaleur du fluide, ils sont ensuite stockés dans un réservoir de sels chauds. Au coucher du soleil, le circuit s'inverse et les sels chauds circulent, à travers l'échangeur, vers le réservoir à sels froids. La chaleur est ainsi cédée au fluide caloporteur (autour de 500°C) et permet d'alimenter une turbine pour produire de l'électricité.

La **figure I.8** présente une centrale solaire à tour, Thémis en France, elle est actuellement utilisée comme plate forme d'essai. Thémis fut testée comme pilote pour la production d'électricité (2.5 MWe) par EDF-France, [Verdier-Gorcias \[17\]](#).

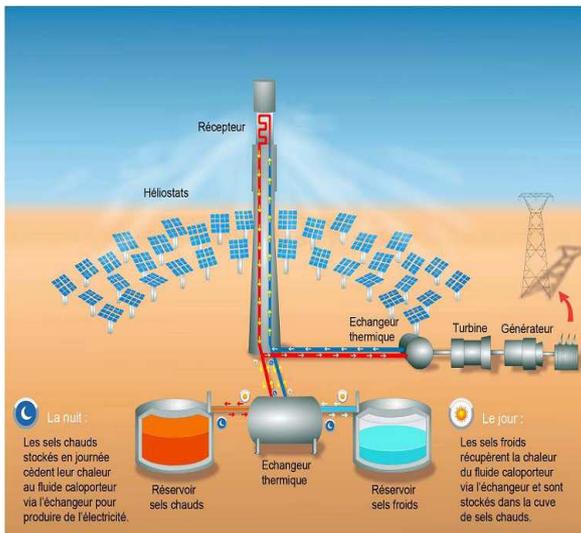


Figure I.7. Principe de fonctionnement d'une centrale à tour.

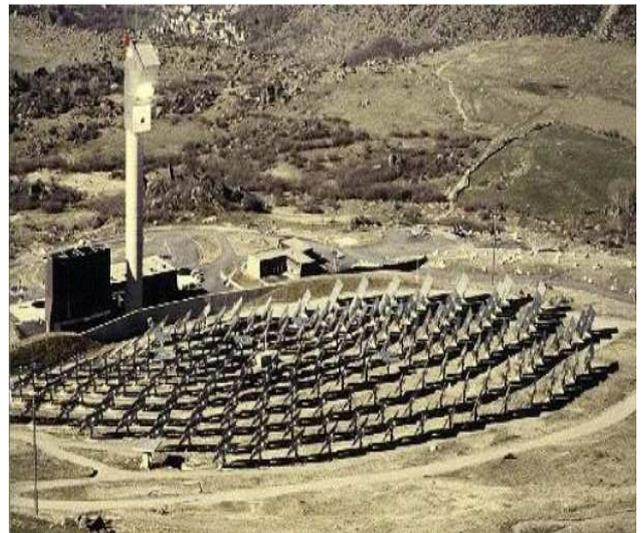


Figure I.8. Photo de la centrale Thémis (France).

I.3.2. Stockage d'énergie thermique par chaleur latente

I.3.2.1. Principe de fonctionnement

Le stockage par chaleur latente est le résultat d'un changement de phase à température presque constante des matériaux appelés matériaux à changement de phase (PCM). Durant l'étape de stockage, l'énergie thermique fournie au PCM permet son échauffement, puis son changement de phase et éventuellement sa surchauffe. Celui-ci est ensuite stocké à la température de charge. Lors de la restitution de l'énergie, le matériau change de nouveau de phase pour restituer l'énergie stockée et reprendre son état initial. Le principe de fonctionnement des matériaux à changement de phase solid-liquide est simple, il est illustré sur la **figure I.9**. Le stockage latent se fait généralement sous forme d'un changement de phase solide/liquide, le changement de phase liquide/vapeur est aussi possible mais rarement utilisé dans le stockage à des températures modérées.

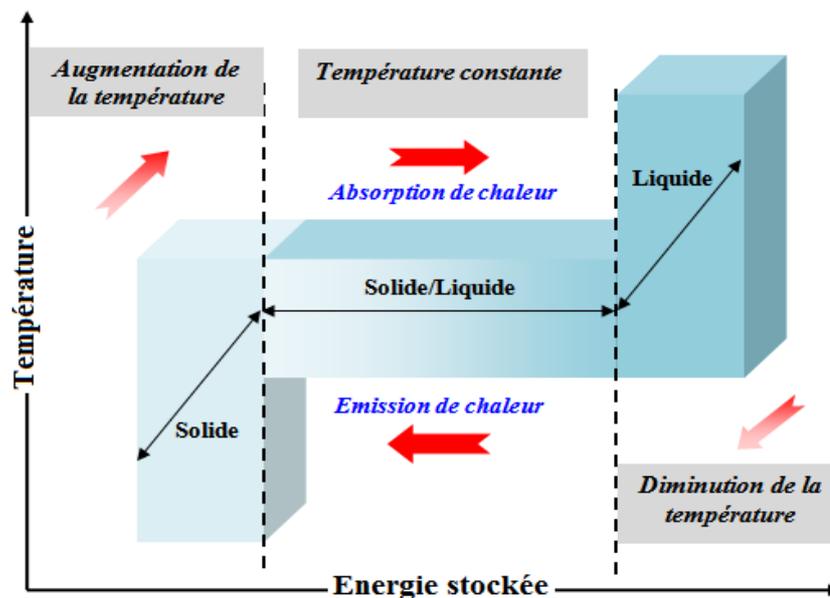


Figure I.9. Principe de fonctionnement des matériaux à changements de phase.

La quantité d'énergie stockée dans le matériau à changement de phase est la somme des énergies sensibles et de l'énergie latente suivant la relation (I.02). La majeure partie de l'énergie stockée est comprise dans l'enthalpie de changement de phase du matériau.

$$E = \int_{T_{froid}}^{T_{fusion}} m.C_{p,s}.dT + m.\Delta H + \int_{T_{fusion}}^{T_{chaud}} m.C_{p,l}.dT \quad (I.02)$$

Où, E est la quantité d'énergie stockée (J), m est la masse du matériau de stockage (kg), $C_{p,s}$ et $C_{p,l}$ sont respectivement les chaleurs spécifiques des matériaux solide et liquide (J/kg.K), ΔH est

l'enthalpie de changement de phase (J/kg) et dT est la variation de la température durant l'étape de charge (K).

La capacité de stockage thermique dépend alors de la capacité calorifique, de la chaleur latente et de la quantité du matériau qui change l'état. Contrairement au stockage sensible, le stockage latent est performant pour stocker de grandes quantités d'énergie lorsque l'écart de température est faible.

Le stockage thermique par chaleur latente est considéré comme un stockage passif. Le matériau de stockage ne circule pas, il est séparé du fluide caloporteur (HTF). Ce dernier passe dans le stockage uniquement pendant les phases de charge et de décharge. Des échangeurs de chaleur sont utilisés pour assurer le transfert de chaleur entre le fluide caloporteur et le matériau à changement de phase. L'utilisation de stockage par chaleur latente permet de réduire les volumes de stockage par rapport au stockage par chaleur sensible et d'avoir des températures de travail isothermes, en charge et en décharge.

I.3.2.2. Classification des matériaux à changement de phase

Plusieurs auteurs ont travaillé sur la classification des PCM, [Zalba et al. \[18\]](#), [Sharma et al. \[19\]](#), [Zhou et al. \[20\]](#). Nous avons présenté la classification des PCM sous la forme d'un tableau récapitulatif dans lequel il répertorie l'ensemble des matériaux utilisés pour le stockage d'énergie thermique avec changement de phase. La **figure I.10** représente une classification des PCM parmi les matériaux de stockage d'énergie thermique avec changement de phase.

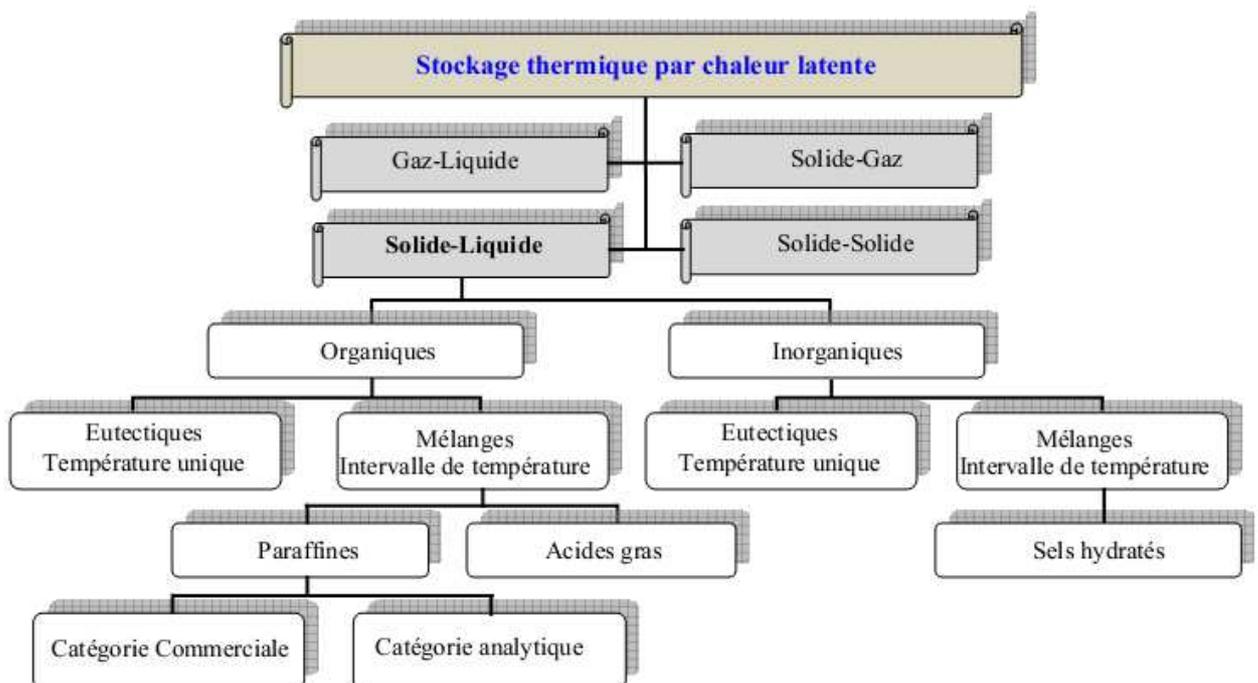


Figure I.10. Classification des matériaux à changement de phase.

Dans cette classification, deux familles de matériaux sont distinguées pour le stockage latent: d'une part les matériaux organiques, principalement les paraffines et les acides gras; et d'autre part, les matériaux inorganiques, principalement les sels hydratés et les mélanges de sels hydratés.

a) Paraffines

Les paraffines sont une famille des PCMs organiques, constitués par des mélanges d'hydrocarbures saturés de la famille des alcanes de formule générale C_nH_{2n+2} , ces propriétés physiques sont assez semblables. Les avantages des paraffines résident dans leur disponibilité dans un large intervalle de fonctionnement et dans leur chaleur latente raisonnablement élevée (de l'ordre de 200 kJ/kg) qui dépend de la masse molaire et des températures de changement de phase. En plus, elles se solidifient presque sans sous-refroidissement (sursaturation négligeable), [Sharma et al. \[19\]](#), [Farid et al. \[21\]](#), [Farid \[22\]](#), [Abhat \[23\]](#). Quant aux coûts, elles sont peu coûteuses quand on parle des paraffines non purifiées. Certaines paraffines sélectionnées de la littérature sont indiquées dans le **tableau I.3**, avec leur température de fusion et leur chaleur latente.

Tableau I.3. Propriétés thermo-physiques des paraffines, [Sharma et al. \[19\]](#).

Nombre d'atomes de Carbone	Point de fusion (°C)	Chaleur latente de fusion (kJ/kg)	Nombre d'atomes de Carbone	Point de fusion (°C)	Chaleur latente de fusion (kJ/kg)
14	5.5	228	25	49.4	238
15	10.0	205	26	56.3	256
16	16.7	237.1	27	58.8	236
17	21.7	213	28	61.6	253
18	28.0	244	29	63.4	240
19	32.0	222	30	65.4	251
20	36.7	246	31	68.0	242
21	40.2	200	32	69.5	170
22	44.0	249	33	73.9	268
23	47.5	232	34	75.9	269
24	50.6	255			

Les paraffines sont très utilisées surtout pour les applications à basse température car elles sont: sûres, fiables et non réactives, [Sharma et al. \[19\]](#), [Hasnain \[2\]](#), possèdent un long cycle de fusion, non-corrosive et chimiquement stable à des températures inférieure à 500°C. Lors du changement de phase, sa variation en volume et sa pression en vapeur sont faibles. En revanche, elles présentent également des inconvénients à son utilisation. En effet, les paraffine sont inflammable, possèdent une faible conductivité thermique, qui provoque une diminution du taux de stockage/déstockage de la chaleur pendant les cycles de fusion/solidification et ne sont pas

compatible avec les conteneurs en plastiques. Le **tableau I.4** permet d'apprécier les variations des propriétés physiques de quelques paraffines en fonction de leur masse moléculaire.

Tableau I.4. Exemple des propriétés physiques de quelques paraffines.

	Paraffines			
	Tétradécane	Héxadécane	Octadécane	Eicosane
Formule chimique	C ₁₄ H ₃₀	C ₁₆ H ₃₄	C ₁₈ H ₃₈	C ₂₀ H ₄₂
Température de fusion (°C)	5.5	16.7	28	36.7
Enthalpie de fusion (kJ/kg)	226	237	244	247
Conductivité thermique (W/m.K)	0.15	0.15	0.15	0.15
Capacité thermique (J/kg.K)	207	211	216	221
Masse volumique (kg/m ³)	825 (solide)	835 (solide)	814 (solide)	856 (solide)
Masse volumique (kg/m ³)	771 (liquide)	776 (liquide)	774 (liquide)	778 (liquide)
Retard à la solidification (°C)	Aucun	Négligeable	Négligeable	Aucun
Pression de vapeur (Pa)	133 à 75 °C	133 à 105 °C	133 à 75 °C	133 à 100 °C
Tension superficielle (N/m)	27.4.10 ⁻³	3.4	27.4.10 ⁻³	/
Viscosité (m ² /s)	2.1	/	3.4	/

b) Acides gras

Les acides gras sont des matériaux organiques non-paraffiniques, leur formule chimique générale est CH₃(CH₂)_{2n}COOH. Les acides gras couvrent une gamme de température allant de 40 à 150 °C selon la longueur de la chaîne carbonée et possèdent des chaleurs latentes de fusion comparables avec celles des paraffines. De plus, ils ne subissent pas le phénomène de sous-refroidissement lors du changement de phase solide/liquide et ils présentent une faible corrosion, [Abhat \[23\]](#), [Lane & Glew \[24\]](#). Leur inconvénient réside dans le coût d'achat qui est 2.5 fois plus cher que celui des paraffines. Certains acides gras jugés d'intérêt pour les applications de stockage d'énergie thermique à basse température sont représentés avec leurs propriétés thermodynamiques dans le **tableau I.5**.

Tableau I.5. Propriétés thermo-physiques des acides gras, [Sharma et al. \[19\]](#).

Matériaux	Formule chimique	Température de fusion (°C)	Chaleur latente (kJ/kg)
Acetic acid	CH ₃ COOH	16.7	184
Polyethylene glycol 600	H(OC ₂ H ₄) _n .OH	20-25	146
Capric acid	CH ₃ (CH ₂) ₈ .COOH	36	152
Eladic acid	C ₈ H ₇ C ₉ H ₁₆ .COOH	47	218
Lauric acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₀ .COOH	49	178
Pentadecanoic acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₃ .COOH	52.5	178
Tristearin	(C ₁₇ H ₃₅ COO)C ₃ H ₅	56	191
Myristic acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₂ .COOH	58	199
Palmitic acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₄ .COOH	55	163
Stearic acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₆ .COOH	69.4	199
Acetamide	CH ₃ CONH ₂	81	241
Methyl fumarate	(CHCO ₂ NH ₃) ₂	102	242

c) Sels hydratés

Les sels hydratés dont leur formule générale est $AB.nH_2O$ sont des substances inorganiques qui ont une température ou une plage de températures de fusion comprise entre 5°C et 130°C . D'autres mélanges de sels, des mélanges de métaux ont une température de fusion supérieure à 150°C . Ce type de matériaux inorganiques présentent de nombreux avantages tels que: une forte chaleur latente de fusion par unité de volume, une conductivité thermique élevée, compatibilité avec les conteneurs en plastiques, ils sont non-inflammables. Ainsi, ils possèdent une grande densité de stockage latent. Cependant, le majeur problème limitant leur utilisation manifeste par le phénomène de décomposition (ségrégation des phases) qui accompagne la fusion de ces sels. Ce phénomène est du à la grande différence entre les densités des deux phases solide et liquide du même sel. Les sels hydratés présentent aussi un problème de corrosion et un degré de sous-refroidissement assez élevé, [Ango \[25\]](#). Les caractéristiques thermo-physiques des principaux sels hydratés sont récapitulées sur le **tableau I.6**.

Tableau I.6. Propriétés thermo-physiques des principaux sels hydratés, [Sharma et al. \[19\]](#).

Sels hydratés	Formule chimique	Température de fusion ($^\circ\text{C}$)	Chaleur latente (kJ/kg)
Sel de Glauber	$\text{Na}_2\text{SO}_4.10\text{H}_2\text{O}$	32.4	252
Chlorure de calcium, hexa hydrate	$\text{CaCl}_2.6\text{H}_2\text{O}$	27-30	190
Acétate de sodium tri hydrate	$\text{NaCH}_3\text{COOH}.3\text{H}_2\text{O}$	58	170-264
Hydroxyde de Barium octahydrate	$\text{Ba}(\text{OH})_2.8\text{H}_2\text{O}$	78	301
/	$\text{NH}_4.\text{Al}(\text{SO}_4)_2.12\text{H}_2\text{O}$	95	238.5
Phosphate de sodium dodécahydrate	$\text{Na}_3.\text{PO}_4.12\text{H}_2\text{O}$	77	213
Pyrophosphate de sodium déca hydrate	Calotherm 70	70	184
Carbonate de sodium déca hydrate	$\text{Na}_2\text{CO}_3.10\text{H}_2\text{O}$	32-35	247
Nitrate de calcium tétra hydrate	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2.4\text{H}_2\text{O}$	40-43	140

I.3.2.3. Phénomènes thermophysiques liés aux PCM

Chaque catégorie de PCM comme candidats potentiels possède ses avantages et ses inconvénients, qui peuvent s'avérer plus ou moins pénalisants selon l'application visée. Plusieurs publications ont traité ce sujet, [Zalba et al. \[18\]](#), [Sharma et al. \[19\]](#), [Mehling & Cabeza \[27\]](#), [Wang et al. \[28\]](#), et une synthèse détaillée a été présentée pour chaque auteur. Le **tableau I.7** présente les différents avantages et inconvénients associés à chaque type de matériaux.

Tableau I.7. Comparaison des avantages et inconvénients des PCM organiques et inorganiques.

	PCM Organiques	PCM Inorganiques
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Absence de corrosion ; ▪ Sous-refroidissement limité ; ▪ Stabilité chimique et thermique; 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Enthalpie de changement de phase élevée; ▪ Meilleure conductivité thermique;

Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Faible enthalpie de changement de phase; ▪ Faible conductivité thermique; ▪ Inflammabilité. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Corrosion; ▪ Sous-refroidissement; ▪ Ségrégation de phases; ▪ Manque de stabilité thermique.
----------------------	---	---

I.3.2.4. Critères de choix d'un matériau à changement de phase

Le choix du matériau de stockage présente l'un des principaux problèmes rencontrés dans le stockage thermique par chaleur latente permettant une meilleure efficacité pour une application particulière. Ce choix est conditionné par plusieurs critères, à savoir, les critères thermodynamiques, physiques, cinétiques, chimiques et économiques notamment ce qui concerne la température de fusion qui doit être dans la gamme de température de fonctionnement du système de stockage, [Ait Hammou \[26\]](#). Selon [Farid et al. \[21\]](#) la sélection d'un matériau à changement de phase se fait principalement en fonction de sa température de fusion. [Abhat \[23\]](#) et [Kenisarin \[29\]](#) présentent une liste très complète des principales caractéristiques accompagnants le choix d'un PCM. Selon les auteurs, les critères de choix sont répertoriés dans le **tableau I.8**.

Tableau I.8. Critères à respecter lors du choix d'un matériau à changement de phase.

Thermodynamiques	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Une température de fusion dans la gamme de température de fonctionnement du système; ▪ Une chaleur latente par unité de masse élevée, de sorte qu'une petite quantité du matériau stocke la quantité désirée d'énergie; ▪ Une grande capacité calorifique pour tirer profit du stockage par chaleur sensible; ▪ Conductivité thermique élevée, de sorte que le gradient de température nécessaire pour le stockage et le déstockage du PCM soit faible;
Physiques	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Masse volumique élevée; ▪ Faible variation de volume au changement de phase;
Cinétiques	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Peu ou pas de sous-refroidissement durant le processus de solidification. Le matériau devrait se cristalliser à son point de fusion thermodynamique;
Chimiques	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Une stabilité chimique à long terme des cycles de fusion/solidification; ▪ Compatibilité avec les matériaux de construction; ▪ Non toxicité; ▪ Non inflammabilité;
Économiques	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Disponibilité en grande quantité; ▪ Coût du matériau;
Autres critères	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Disponible partout; ▪ Facile à transporter et à stocker.

I.3.2.5. Solutions technologiques: Stockage par chaleur latente

La technologie de stockage via des matériaux à changement de phase consiste à utiliser des matériaux qui passent d'un état solide à liquide lors d'un apport de chaleur. Le principe de fonctionnement d'une centrale solaire fonctionne avec un PCM est décrit sur la **figure I.11**. Un concentrateur à réflecteur linéaire Fresnel utilise des miroirs plans pour concentrer le rayonnement solaire sur un récepteur fixe situé au-dessus du champ solaire. Le récepteur est généralement composé d'un absorbeur. L'absorbeur fixe peut être tubulaire, multitubulaire ou correspondre à une surface plane. Le PCM, placée dans un réservoir de stockage sous forme solide à température ambiante, elle est traversée par des tuyaux en cuivre dans lesquels circule un fluide caloporteur. Lorsque le fluide caloporteur chaud en sortie du champ solaire arrive, le PCM se réchauffe, elle emmagasine à leur tour la chaleur et passe de la forme solide à liquide. A l'inverse, le PCM va céder sa chaleur en se resolidifiant si c'est le fluide caloporteur froide qui circule dans le tube (exclusivement de l'eau, liquide ou vapeur, destinée à être « turbinée » pour produire de l'électricité).

L'installation la plus étendue est la plateforme solaire d'Almeria en Espagne (un prototype de 350 kWh), constitué de béton dans lequel est disposé un faisceau de tubes, **figure I.12**, permettant au fluide caloporteur (eau) d'échanger de la chaleur avec le matériau à changement de phase, [Lomonaco \[30\]](#).

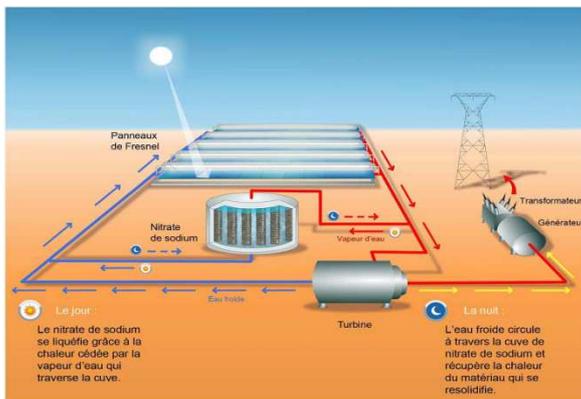


Figure I.11. Principe de fonctionnement d'une centrale solaire fonctionne avec PCM.

Figure I.12. Faisceau de tube contenu dans le module de stockage.

I.4. Comparaison des différents types de stockage d'énergie thermique

Les deux systèmes de stockage thermique présentés dans les paragraphes précédents fonctionnent selon trois étapes majeures: la charge, le stockage et la décharge.

Les caractéristiques des deux systèmes en fonction des paramètres fondamentaux: la densité énergétique, la température de stockage, le volume de stockage, la durée de stockage, le transport de l'énergie, la maturité du système et la complexité de mise en œuvre du système ont été choisis. Ces caractéristiques sont répertoriées dans le **tableau I.9**.

Tableau I.9. Caractéristiques des deux systèmes de stockage thermique, Pardo [14].

	Stockage par chaleur sensible	Stockage par chaleur latente
Densité énergétique volumétrique	Faible (15-60) kWh/m ³	Moyenne (50-100) kWh/m ³
Densité énergétique massique	Faible (0.02-0.03) kWh/kg	Moyenne (0.05-0.1) kWh/kg
Température de stockage	Température de l'étape de charge	Température de l'étape de charge
volume de stockage pour emmagasiner une énergie de 6,7 MJ	34 m ³	20 m ³
Durée de stockage	Limitée (Pertes thermiques)	Limitée (Pertes thermiques faible)
Transport de l'énergie	Faible distance	Faible distance
Maturité	Echelle industrielle 20 MW _e	Echelle pilote 100 kW _{th}
Technologie	Simple	Moyenne

Pour sélectionner le type de stockage souhaité, il conviendra de regarder pour quelle application il sera mis en œuvre. Par exemple, le stockage sensible basse température est basé sur les technologies de chauffage solaire thermique (chauffage de l'eau domestique et chauffage solaire urbain). Le stockage sensible haut température concerne principalement les centrales solaires thermodynamiques qui sont des installations destinées à une production à grande échelle. Le stockage latent concerne aussi les centrales solaires qui fonctionnent avec différent type de PCM placée dans un réservoir de stockage, permet de stocker une grande quantité d'énergie à une température fixe. Dans le cadre de cette thèse, c'est la valorisation de l'énergie solaire qui a été retenue. L'échelle de temps est donc plutôt celle de la journée avec une plage de température bien définie.

D'un point de vue économique, l'évaluation des caractéristiques d'un système de stockage thermique nécessite de prendre en compte le coût d'investissement mais aussi les coûts d'exploitation, de maintenance et de recyclage.

Actuellement le stockage par chaleur latente est le procédé de stockage thermique le plus mature technologiquement, celui-ci offre plusieurs avantages par rapport au stockage par chaleur sensible:

- La densité énergétique (volumétrique ou massique) est presque 3 fois plus importante que pour le système de stockage par chaleur sensible;
- La restitution de la chaleur peut se faire à température constante;
- Les densités entrant en jeu dans le stockage par chaleur sensible sont faibles par rapport au stockage latent, les volumes sont donc grands. Ceci est un inconvénient majeur;
- Comparativement au stockage par chaleur sensible, la capacité de stockage de l'énergie thermique des PCM est plus grande donc nécessite moins de volume;
- Le stockage thermique par changement de phase est efficace pour des différences de températures faibles;
- Les pertes thermiques sont faibles par rapport au stockage par chaleur sensible.

I.5. Synthèse du chapitre I

En développant un procédé ou une unité de stockage par chaleur latente à basse température (inférieur à 100°C), aussi de stocker de la chaleur à haute température (au-delà de 400°C, en fonction des caractéristique du système de stockage), une nouvelle génération de systèmes de stockage d'énergie thermique pourra être mise en place dans différents applications, réduisant ainsi les volumes de stockage, permettant de restituer l'énergie à des températures parfaitement contrôlées. Aujourd'hui, développer un tel système reste un défi technologique.

Après cette comparaison, un état de l'art sur le stockage de l'énergie thermique par chaleur latente va être présenté dans le chapitre suivant, cet état regroupe des résultats d'expérience et des travaux de modélisation relative au stockage de l'énergie thermique par chaleur latente. Cet état de l'art permettra de comparer les travaux réalisés dans ce contexte et d'introduire le lecteur aux notions qui sont à la base de ce travail ainsi que pour situer notre travail par rapport à ceux de la littérature.

Bibliographie du chapitre I

- [1] H. Stéphanie, Stockage de chaleur inter-saisonnier par voie thermochimique pour le chauffage solaire de la maison individuelle. Thèse de Doctorat (2011), *Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Mécanique, Énergétique, Acoustique*.
- [2] S.M. Hasnain, Review on sustainable thermal energy storage technologies, part I: heat storage materials and techniques. *Energy Conversion and Management* 11 (1998) 1127-1138.
- [3] S. Himran, A. Suwono and G. Mansoori, Characterization of alkanes and paraffin waxes for application of phase change energy storage medium, *Energy Sources* 16 (1994) 117-128.
- [4] M. Xiao, B. Feng and K. Gong, Preparation and performance of shape stabilized phase change thermal storage materials with high conductivity. *Energy Conversion and Management* 43 (2002) 103-108.
- [5] M. Xiao, B. Feng and K. Gong, Thermal performance of a high conductive shape-stabilized thermal storage material. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 69 (2001) 293-296.
- [6] H. Ait Adine and H. El Qarnia, Numerical analysis of the thermal behaviour of a shell-and-tube heat storage unit using phase change materials. *Applied Mathematical Modelling* 33 (2009) 2132-2144.
- [7] Z.X. Gong and A.S. Mujumdar, Cyclic heat transfer in a novel storage unit of multiple phase change materials, *Applied Thermal Engineering* 16 (1996) 807-815.
- [8] M.M. Farid and A. Kanzawa, Thermal performance of a heat storage module using PCMs with different melting temperatures: mathematical modeling. *Transactions of the ASME. Journal of Solar Energy Engineering* 111 (1989) 152-157.
- [9] Y.Q. Li, Y.L. He, H.J. Song, C. Xu and W.W. Wang, Numerical analysis and parameters optimization of shell-and-tube heat storage unit using three phase change materials. *Renewable Energy* 59 (2013) 92-99.
- [10] T. Watanabe, H. Kikuchi and A. Kanzawa, Enhancement of charging and discharging rates in a latent heat storage system by use of PCM with different melting temperatures, *Heat Recovery Systems & CHP* 13 (1993) 57-66.
- [11] A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen and D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 318-345.
- [12] E. Oro, A. Gracia, A. Castell, M. Farid and L.F. Cabeza, Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications, *Applied Energy* 99 (2012) 513-533.
- [13] J. Xu, R.Z. Wang and Y. Li, A review of available technologies for seasonal thermal energy storage, *Solar Energy* 103 (2014) 610-638.
- [14] M.P. Pardo, Développement d'un procédé de stockage d'énergie thermique haute température par voie thermochimique. Thèse de Doctorat (2013), *Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), Génie des Procédés et de l'Environnement*.
- [15] A. Gil, M. Medrano, I. Martorell, A. Lázaro, P. Dolado, B. Zalba and L. F. Cabeza, State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1-

- Concepts, materials and modellization, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 31-55.
- [16] Lane, Tom. Solar Hot Water Systems: Lessons Learned, 1977 to Today. Energy Conservation Services Of North Florida, Incorporated, 2004.
- [17] D. Verdier-Gorcias, Stockage thermique de protection à chaleur latente intégré à un récepteur solaire à air pressurisé. Thèse de Doctorat (2016), *Ecole doctorale 305, energie et environnement, Université de Perpignan*.
- [18] B. Zalba, J. Marin, L.B. Cabeza and H. Mehling, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Engineering* 23 (2003) 251-283.
- [19] A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen and D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 318-345.
- [20] D. Zhou, C.Y. Zhao and Y. Tian, Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications, *Applied Energy* 92 (2012) 593-605.
- [21] M.M. Farid, A.M. Khudhair and S.A.K. Razak, A review on phase change energy storage: Materials and applications, *Energy Conversion and Management* 45 (2004) 1597-1615.
- [22] M.M. Farid, A review on energy storage with phase changes, Proceeding of Chicago/Midwest Renewable energy workshop, Chicago, USA.
- [23] A. Abhat, Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage material, *Solar Energy* 30 (1983) 313-332.
- [24] G.A. Lane and D.N. Glew, Heat of fusion system for solar energy storage. *In. proceedings of the workshop on solar energy storage subsystems for the heating and cooling of buildings*, 1975.
- [25] S.E. Ango, Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment: développement d'un système actif à matériaux à changement de phase. Thèse de Doctorat (2011), *École nationale supérieure d'arts et métiers, Arts et Métiers ParisTech - Centre de Bordeaux*.
- [26] Z. Ait Hammou, Un accumulateur échangeur de chaleur hybride pour la gestion simultanée des énergies solaire et électrique. Thèse de Doctorat (2006), *Faculté de génie mécanique, université de Sherbrooke*.
- [27] H. Mehling and L.F. Cabeza: Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications, *Heat and Mass Transfer*. Limited, 2008.
- [28] X. Wang, Y. Zhang, W. Xiao, R. Zeng, Q. Zhang and H. Di: Review on thermal performance of phase change energy storage building envelope, *Chinese Science Bulletin* 54 (2009) 920-928.
- [29] M.M. Kenisarin, High temperature phase change materials for thermal energy storage, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 955-970.
- [30] A. Lomonaco, Stockage d'énergie thermique par matériaux à changements de phase adapté aux centrales solaires thermodynamiques. Thèse de Doctorat (2015), *École doctorale des sciences exactes et leurs applications*.

Chapitre II

Stockage thermique par chaleur latente: Système shell-and-tube avec PCM

Introduction.....	27
II.1. Etat de l'art sur les unités shell-and-tube avec PCM.....	28
II.1.1. Analyse comparative et conclusion.....	33
II.2. Modèle physique et équations gouvernantes.....	34
II.2.1. Description du système considéré.....	34
II.2.2. Hypothèses simplificatrices.....	35
II.2.3. Formulation mathématique.....	36
II.2.3.1. Formulation mathématique pour HTF.....	36
II.2.3.2. Conditions initiales et aux limites pour HTF.....	36
II.2.3.3. Formulation enthalpique pour PCM.....	36
II.2.3.4. Conditions initiales et aux limites pour PCM.....	38
II.2.3.5. Présentation des conditions aux limites.....	39
II.2.4. Expression des nombres adimensionnels.....	40
II.3. Méthodes d'analyse des problèmes avec changement de phase.....	41
II.3.1. Méthode à maillage mobile.....	41
II.3.2. Méthode à maillage fixe.....	42
II.3.2.1. Méthode enthalpie-porosité.....	42
II.4. Procédure de résolution et validation.....	43
II.4.1. Etude du maillage.....	43
II.4.2. Etude du time step size.....	44
II.4.3. Validation.....	45
II.5. Résultats et discussion.....	47
II.5.1. Evolution instationnaire de la température de PCM.....	47
II.5.2. Evolution instationnaire de la fraction liquide de PCM.....	48
II.5.3. Effet de la température d'entrée du fluide caloporteur HTF.....	50
II.5.3.1. Variation de la température de PCM.....	50
II.5.3.2. Variation de la fraction liquide.....	51
II.5.3.3. Variation du temps de fusion et de solidification.....	52
II.5.3.4. Variation de l'énergie totale stockée.....	53
II.5.4. Effet de la vitesse d'entrée du fluide caloporteur HTF.....	54
II.5.4.1. Variation de la température de PCM.....	54
II.5.4.2. Variation de la fraction liquide.....	55
II.5.4.3. Variation du temps de fusion et de solidification.....	56

II.5.4.4. Variation de l'énergie totale stockée.....	57
II.5.5. Effet du rayon interne de tube.....	58
II.5.5.1. Variation de la fraction liquide.....	58
II.5.5.2. Variation du temps de fusion et de solidification.....	59
II.5.5.3. Variation de l'énergie totale stockée.....	60
II.6. Synthèse du chapitre II.....	61
 Bibliographie du chapitre II.....	 62

Chapitre II

Stockage thermique par chaleur latente: Système shell-and-tube avec PCM

Introduction

Dans ce chapitre, un système de stockage thermique par chaleur latente constitué de différents principaux éléments est présenté. Le cœur principal c'est l'unité de stockage qui est constitué de plusieurs tubes cylindriques, l'espace annulaire entre ces tubes est remplie de matériau à changement de phase. Celui-ci est chauffé par un fluide caloporteur en écoulement laminaire dans les tubes intérieurs. Le schéma représentant le fonctionnement d'un système de stockage thermique latent est présenté sur la **figure II.1**. Durant l'étape de charge, le fluide caloporteur passe à travers le collecteur solaire, il emmagasine l'énergie thermique produite, puis il circule jusqu'à l'unité de stockage. L'énergie thermique fournie par le fluide caloporteur au PCM permet son échauffement, puis son changement de phase et éventuellement sa surchauffe. Celui-ci est ensuite stocké à la température de charge. Lors de la restitution de l'énergie, le circuit s'inverse, et le PCM change de nouveau de phase pour restituer l'énergie stockée et reprendre son état initial. Sur chaque circuit, des pompes, des vannes et un débitmètre permettent de contrôler le débit du fluide caloporteur.

Afin d'analyser le comportement thermique de ce système de stockage, une approche simpliste permet d'étudier l'échange de chaleur entre le fluide caloporteur et le matériau à changement de phase d'un élément typique à savoir deux tubes concentriques (shell-and-tube).

Cette configuration sera donc la première application qui sera traitée dans ce travail. Le comportement thermique de l'unité de stockage pendant le processus de charge et de décharge est étudié. L'effet de la température et la vitesse d'entrée du fluide caloporteur ainsi que le rayon du tube sur la variation de la température du PCM, sa fraction de fusion, le temps de fusion et de solidification, le temps de charge et de décharge et l'énergie totale stockée sont étudiés et présentés graphiquement.

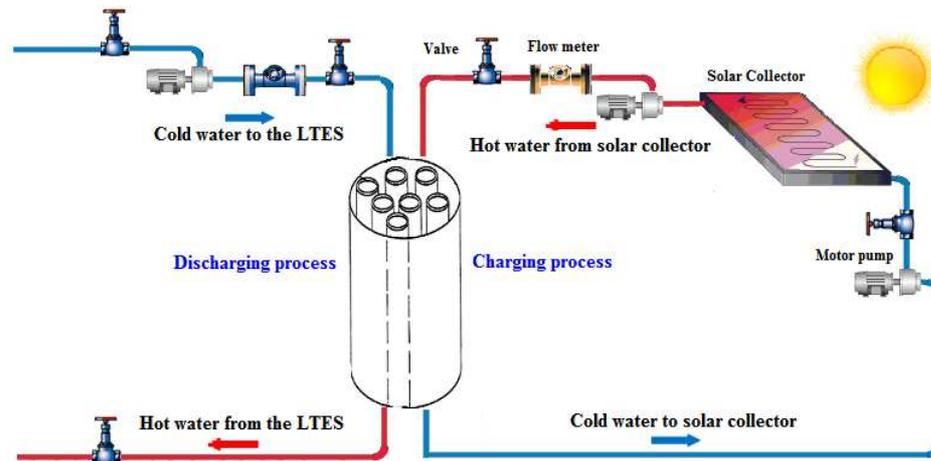


Figure II.1. Fonctionnement d'un système de stockage latent montre le circuit de stockage/déstockage.

II.1. Etat de l'art sur les unités shell-and-tube avec PCM

Les unités de stockage thermique par chaleur latente constituée de deux tubes concentriques ont été l'une des plus abordées dans la littérature traitant des problèmes de transfert thermique entre le fluide caloporteur et le matériau à changement de phase. Toutefois, l'évolution des différents paramètres le long du processus de charge et de décharge doivent être validées. De nombreuses études numériques et expérimentales ont fixé principalement comme objectif, le développement de la technologie de stockage thermique avec changement de phase pour plusieurs applications. De ce fait, plusieurs modèles mathématiques et approches numériques sont disponibles dans la littérature. Il faut noter que la difficulté principale, lors de l'étude de ce type de système de stockage, réside dans la détermination de différents paramètres thermiques, et, plus précisément, la quantité d'énergie que peut stocker un matériau sous l'effet de différents paramètres physiques et géométriques. Dans ce qui suit, une synthèse bibliographique de certaines études analytiques, numériques et expérimentales réalisées dans ce domaine:

Tao et al. [1] ont étudié numériquement les performances d'une unité de stockage constituée de deux tubes cylindriques, l'espace annulaire de ceux-ci est remplie de sel fondu à haute température de fusion (1040 K) comme matériau à changement de phase. Celui-ci est chauffé par un fluide caloporteur en écoulement laminaire dans le tube intérieur. L'effet des différents paramètres physiques et géométriques sur le temps du processus de fusion, le taux de stockage thermique, et l'interface solide/liquide du PCM ont été étudiés. Les résultats montrent que la température d'entrée du fluide caloporteur a le plus grand effet sur le taux de transfert thermique. Pour une augmentation de température d'entrée de 1070 K jusqu'à 1110 K, le temps de fusion réduit à 53%.

Le même type de l'échangeur est examiné par Lacroix [2]. Cependant Lacroix a utilisé un matériau dont la température de fusion est plus basse (300.7 K). L'auteur a développé un modèle théorique pour prévoir le comportement thermique de l'unité de stockage. Le problème multidimensionnel de changement de phase basé sur la méthode d'enthalpie couplée avec un transfert de chaleur par convection provoqué par le fluide caloporteur et la phase solide du PCM est étudié. Les prévisions numériques sont validées avec des données expérimentales. Une série de simulations numériques est alors abordés pour évaluer les effets de divers paramètres sur le procédé de transfert thermique et le comportement du système.

Kibria et al. [3] ont étudié numériquement et expérimentalement un processus de stockage thermique par chaleur latente dominé par un transfert de chaleur par conduction. Le système de stockage est constitué de deux tubes concentriques, avec de la paraffine en tant que matériau à changement de phase, rempli l'espace entre les deux tubes. L'étude expérimentale a été conçue et établi pour examiner et valider le modèle physique et les résultats numériques, **figure II.2**. Une étude paramétrique détaillée est également effectuée pour différents paramètres. Les résultats numériques indiquent que la contribution de la température d'entrée du fluide caloporteur a beaucoup d'influence que le débit massique en termes de temps et délais de stockage.

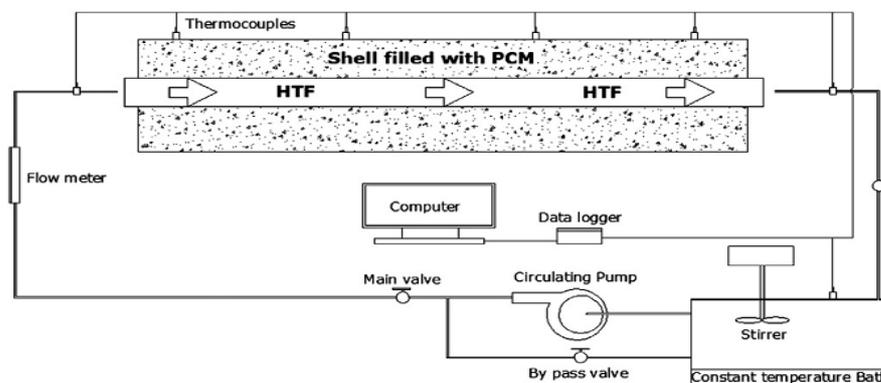


Figure II.2. Dispositif expérimental de stockage.

Wang et al. [4] ont étudié numériquement l'effet de la différence entre la température d'entrée du fluide caloporteur et la température de fusion du matériau à changement de phase, le débit massique du fluide HTF sur la performance de charge et de décharge. La configuration du modèle physique de l'unité de stockage est présentée sur la **figure II.3**. L'approche des volumes finis a été adoptée pour discrétiser les équations gouvernantes. Les résultats prouvent que le processus de charge et de décharge passe par trois étapes principales concernant la variation de température de PCM en fonction du temps. Avec la même configuration et sous la même

température d'entrée de fluide HTF, le temps pour compléter le processus de décharge et petit par rapport au temps de charge.

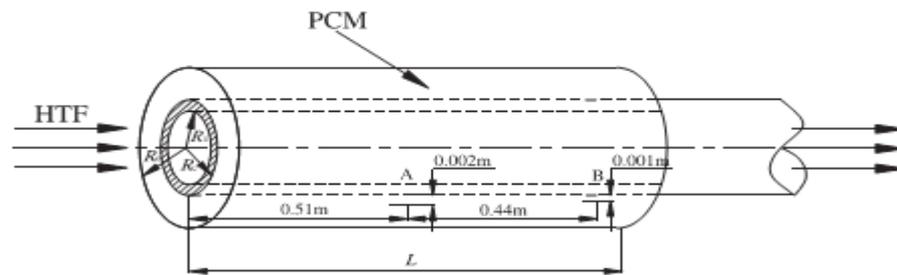


Figure II.3. Schéma de l'unité de stockage.

Dans leur article, [Trp et al. \[5\]](#) ont présenté une analyse numérique du phénomène de transfert thermique transitoire pendant le processus de charge et de décharge d'un système de stockage thermique. Le système se compose d'un récipient et tubes par lequel un écoulement laminaire d'un fluide caloporteur circule. Le PCM, paraffine, remplit l'espace entre le récipient et les tubes. Un code numérique bidimensionnel entièrement implicite sous Fortran a été développé pour résoudre les équations régissant. Une série de calculs numériques a été faite afin d'analyser l'influence de plusieurs conditions de fonctionnement sur le procédé de transfert thermique à l'intérieur de l'unité. Les auteurs présentent des résultats numériques qui pourraient être employés pour bien maîtriser les conditions de fonctionnement et d'optimisation de la géométrie. Dans leur document, [Bechiri & Mansouri \[6\]](#) ont présenté une solution analytique afin d'analyser une unité de stockage par chaleur latente, employant la fonction intégrale exponentielle et la technique de séparation des variables. Les prévisions analytiques sont validées avec les résultats expérimentaux de [Lacroix \[2\]](#). Afin de fournir des directives pour les performances thermiques de l'unité de stockage, les distributions radiales de la température de la paraffine ont été étudiées. L'effet du nombre de Reynolds sur l'énergie thermique stockée et l'efficacité thermique ont été obtenues par une série de calculs analytiques et représentations graphiques.

[Liu et al. \[7\]](#) ont développé et analysé numériquement deux modèles, bidimensionnel et tridimensionnel pour prévoir le processus de fusion de la paraffine, RT58, comme PCM dans une unité de stockage thermique. Le but de leur travail est de développer une technique d'amélioration de transfert thermique par l'intégration de la paraffine dans un milieu poreux formé par une mousse métallique. Les auteurs utilisent l'environnement Ansys pour créer un milieu poreux dans le modèle physique. Le phénomène de changement de phase est résolu par la théorie enthalpie-porosité. Les effets des paramètres concernant la structure du milieu poreux et les conditions d'entrée du fluide HTF sur les caractéristiques thermiques de l'unité sont analysés.

L'article de [Jian-you \[8\]](#) fait l'objet d'une étude numérique et expérimentale d'une unité de stockage thermique constitué de triple tube concentrique. L'espace annulaire entre le tube interne et externe est remplie de PCM, n-Hexacosane. Durant le processus de charge, l'écoulement laminaire d'un fluide chaud HHTF (Hot Heat Transfer Fluid) circule dans le tube externe, alors que le processus de décharge, l'écoulement du fluide froid CHTF (Cold Heat Transfer Fluid) circule dans le tube interne. Pour tester le modèle physique et valider les résultats numériques, un dispositif expérimental a été conçu et construit pour analyser et caractériser le processus fusion/solidification du n-Hexacosane.

[Ismail & Abugderah \[9\]](#) ont étudié numériquement le phénomène de changement de phase transitoire d'un système de stockage thermique par chaleur latente constitué de tubes verticaux. La solution de ce système consiste à résoudre les équations de conservation du fluide caloporteur, de la paroi des tubes et du matériau à changement de phase en un seul domaine. La méthode des différences finies est utilisée pour résoudre les équations décrivant le changement de phase. La répartition radiale de la température, la position de l'interface solide/liquide et les variations de la chaleur latente et sensible accumulées sont présentés pour différents nombres de Reynolds et de Stefan.

Dans leur document, [Trp \[10\]](#) a étudié numériquement et expérimentalement la convection forcée dans un système de stockage d'énergie thermique. La convection a été étudiée entre le fluide caloporteur avec nombre de Prandtl modéré et la paroi du tube. La conduction thermique à travers la paroi et PCM est basée sur la formulation d'enthalpie. La comparaison entre les prédictions numériques et les données expérimentales montre un bon accord pour deux types de processus, fusion non-isotherme et solidification isotherme.

La contribution de [Gong & Mujumdar \[11\]](#), et [El-Dessouky & Al-Juwayhel \[12\]](#) dans le domaine de l'amélioration des performances exergétiques est très riche. Dans la référence [11], les auteurs ont développé une approche théorique, basée sur la seconde loi de la thermodynamique, pose les limites des performances exergétiques d'un système de stockage thermique avec changement de phase. Dans la référence [12], les auteurs parvient aux mêmes conclusions générales: il faut réduire au maximum l'écart de température entre la température de charge et celle de fusion, et entre la température de décharge et celle de solidification.

[Bechiri \[13\]](#) traite à travers son thèse de doctorat le phénomène de stockage/déstockage de l'énergie thermique par chaleur sensible et/ou latente, dans un système de stockage à plaques parallèles et tubes cylindriques. Le stockage par chaleur latente dans une conduite cylindrique est étudié utilisant deux approches: analytique et numérique. Une corrélation donnant la variation du nombre de Nusselt le long de la conduite est développée et l'effet de la convection naturelle de la

phase liquide du PCM, paraffine, est étudié. L'auteur a également étudié l'effet de l'injection des nanoparticules dans le PCM. L'efficacité de stockage et l'énergie stockée sont étudiées en fonction des différents paramètres.

Tao & He [14] ont établi un modèle mathématique bidimensionnel basé sur la méthode d'enthalpie pour une unité de stockage à faisceau de tubes enveloppés par un matériau à changement de phase. Les auteurs analysent numériquement l'effet de la condition transitoire de la température d'entrée de fluide HTF sur la performance thermique de l'unité. Les résultats montrent que le temps de fusion diminue avec l'augmentation de la température d'entrée. Lorsque la température d'entrée augmente de 30°C à 90°C, le temps de fusion diminue de 42,75 min à 20,58 min.

La contribution de Jegadheeswarana & Pohekar [15-16] dans le domaine de l'amélioration de transfert thermique dans les unités de stockage shell-and-tube est très riche. Dans la référence [15], des particules de cuivre à haute conductivité thermique sont ajoutées au PCM afin d'étudier l'amélioration de la performance d'une unité de stockage tubulaire perpendiculaire applicable aux chauffe-eau solaires. Dans la référence [16], une unité shell-and-tube horizontale a été étudiée. Des nanoparticules à haute conductivité thermique sont dispersées dans le PCM pendant le processus de charge. Les résultats indiquent une amélioration significative de la performance de l'unité lorsque des nanoparticules à haute conductivité sont dispersées dans le PCM.

Une étude purement expérimentale a été menée par Akgun et al. [17] afin d'étudier les caractéristiques de fusion/solidification de la paraffine dans trois types de configurations d'un système de stockage d'énergie thermique formé par deux tubes concentriques. Une nouvelle géométrie de stockage d'énergie thermique est introduite. Les effets du nombre de Reynolds et du nombre de Stefan sur les processus de fusion et de solidification ont été examinés.

Tay et al. [18] ont présenté un modèle numérique tridimensionnel pour simuler un ensemble des tubes dans un système de stockage thermique avec changement de phase. Les tubes sont configurés dans un arrangement unique traversant par un fluide caloporteur. Les auteurs utilisent l'environnement Ansys pour développer ce modèle. L'évolution des paramètres thermiques le long du processus et la température des neuf endroits dans le PCM ont été analysées. L'arrangement entre les résultats numériques et les données expérimentales a montré que le modèle développé peut prévoir le comportement thermique de ce système de stockage.

Un nouveau concept basé sur une étude expérimentale a été développée par les mêmes auteurs, Tay et al. [19]. Une technique d'amélioration de transfert thermique dans un système de stockage avec changement de phase a été expérimentalement étudiée: la fusion dynamique. Le PCM fusionné est alors recyclé à l'aide d'une pompe et l'écoulement du PCM fusionné cause le

mélange et augmente le transfert thermique global. La distribution de la température de PCM a été expérimentalement déterminée dans les directions axiales et radiales. Six thermocouples ont été placés à l'intérieur du PCM dans divers endroits, pour fournir des informations qualitatives sur le processus de changement de phase. Les auteurs trouvent d'après les expériences menées que la fusion dynamique était plus efficace par rapport à ceux qui sont sans fusion dynamique.

Erek & Dincer [20] traitent l'efficacité exergetique d'un système de stockage thermique pendant le processus de charge. De nombreuses études paramétriques sont menées pour étudier la façon de laquelle l'interface solide/liquide du PCM, la chaleur emmagasinée, le taux de transfert de chaleur, la génération d'entropie et l'efficacité exergetique se changent avec le temps. Les résultats sont comparés avec des données expérimentales, un bon accord est obtenu pour différents paramètres. Les résultats montrent que la génération d'entropie est cruciale et doit être réduite au minimum afin d'augmenter l'efficacité exergetique et donc les performances du système. Ce travail a apporté de nouvelles perspectives dans l'analyse des systèmes de stockage thermique.

II.1.1. Analyse comparative et conclusion

Le stockage de l'énergie thermique par chaleur latente dans les unités constituées de deux tubes concentriques a été mis en évidence. L'ensemble de publications présentées dans ce chapitre montrent une claire préférence pour les approches numériques et expérimentales par rapport aux approches analytiques. La totalité des modèles physiques et résultats numériques ont été validés avec des données expérimentales [1], [2], [4], [5], [6], [10], [13], [14], [18] et [20]. Les modèles mathématiques adoptés sont basés sur la formulation d'enthalpie qui est la plus adoptée à la résolution numérique des problèmes avec changement de phase, permettre de localiser avec une bonne précision le front de fusion et de solidification.

Le souci principal dans ces études était toujours la détermination de différents paramètres (température de PCM, fraction de fusion, temps de charge et décharge, efficacité de stockage, taux de stockage thermique ...etc.) et, plus précisément, la quantité d'énergie que peut stocker un matériau sous l'effet de différents paramètres physiques et géométriques. Dans le domaine du stockage latent, cette grandeur est fondamentale, car elle permet de comparer les performances des différentes configurations de stockage qui fonctionnent avec différents types de matériaux.

II.2. Modèle physique et équations gouvernantes

II.2.1. Description du système considéré

Le système de stockage par chaleur latente à étudier dans la première partie de notre travail se compose d'un récipient et tubes par lequel un écoulement d'un fluide caloporteur circule. Le PCM remplit l'espace entre le récipient et les tubes, **figure II.4a**. Afin de simplifier le modèle physique et la procédure de résolution, une unité de stockage constitué de deux tubes concentriques fait l'objet d'une étude numérique, **figure II.4b**.

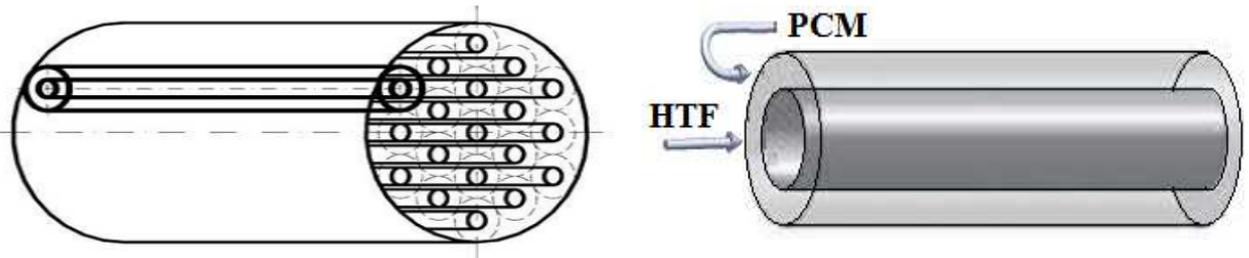


Figure II.4a. Récipient de stockage par chaleur latente.

Figure II.4b. Unité de stockage par chaleur latente.

Les dimensions de l'unité de stockage et les conditions de fonctionnement sont semblables au travail expérimental de Lacroix [2]. La longueur de l'unité est $L=1$ m, le rayon du tube intérieur et extérieur sont $R_1=0.635$ cm et $R_2=1.29$ cm, respectivement. Le fluide caloporteur, eau, circule en régime laminaire à l'intérieur du tube interne est soumis à une température et vitesse d'entrée constante. Le matériau de stockage utilisé dans cette étude est le n-octadécane, sa température de fusion est $T_M=300.7$ K. Les propriétés thermo-physiques du PCM et HTF sont représentés dans le **tableau II.1** et **tableau II.2**, respectivement. Le PCM est en état solide, sa température initiale est 18 K au dessous de la température de fusion pendant la charge, pendant la décharge, le PCM est en état liquide, sa température initiale est 18 K au dessus de la température de fusion. La température d'entrée du fluide caloporteur est ($T=305.7$ K, $T=310.7$ K et $T=320.7$ K) pendant le processus de fusion, et ($T=280.7$ K, $T=290.7$ K et $T=295.7$ K) pendant le processus de solidification. Dans cette étude la différence entre la température d'entrée du fluide HTF et la température de fusion du PCM est (± 5 K, ± 10 K et ± 20 K). Le débit massique est ($Q_m=0.0015$ Kg/s, $Q_m=0.0315$ Kg/s et $Q_m=0.0631$ Kg/s) qui correspond à une vitesse d'entrée de ($U=0.0119$ m/s, $U=0.2514$ m/s et $U=0.5$ m/s). La fusion et la solidification sont traitées comme un problème à conduction bidimensionnelle.

Le comportement thermique de l'unité de stockage pendant le processus de charge et décharge est étudié. Les variations des paramètres thermiques sont étudiées en fonction des différents paramètres physiques, tels que vitesse et température d'entrée du fluide caloporteur et géométrique, tels que le rayon interne de la conduite de stockage.

Tableau II.1. Propriétés thermo-physiques du n-octadécane [2].

n-octadécane	
Température de fusion (K)	300.7
Chaleur latente ($kJ\ kg^{-1}$)	243.5
Conductivité thermique ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)	0.148 (liquide) 0.358 (solide)
Chaleur spécifique ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$)	2222
Masse volumique ($kg\ m^{-3}$)	771
Viscosité cinématique ($m^2\ s^{-1}$)	$4.013 \cdot 10^{-6}$
Viscosité dynamique ($kg\ m^{-1}\ s^{-1}$)	$3.107 \cdot 10^{-3}$

Tableau II.2. Propriétés thermo-physiques du fluide caloporteur [21-22].

Processus de fusion	T=305.7 K	T=310.7 K	T=320.7 K
Masse volumique ($kg\ m^{-3}$)	995	993	989
Conductivité thermique ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)	0.62	0.628	0.64
Chaleur spécifique ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$)	4178	4178	4180
Viscosité dynamique ($kg\ m^{-1}\ s^{-1}$)	$769 \cdot 10^{-6}$	$695 \cdot 10^{-6}$	$577 \cdot 10^{-6}$
Nombre de Prandtl	5.2	4.62	3.77
Processus de solidification	T=295.7 K	T=290.7 K	T=280.7 K
Masse volumique ($kg\ m^{-3}$)	998	999	1000
Conductivité thermique ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)	0.606	0.598	0.582
Chaleur spécifique ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$)	4181	4184	4198
Viscosité dynamique ($kg\ m^{-1}\ s^{-1}$)	$959 \cdot 10^{-6}$	$1080 \cdot 10^{-6}$	$1422 \cdot 10^{-6}$
Nombre de Prandtl	6.62	7.56	10.26

II.2.2. Hypothèses simplificatrices

Le problème étudié concerne le transfert de chaleur entre le fluide caloporteur et le matériau à changement de phase, avec la présence de changement de phase par fusion et solidification. Afin de simplifier le modèle physique et mathématique, les hypothèses simplificatrices suivantes sont adoptées:

- i. Le PCM est supposé homogène et isotrope;
- ii. Le fluide est supposé incompressible et newtonien;
- iii. L'écoulement est supposé laminaire et établi dynamiquement;

- iv. L'écoulement du fluide caloporteur est supposé uni-dimensionnel et symétrique par rapport à l'axe axial de l'unité;
- v. Les propriétés thermo-physiques du PCM sont indépendantes de la température. Mais elles peuvent être différentes pour les phases solide et liquide;
- vi. Le transfert de chaleur dans le PCM se fait par conduction bidimensionnel en régime non-stationnaire;
- vii. Le changement en densité dû à la fusion et la solidification du PCM est négligeable;
- viii. La paroi du tube intérieur est supposée mince et le matériau qui la constitue est supposé un bon conducteur thermique;
- ix. Les pertes thermiques vers le milieu ambiant sont négligeables.

II.2.3. Formulation mathématique

II.2.3.1. Formulation mathématique pour HTF

L'équation bidimensionnelle de conservation d'énergie qui décrit le transfert thermique pour un écoulement laminaire à l'intérieur d'une conduite cylindrique s'écrit en coordonnées cylindriques telle que:

$$\left(\rho C_p\right)_f \left(\frac{\partial T_f(x, r, t)}{\partial t} + U \frac{\partial T_f(x, r, t)}{\partial x} \right) = k_f \left(\frac{\partial^2 T_f(x, r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_f(x, r, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_f(x, r, t)}{\partial x^2} \right) \quad (\text{II.01})$$

$$x > 0, \quad 0 < r < R_1, \quad t > 0$$

II.2.3.2. Conditions initiales et aux limites pour HTF

$$\begin{cases} U_f(x, r, t = 0) = U_{f,ini} \\ T_f(x, r, t = 0) = T_{f,ini} \end{cases} \quad x > 0, \quad 0 < r < R_1 \quad (\text{II.02})$$

A l'entrée de la conduite

$$\begin{cases} U_f(x = 0, r, t) = U_{f,in} \\ T_f(x = 0, r, t) = T_{f,in} \end{cases} \quad 0 < r < R_1, \quad t > 0 \quad (\text{II.03})$$

Condition de symétrie

$$\left. \frac{\partial U_f(x, r, t)}{\partial r} \right|_{r=0} = \left. \frac{\partial T_f(x, r, t)}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad x > 0, \quad t > 0 \quad (\text{II.04})$$

II.2.3.3. Formulation enthalpique pour PCM

En utilisant la méthode d'enthalpie, l'équation de l'énergie est écrite en fonction de l'enthalpie et de la température pour le PCM. En supposant que la masse volumique est identique pour les

deux phases et la conductivité thermique est indépendante de la température. Dans ce cas, le modèle mathématique est formulé en coordonnées cylindriques tel que:

$$(\rho C_p)_{pcm} \frac{\partial \theta_{pcm}(x, r, t)}{\partial t} = k_{pcm} \left[\frac{\partial^2 \theta_{pcm}(x, r, t)}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta_{pcm}(x, r, t)}{\partial r} \right) \right] - \rho_{pcm} \Delta H \frac{\partial f}{\partial t} \quad (\text{II.05})$$

$$x > 0, \quad R_1 < r < R_2, \quad t > 0$$

$$\text{Avec: } \theta_{pcm} = (T_{pcm} - T_M)$$

Comme l'indique la forme de l'équation d'énergie (II.05), la formulation prend en compte le changement de phase. C'est-à-dire que l'enthalpie totale H est définie comme la somme de l'enthalpie sensible h_{pcm} et de la chaleur latente ΔH .

$$H_{pcm}(T) = h_{pcm}(T) + \rho_{pcm} f \Delta H \quad (\text{II.06})$$

$$\text{Avec: } h_{pcm}(T) = \int_{T_M}^T \rho C_p dT \quad (\text{II.07})$$

f et la fraction liquide du PCM

L'expression de la fraction liquide f et de l'enthalpie H en fonction de la température T_{pcm} sont estimées comme suit:

i. *Pour une transition isothermique*

Le PCM change de phase en conservant une température constante [1-4-23]. La variation de l'enthalpie totale en fonction de la température est présentée sur la **figure II.5**. À la température de fusion du PCM, l'enthalpie des phases solide et liquide sont 0 et ΔH respectivement, il existe un saut d'enthalpie égale à la chaleur latente de PCM.

$$\begin{cases} f = 0 & T_{pcm} < T_M \text{ Solide} \\ 0 < f < 1, & T_{pcm} = T_M \text{ Solide + Liquide} \\ f = 1 & T_{pcm} > T_M \text{ Liquide} \end{cases} \quad (\text{II.08})$$

$$\begin{cases} H(T) = Cp_s (T_{pcm} - T_M) & T_{pcm} < T_M \\ H(T) = f \Delta H & T_{pcm} = T_M \\ H(T) = Cp_l (T_{pcm} - T_M) + \Delta H & T_{pcm} > T_M \end{cases} \quad (\text{II.09})$$

A partir de l'équation (II.09), la température T_{pcm} est:

$$\begin{cases} T_{pcm} = T_M + (H / Cp_s) & H < 0 \\ T_{pcm} = T_M & 0 \leq H \leq \Delta H \\ T_{pcm} = T_M + (H - \Delta H) / Cp_l & H > \Delta H \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

ii. Pour une transition non-isothermique

Le PCM change de phase sur un intervalle de température $\Delta T = T_{liquidus} - T_{solidus}$ [10-24-25]. La variation de l'enthalpie totale en fonction de la température est présentée sur la **figure II.6**.

$$\begin{cases} f = 0 & T_{pcm} < T_{solidus} \\ f = \frac{T_{pcm} - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} & T_{solidus} < T_{pcm} < T_{liquidus} \\ f = 1 & T_{pcm} > T_{liquidus} \end{cases} \quad (II.11)$$

$$\begin{cases} H(T) = Cp_s (T_{pcm} - T_{solidus}) & T_{pcm} < T_{solidus} \\ H(T) = Cp_l (T_{pcm} - T_{solidus}) + f \Delta H_{min} & T_{solidus} \leq T_{pcm} \leq T_{liquidus} \\ H(T) = Cp_l (T_{pcm} - T_{liquidus}) + \Delta H_{max} & T_{pcm} > T_{liquidus} \end{cases} \quad (II.12)$$

A partir de l'équation (II.12), la température, T_{pcm} est:

$$\begin{cases} T_{pcm} = T_{solidus} + (H / Cp_s) & 0 < H < \Delta H_{min} \\ T_{pcm} = T_{solidus} + ((H - f \Delta H_{min}) / Cp_l) & \Delta H_{min} \leq H \leq \Delta H_{max} \\ T_{pcm} = T_{liquidus} + ((H - \Delta H_{max}) / Cp_l) & H > \Delta H_{max} \end{cases} \quad (II.13)$$

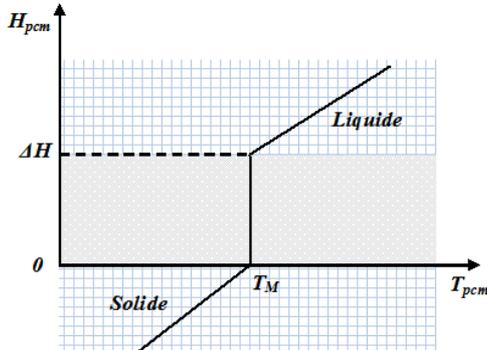


Figure II.5. Enthalpie de PCM en fonction de la température (Transition isothermique).

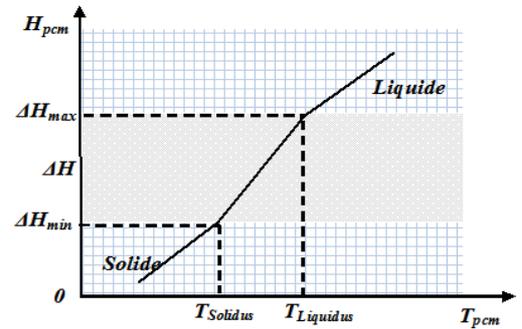


Figure II.6. Enthalpie de PCM en fonction de la température (Transition non-isothermique).

II.2.3.4. Conditions initiales et aux limites pour PCM

$$T_{pcm}(x, r, t = 0) = T_{pcm,ini} \quad x > 0, \quad R_1 < r < R_2 \quad (II.14)$$

Condition adiabatique

$$\left. \frac{\partial \theta_{pcm}(x, r, t)}{\partial r} \right|_{r=R_2} = 0 \quad x > 0, \quad r = R_2, \quad t > 0 \quad (II.15)$$

$$\left. \frac{\partial \theta_{pcm}(x, r, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial \theta_{pcm}(x, r, t)}{\partial x} \right|_{x=L} = 0 \quad R_1 < r < R_2, \quad t > 0 \quad (II.16)$$

L'égalité des flux d'échange à l'interface HTF/PCM est donnée par [1-2-4-14-23]:

$$h_f (\theta_f - \theta(x, r = R_1, t)) = -k_{pcm} \left. \frac{\partial \theta_{pcm}(x, r, t)}{\partial r} \right|_{r=R_1} \quad x > 0, r = R_1, t > 0 \quad (\text{II.17})$$

h est le coefficient de transfert thermique convectif.

L'énergie balancée ou l'équation de bilan énergétique au niveau de l'interface solide-liquide du PCM et la continuité de température est donnée par la condition de Stefan:

$$\begin{cases} -k_l \frac{\partial T_l(x, r, t)}{\partial r} + k_s \frac{\partial T_s(x, r, t)}{\partial r} = \rho \Delta H \frac{\partial S(x, t)}{\partial t} \\ T_l(x, r, t) = T_s(x, r, t) = T_M \end{cases} \quad x > 0, r = S(x, t), t > 0 \quad (\text{II.18})$$

$S(x, t)$ est la position de l'interface solide liquide.

La condition de Stefan (II.18) traduit la chute de l'enthalpie du système (dégagement de la chaleur latente) à la température de fusion T_M . Cette approche est adaptée dans le cas d'un métal pur où le changement de phase s'effectue à une température constante (transition isothermique).

L'expression du nombre de Stefan pour différents transition thermique est donnée par:

$$\begin{cases} Ste = \frac{Cp_l (T_{f, in} - T_M)}{\Delta H}, & \text{Fusion isothermique [6, 9, 11, 12, 15]} \\ Ste = \frac{Cp_s (T_M - T_{f, in})}{\Delta H}, & \text{Solidification isothermique [5, 10]} \\ Ste = \frac{Cp_l (T_{f, in} - T_{solidus})}{\Delta H}, & \text{Fusion non - isothermique [5, 10]} \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

II.2.3.5. Présentation des conditions aux limites

La **figure II.7** permet de détailler les conditions aux limites du domaine de calcul. Sur toutes les surfaces externes et sur les deux directions axiales et radiales, les conditions aux limites sont du type de Neumann pour les termes de température, sauf à l'entrée du canal où nous avons imposé une vitesse et une température du fluide caloporteur constante dont la condition est du type Dirichlet. Sur l'interface HTF/PCM l'égalité des flux d'échange est imposée. La condition de Stefan est appliquée sur l'interface solide-liquide du PCM. L'axe (ox) est l'axe de symétrie du modèle.

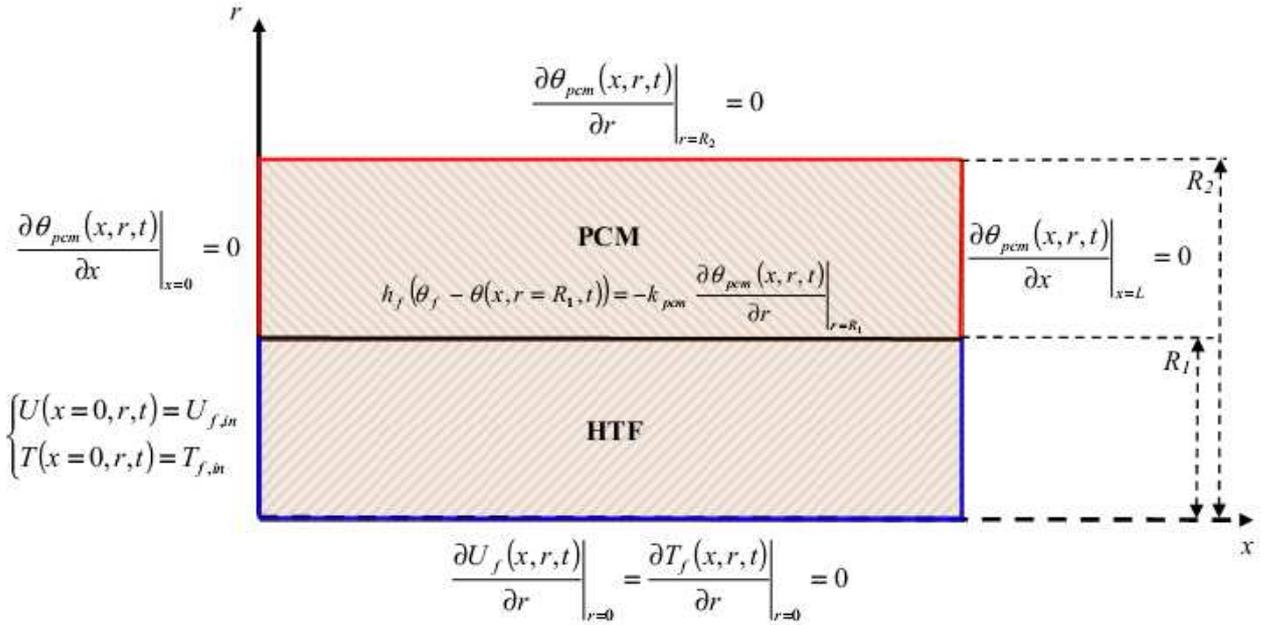


Figure II.7. Présentation des conditions aux limites.

II.2.4. Expression des nombres adimensionnels

Les expressions des nombres adimensionnels (Reynolds, Prandtl, Peclet et Nusselt) sont données par:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Re} = \frac{2R_1 U_{f,in}}{\nu_f} = \frac{4Q_m}{\pi D_1 \mu_f} \quad [5, 9, 10, 12, 20, 24, 26] \\ \text{Pr} = \frac{\nu_f}{a_f} \quad [5, 6, 10, 20, 26] \\ \text{Pe} = \text{Re} \cdot \text{Pr} = \frac{2R_1 U_{f,in}}{a_f} \quad [5, 6, 10, 20, 26] \end{array} \right. \quad (\text{II.20})$$

Le nombre de Nusselt représente le rapport entre le flux thermique échangé au niveau de l'interface HTF/PCM, et le flux conductif diffusé dans l'écoulement. L'expression du nombre de Nusselt en fonction du coefficient de transfert thermique convectif est donnée par [5, 6, 4, 10, 26]:

$$Nu = \frac{2hR_1}{k_f} \quad (\text{II.21})$$

Le coefficient de transfert thermique convectif est calculé à partir des corrélations donnant le nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds et Prandtl [4]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Re} > 2100 \quad Nu = 0.023 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.3} \\ \text{Re} \leq 2100 \quad Nu = 3.657 + 6,874(10^3 xe)^{0.488} e^{(-57.2xe)} \end{array} \right. \quad (\text{II.22})$$

x_e : Coordonnée axiale adimensionnelle donnée par:

$$x_e = \frac{x}{D_2 \text{ Re Pr}} \quad (\text{II.23})$$

II.3. Méthodes d'analyse des problèmes avec changement de phase

Le problème de changement de phase solide-liquide consiste en la résolution des équations de conservation d'énergie entre le fluide caloporteur et le matériau à changement de phase, les variations des propriétés induites par la fusion/solidification du matériau doivent être prises en considération. La solution recherchée consiste à obtenir la distribution de température dans un milieu qui change d'état en décrivant la variation de l'interface solide-liquide. La difficulté principale réside ainsi dans la non-linéarité des propriétés physiques et des équilibres énergétiques à l'interface solide-liquide. Cette interface, évoluant en fonction de la température et du temps, est appelée front de fusion ou de solidification. Peu de méthodes analytiques ont pu résoudre de tels systèmes et cela a laissé place à nombres d'algorithmes numériques basés sur les volumes finis, les différences finies, et les éléments finis, [Idelsohn et al. \[27\]](#), [Soupart-Caron \[28\]](#).

Deux grandes classes de méthodes sont recensées pour résoudre numériquement les phénomènes de changement de phase: la méthode à maillage mobile, et la méthode à maillage fixe. La méthode à maillage mobile n'est pas sélectionnée dans le cadre de cette étude. La méthode à maillage fixe et tout particulièrement la méthode enthalpique sous le modèle de [Voller \[29\]](#) sera au contraire décrite car elle sert de base à notre modèle.

II.3.1. Méthode à maillage mobile

Dans cette méthode, les équations de conservation sont écrites en termes de température dans chaque phase, elles sont résolues séparément dans la région solide et dans la région liquide (Equation: II.24 et II.25). Le processus de changement de phase est alors pris en considération à travers les conditions aux limites imposés à l'interface qui se déplace au cours du temps, et par conséquent entraîne la modification des domaines occupés par les deux phases. Cette méthode requière parfois l'utilisation des schémas numériques avec maillage mobile afin de connaître la position exacte de l'interface à chaque pas de temps, [Soupart-Caron \[28\]](#). La mise en œuvre de cette méthode est très complexe et très lourde. En effet, les équations de conservation de l'énergie doivent être discrétisées dans chacune des phases et elles sont liées par la discrétisation de l'équation du bilan d'énergie à l'interface solide-liquide, [Guichard \[30\]](#). Cette méthode est

adaptée dans le cas d'un métal pur où le changement de phase s'effectue à une température constante.

$$(\rho C_p)_s \frac{\partial T_{pcm}(x, r, t)}{\partial t} = k_s \left[\frac{\partial^2 T_{pcm}(x, r, t)}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_{pcm}(x, r, t)}{\partial r} \right) \right] \quad (\text{II.24})$$

$$(\rho C_p)_l \frac{\partial T_{pcm}(x, r, t)}{\partial t} = k_l \left[\frac{\partial^2 T_{pcm}(x, r, t)}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_{pcm}(x, r, t)}{\partial r} \right) \right] \quad (\text{II.25})$$

À l'interface solide liquide, les deux équations (II.24 et II.25) sont couplées avec la condition de Stefan (Equation: II.18).

II.3.2. Méthode à maillage fixe

La méthode à maillage fixe consiste à résoudre une seule équation différentielle partielle dans tout le domaine de calcul en considérant l'interface solide/liquide comme résultante du calcul, et donc il n'est pas nécessaire de considérer les deux phases séparément. Pendant le calcul, le maillage reste fixe et les équations gouvernant le transfert de chaleur dans la région liquide et la région solide est résolue simultanément malgré la discontinuité du gradient de la température à l'interface. L'avantage de cette méthode réside dans la simplicité et la facilité de mettre en œuvre même dans le cas tridimensionnel. La méthode enthalpie-porosité est considérée comme la méthode la plus efficace et la plus précise des méthodes à maillage fixe, [Soupart-Caron \[28\]](#).

II.3.2.1. Méthode enthalpie-porosité

La méthode d'enthalpie-porosité est utilisée pour la modélisation du processus de changement de phase [\[29-31-32\]](#). Dans cette méthode, l'interface liquide n'est pas suivie de manière explicite. Le maillage de calcul reste fixe et la condition de changement de phase au niveau d'interface n'est pas imposée. À la place, une quantité appelée la fraction liquide (ou porosité) est associée à chaque cellule dans le domaine et indique la cellule qui est sous forme liquide. La fraction liquide est calculée à chaque itération, sur la base d'un bilan d'enthalpie.

La région pâteuse « mushy region » est une région dans laquelle la fraction liquide est comprise entre 0 et 1. La zone pâteuse est modélisée comme un milieu poreux dans lequel la porosité diminue de 1 à 0 quand le matériau se solidifie. Lorsque le matériau est complètement solidifié dans une cellule, la porosité devient nulle [\[15-33-34-35-36\]](#).

Le modèle de transfert thermique que nous avons développé est basé sur la formulation d'enthalpie qui est la plus adoptée à la résolution numérique des problèmes avec changement de phase. La méthode d'enthalpie-porosité de Voller est actuellement la méthode la plus utilisée

pour modéliser le changement de phase. Des logiciels commerciaux comme Fluent ont d'ailleurs codé d'un module de changement de phase solide/liquide en se basant sur cette méthode.

II.4. Procédure de résolution et validation

Les équations de conservation d'énergie pour le fluide HTF et le PCM présentés dans la section précédente, en mettant en évidence les hypothèses qui ont été faites pour les simplifier, sont résolues numériquement par la méthode des volumes finis en utilisant le code de simulation Fluent 6.3.26. Le module de melting/solidification de Fluent, basé sur le modèle de Voller est appliqué dans ce cas.

La géométrie et le maillage sont générés par le logiciel de maillage Gambit 2.2.30. Les mailles sont de types quadratiques. La taille et le type des mailles sont des paramètres qui influencent la précision des résultats. Pour cela, une étude détaillée sur l'influence du maillage est présentée dans le paragraphe suivant. Concernant la résolution des équations gouvernante par la méthode des volumes finis avec Fluent 6.3.26, le schéma First Ordre Upwind est choisi pour discrétiser l'équation de conservation d'énergie pour le fluide HTF et le PCM. Les différents tests de simulations ont nécessité plusieurs heures de calcul pour chaque cas, afin d'atteindre l'état stationnaire. Cette résolution nous a permis d'appréhender la variation instationnaire de différents paramètres thermique le long du processus de charge et de décharge, notamment la fraction liquide qui nous a permis d'estimer le temps complète de fusion et de solidification. Plus de détails sur la résolution des problèmes de stockage thermique par chaleur latente avec Fluent peuvent être trouvés dans l'article présenté par [Al-abidi et al. \[37\]](#).

II.4.1. Etude du maillage

Nous cherchons à obtenir une estimation précise de la variation de la température de PCM ($T_M=300.7$ K). Pour cela, une étude du maillage a été réalisée dans le but de s'assurer que la solution obtenue ne soit pas affectée par la taille du maillage. Nous avons étudié le problème avec six maillages quadratiques différents ((100x20), (100x30), (100x40), (300x20), (300x30), (300x40)), et pour les mêmes conditions de calcul. Les différents types de maillages sont représentés sur la **figure II.8**. La variation instationnaire de la température pour un point considéré dans le PCM pendant le processus de fusion est représenté sur la **figure II.9 (a-b)**. Il est clair que les maillages 4, 5 et 6 ne sont pas convenables, car l'effet de la taille du maillage sur la variation de la température est considérable, ainsi, ils présentent un changement de phase presque instantané, l'évolution de température ne permet pas de suivre la période de changement de phase, pour ces raisons les maillages 4, 5 et 6 sont écartés. Par contre, les maillages 1, 2 et 3 sont acceptables, parce que l'écart entre les courbes correspondantes est très faible, ils présentent

aussi un temps de fusion relativement long et stable à la température de fusion ($T=300.7$ K) par rapport aux autres maillages, **figure II.9a**. Une légère perturbation thermique au voisinage de la température de fusion a été remarquée pour les maillages 2 et 3, **figure II.9b**. En conclusion, le maillage 1 présente le meilleur maillage de calcul. Ce maillage comporte un nombre d'élément égal à 100 dans la direction axiale et 20 dans la direction radiale.

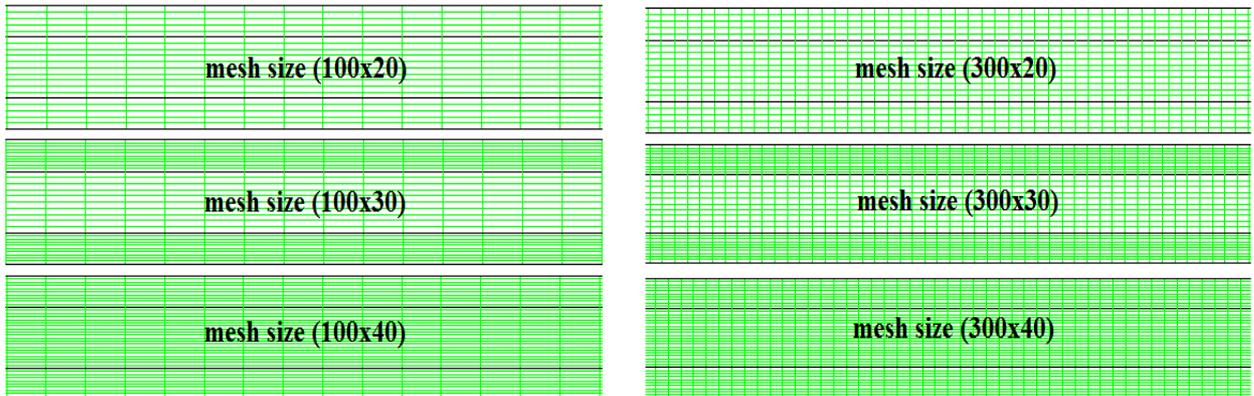


Figure II.8. Différents types de maillage testés.

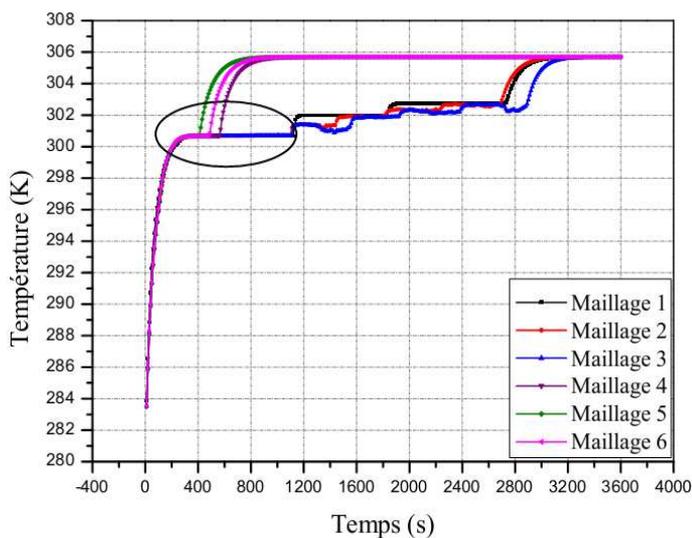


Figure II.9a. Variation de température pour différents maillages.

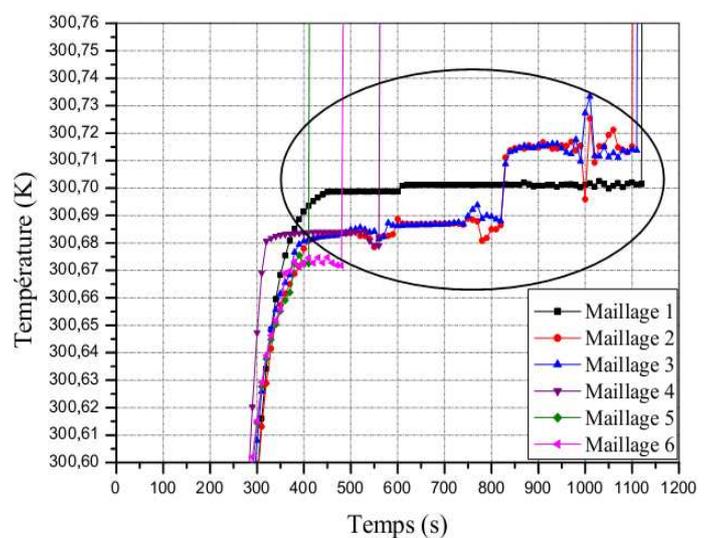


Figure II.9b. Variation de température pour différents maillages (Résultats agrandis).

II.4.2. Etude du time step size

En parallèle, une étude concernant l'influence du pas de temps sur la variation de la température de PCM a été réalisée. Pour cela, nous avons fait une série de simulations pour les mêmes conditions de calcul en faisant varier le pas de temps, et en gardant la même taille de maillage (100x20). Nous avons étudié le problème avec quatre pas de temps différents, 1 s, 2 s, 3 s et 5 s. En observant la **figure II.10 (a-b)**, montre la variation instationnaire de la température pour un point considéré dans le PCM. Le pas de temps de 1 s, est écarté, car l'évolution de la température

de PCM ne permet pas d'observer la période de changement de phase correspond à la température de fusion. Par contre, les pas de temps de 2 s, 3 s et 5 s sont acceptables, l'écart entre les courbes correspondantes est très faible, **figure II.10a**. Une légère variation thermique au voisinage de la température de fusion a été remarquée pour les pas de temps de 2 s et 3 s, **figure II.10b**. En conclusion, le pas de 5 s est le meilleur pas de temps observé, car il offre une bonne estimation sur la variation de la température de PCM.

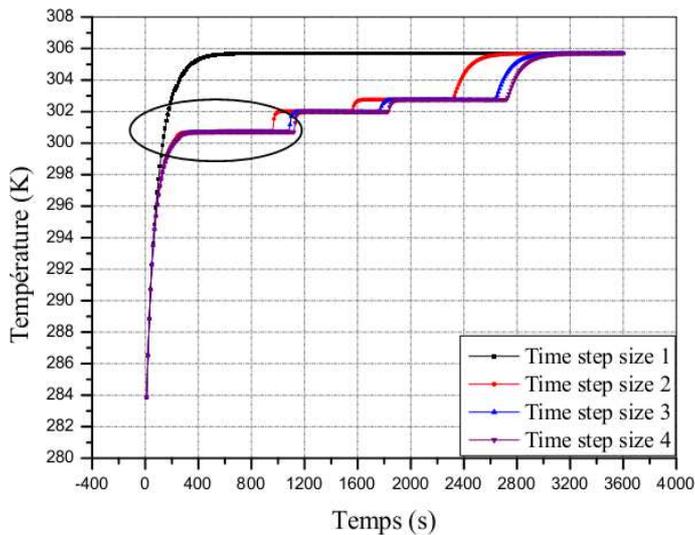


Figure II.10a. Variation de température pour différents time step.

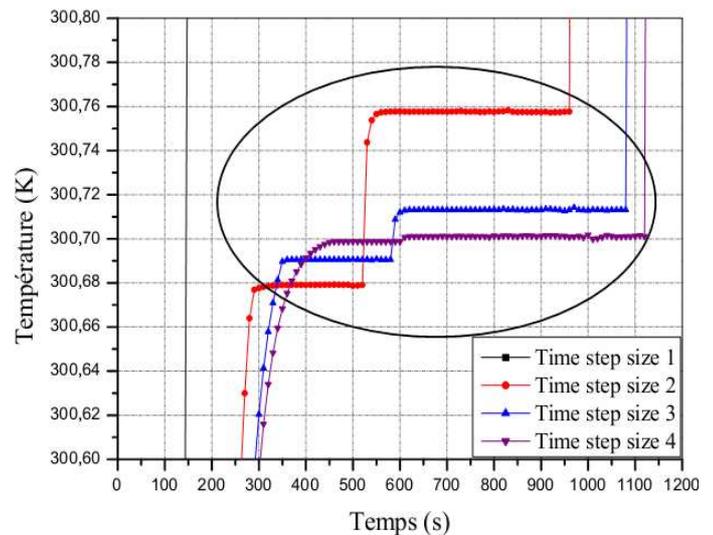


Figure II.10b. Variation de température pour différents time step (Résultats agrandis).

II.4.3. Validation

Les équations de base utilisées pour la modélisation du processus de fusion ont été présentées. Cependant, cette démarche mathématique doit être validée. Il s'agit alors de déterminer un certain degré de confiance en cherchant des points de validation avec des résultats expérimentaux. Pour cela, nous avons comparé les résultats de notre modèle mathématique et notre procédure de calcul avec les résultats expérimentaux de Lacroix [2], en simulant dans les mêmes conditions opératoires le processus de fusion de n-octadécane utilisé comme PCM. L'étude expérimentale de Lacroix est basée sur un élément typique à savoir deux tubes concentriques, similaire à celui présenté en section (II.2.1). Trois valeurs de températures d'entrées du fluide caloporteur sont testés ($T=305.7$ K, $T=310.7$ K et $T=320.7$ K), le débit massique du fluide caloporteur, eau, est fixé à $0,0315$ kg/s. Les températures sont mesurées expérimentalement par des thermocouples et calculées à l'intérieur du PCM à deux points de référence situé à: $T1$ ($x=0.51$, $r=0.009$) m et $T2$ ($x=0.95$, $r=0.0089$). En observant la **figure II.11 (a-b-c)**, montre une comparaison entre les résultats de simulation numérique et les résultats

expérimentaux pour les variations instationnaires de la température de PCM pour les deux points considérés.

La comparaison entre les résultats de simulation numériques et les données expérimentales montre une bonne concordance. Alors le modèle est validé, signifiant que nous sommes capables de reproduire des informations sur l'évolution des autres paramètres afin de connaître le comportement thermique de l'unité. Cependant, soulignons que les résultats qui seront présentés vont donner une représentation approchée et non une représentation exacte de la réalité, vue les hypothèses simplificatrices qui ont été faites.

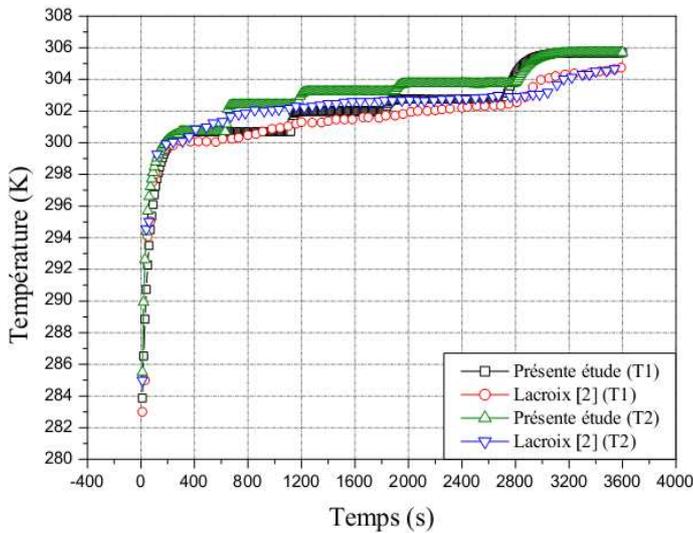


Figure II.11a. Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux, $T_{f,in}=305.7$ K.

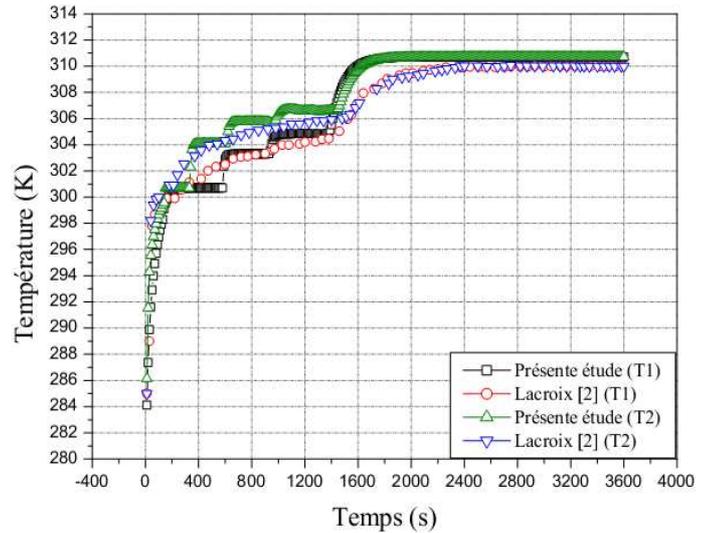


Figure II.11b. Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux, $T_{f,in}=310.7$ K.

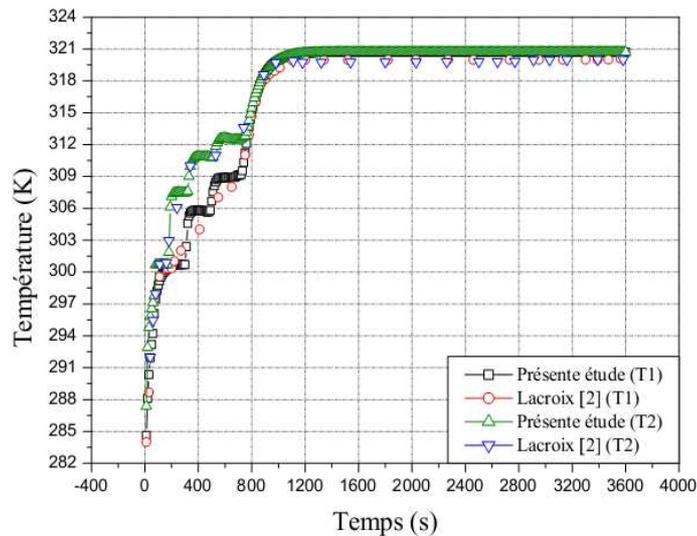


Figure II.11c. Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux, $T_{f,in}=320.7$ K.

II.5. Résultats et discussion

II.5.1. Evolution instationnaire de la température de PCM

L'évolution instationnaire de la température de PCM pour trois points de référence durant le processus de fusion et solidification est présenté sur les **figures II.12 (a-b)** et **figures II.13 (a-b)**, respectivement. Les résultats montrent que le processus de fusion et de solidification passe par trois périodes selon la variation de la température de PCM: variation rapide, pas de variation et variation très long. Durant le processus de fusion, **figures II.12 (a-b)**: durant la 1^{ère} période, on constate que la température de PCM augmente rapidement jusqu'à son point de fusion ($T=300.7$ K). Durant la 2^{ème} période, la température de PCM reste constante pendant une période. Durant la 3^{ème} période, la température augmente progressivement jusqu'à atteindre la température d'entrée du fluide caloporteur ($T_{f,in}=305.7$ K et $T_{f,in}=310.7$ K). Le processus de solidification montre les mêmes périodes défini pour la fusion, mais avec une diminution de la température de PCM, **figures II.13 (a-b)**.

Pour la même température d'entrée du fluide caloporteur, les résultats montrent que le palier correspondant à la fusion ou à la solidification du matériau augmente d'un point à un autre. La variation radiale en termes d'évolution thermique en fonction du temps dans le PCM est bien remarquable. Ainsi, pour le même point de référence, l'augmentation de la différence de température entre le HTF et le PCM provoque une diminution du palier correspondant à la fusion ou à la solidification.

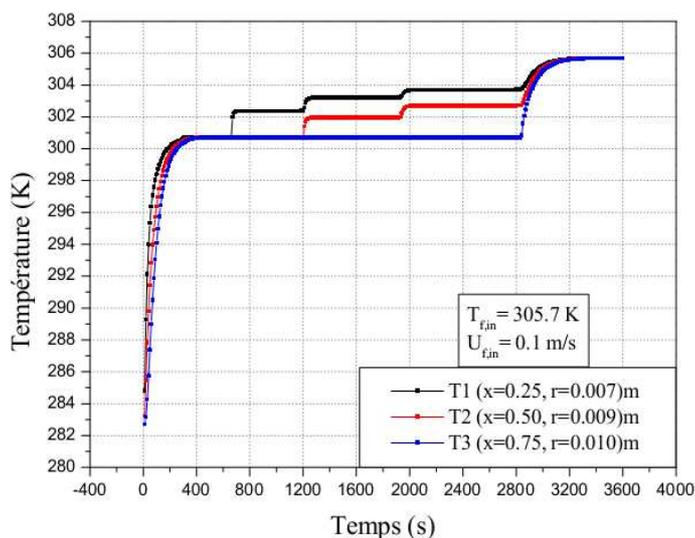


Figure II.12a. Evolution instationnaire de la température de PCM durant le mode de fusion ($T_{f,in} = 305.7$ K).

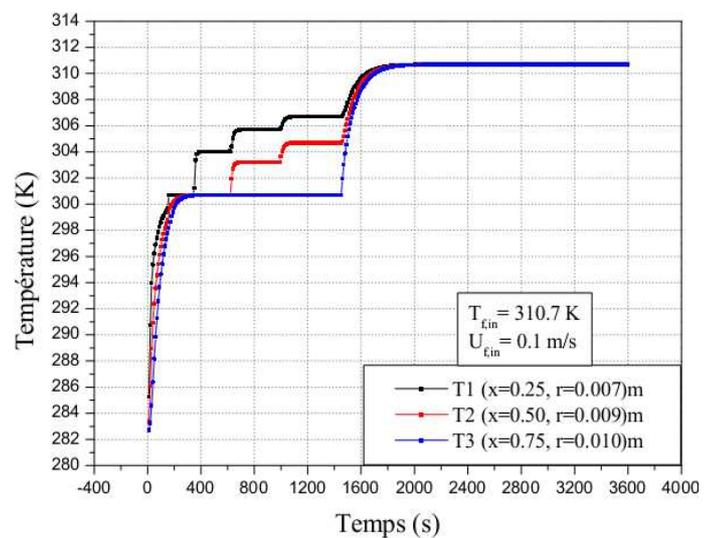


Figure II.12b. Evolution instationnaire de la température de PCM durant le mode de fusion ($T_{f,in} = 310.7$ K).

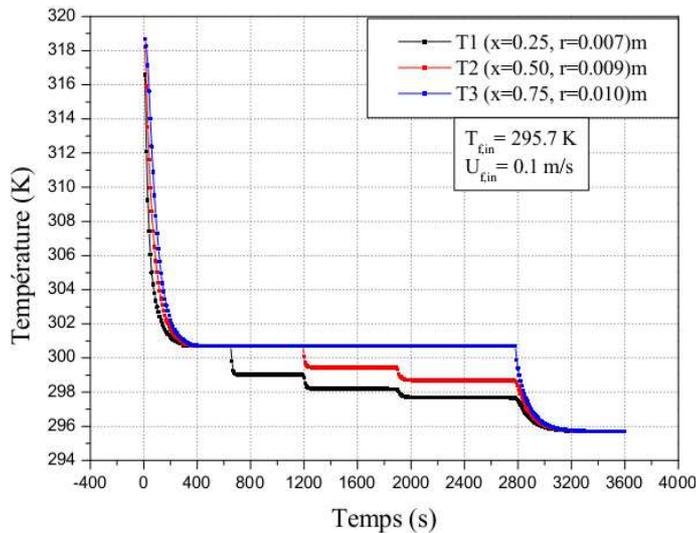


Figure II.13a. Evolution instationnaire de la température de PCM durant le mode de solidification ($T_{f,in} = 295.7 \text{ K}$).

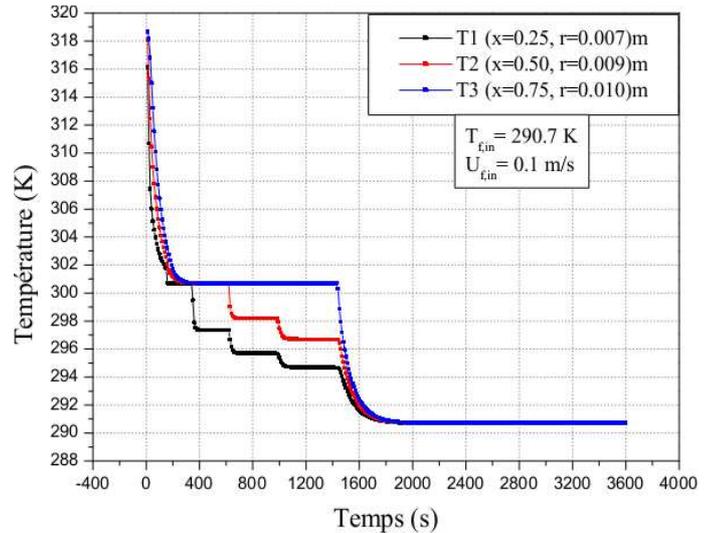


Figure II.13b. Evolution instationnaire de la température de PCM durant le mode de solidification ($T_{f,in} = 290.7 \text{ K}$).

II.5.2. Evolution instationnaire de la fraction liquide de PCM

L'évolution instationnaire de la fraction liquide pour les mêmes points de référence durant le processus de fusion et solidification est présenté sur les **figures II.14 (a-b)** et **figures II.15 (a-b)**, respectivement. Les résultats confirment ce que nous avons présenté à propos de la température. Le processus de stockage peut être divisé en trois étapes selon la variation de la fraction liquide, **figures II.14 (a-b)**: (1) 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 liquide est zéro; (2) la seconde est l'étape de stockage par chaleur latente, où la température de PCM atteint la température de fusion, et la fraction liquide augmente de zéro à un; (3) la troisième 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, et la fraction liquide est un. Pendant le processus de déstockage, ce paramètre varie en inverse par rapport au processus de stockage, **figures II.15 (a-b)**.

Durant le processus de stockage, et pour la même température d'entrée du fluide caloporteur, en observant la première étape, le palier correspondant à la phase solide de PCM augmente d'un point à un autre. La variation radiale en termes d'évolution de l'interface solide/liquide en fonction du temps est bien remarquable. Ainsi, pour le même point de référence, l'augmentation de la température d'entrée du fluide caloporteur provoque une diminution du palier correspondant à la phase solide.

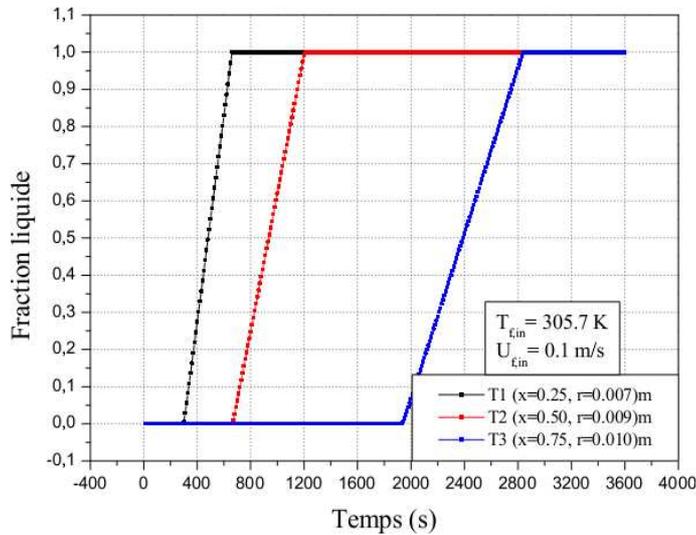


Figure II.14a. Evolution instationnaire de la fraction liquide durant le mode de fusion ($T_{f,in} = 305.7 \text{ K}$).

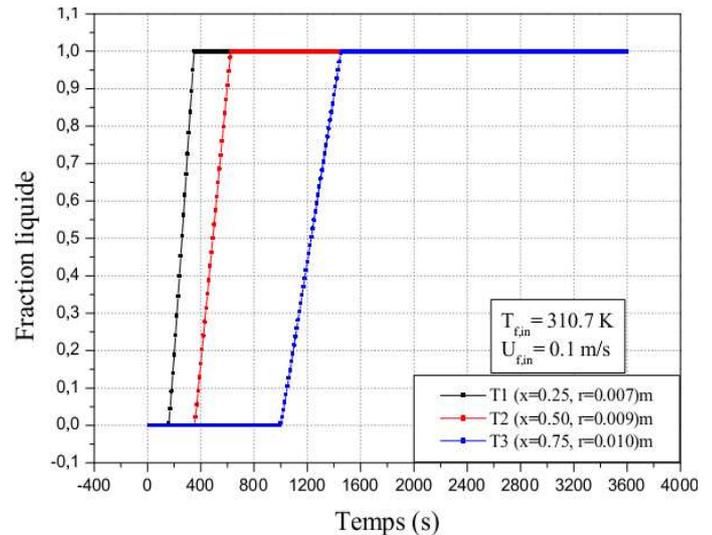


Figure II.14b. Evolution instationnaire de la fraction liquide durant le mode de fusion ($T_{f,in} = 310.7 \text{ K}$).

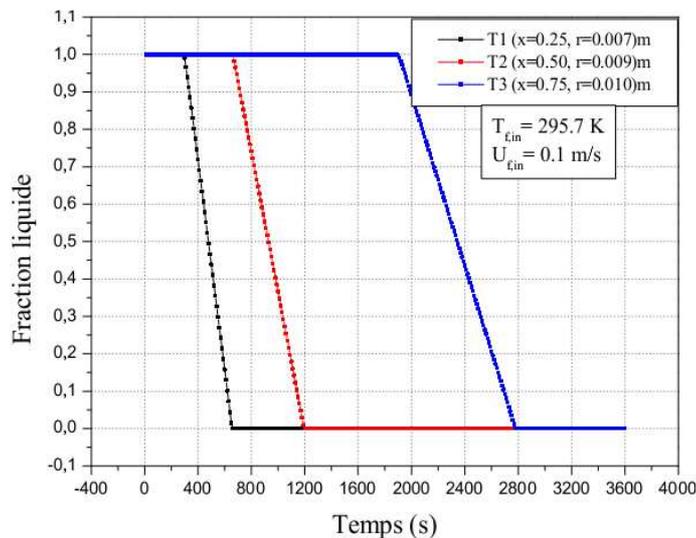


Figure II.15a. Evolution instationnaire de la fraction liquide durant le mode de solidification ($T_{f,in} = 295.7 \text{ K}$).

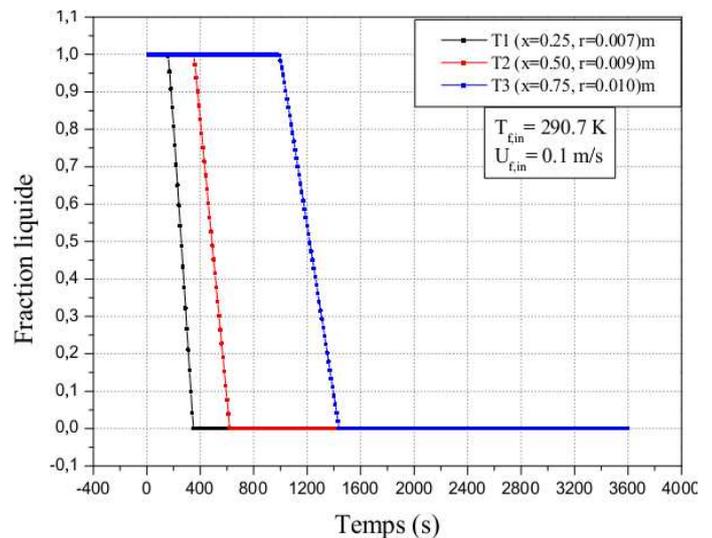


Figure II.15b. Evolution instationnaire de la fraction liquide durant le mode de solidification ($T_{f,in} = 290.7 \text{ K}$).

Pour bien illustrer le processus de charge et de décharge, la **figure II.16** montre le mécanisme de transfert thermique et le changement de phase à l'intérieur de l'unité. Durant la fusion, le PCM il est en état solide, l'énergie thermique fournie par le fluide caloporteur au PCM permet son échauffement, puis son changement de phase et éventuellement sa surchauffe. L'interface HTF/PCM représente le point de départ de l'évolution de l'interface solide/liquide. Durant la solidification, le PCM il est en état liquide chauffé, le flux thermique fourni au fluide froid permet son refroidissement, après il reprend son état initial.

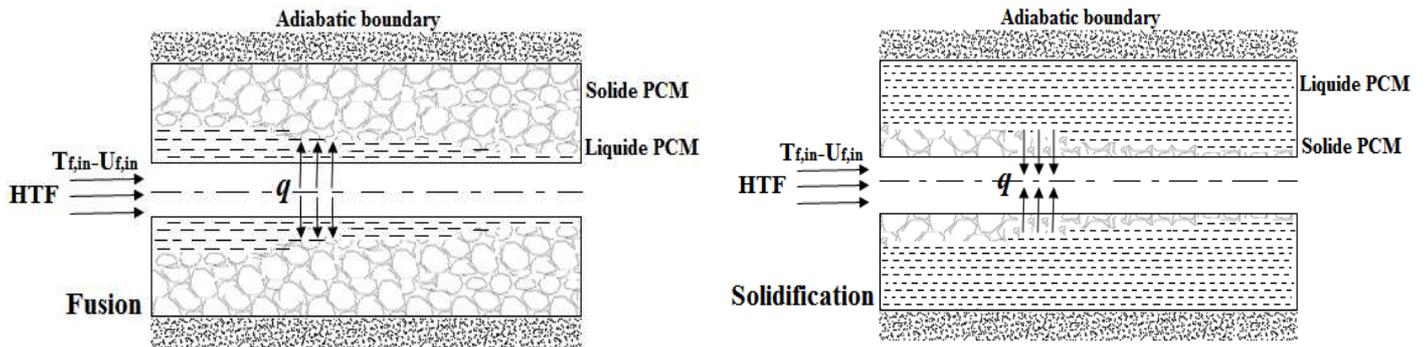


Figure II.16. Mécanisme de changement de phase à l'intérieur de l'unité durant la fusion et la solidification.

II.5.3. Effet de la température d'entrée du fluide caloporteur HTF

La variation de la température et la fraction liquide de PCM durant les deux cycles de charge et de décharge, pour des températures d'entrée du fluide caloporteur différentes et une vitesse d'entrée constante ($U_{f,in}=0.05$ m/s) sont calculées à l'intérieur de PCM aux points: A ($x=0.51$, $r=0.009$) m et B ($x=0.95$, $r=0.0089$) m.

II.5.3.1. Variation de la température de PCM

En observant les **figures II.17 (a-b)** et **figures II.18 (a-b)**, montrent l'effet de la température d'entrée du fluide caloporteur sur la variation de la température de PCM durant la charge et la décharge, respectivement.

Pendant le processus de charge, **figures II.17 (a-b)**: avec l'augmentation de la température d'entrée du fluide caloporteur, la différence de température entre le HTF et PCM augmente. Cette augmentation engendre un fort gradient de température au niveau de l'interface HTF/PCM, qui permet d'avoir un taux de fusion de PCM important. Donc la température de PCM évolue très rapidement jusqu'à la fin du processus. Cette augmentation provoque aussi un faible temps de fusion et donne plus de transfert d'enthalpie entre le fluide HTF et le PCM. Il faut cependant noter que, la variation de la température de PCM pendant la 1^{ère} période de stockage sensible est presque la même pour les trois valeurs de températures d'entrée.

Pendant le processus de décharge, **figures II.18 (a-b)**: le même comportement thermique que la charge est observé. C'est avec la diminution de la température d'entrée du fluide HTF qui provoque un taux de solidification important, la température de PCM évolue très rapidement jusqu'à la fin du processus. Un faible temps de solidification est observé pour une faible température d'entrée du fluide HTF.

On comparant les deux processus charge/décharge, les résultats ne sont pas symétrique en terme de variation thermique, malgré que les conditions concernant les paramètres physique imposés

(différence de température et vitesse) sont les mêmes. Cette différence est due à la valeur de la conductivité thermique imposée pour chaque processus. En effet, une conductivité thermique de 0.358 W/m.K correspond à la phase solide de PCM est imposé durant le mode de charge. Par contre, une valeur de 0.148 W/m.K correspond à la phase liquide de PCM est imposé durant le mode de décharge.

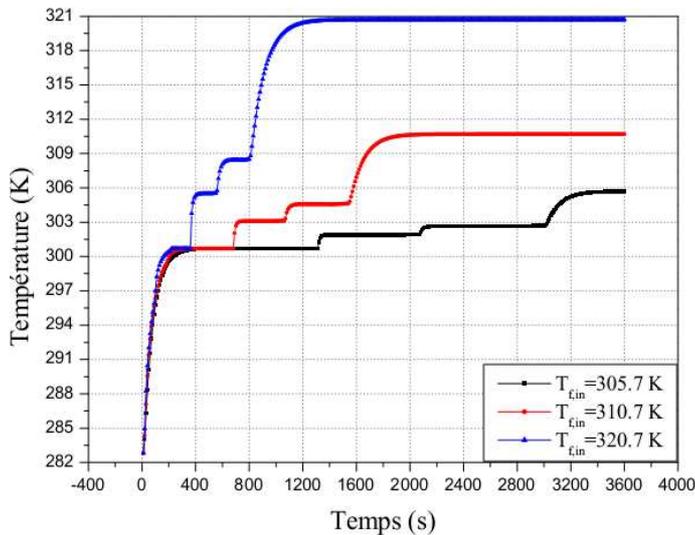


Figure II.17a. Effet de la température d'entrée du fluide HTF sur la variation de la température durant la fusion, $A(x=0.51, r=0.0099)$ m.

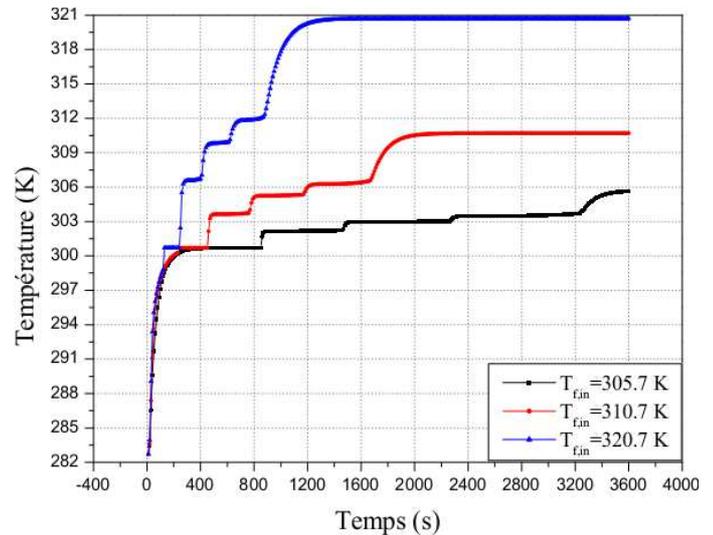


Figure II.17b. Effet de la température d'entrée du fluide HTF sur la variation de la température durant la fusion, $B(x=0.95, r=0.0089)$ m.

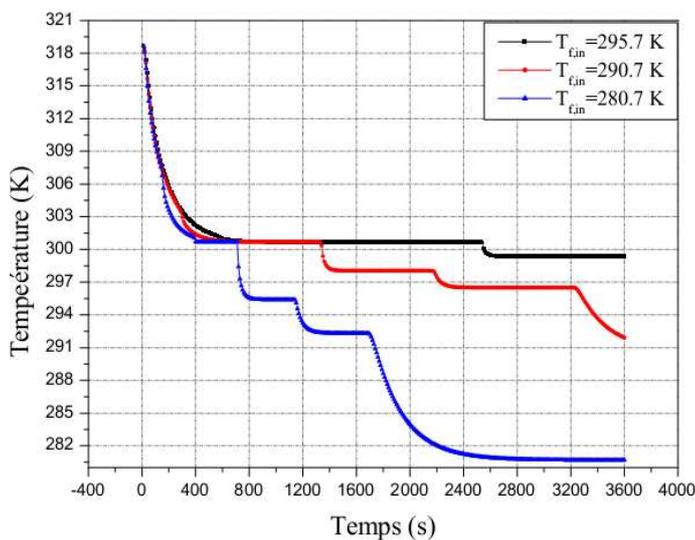


Figure II.18a. Effet de la température d'entrée du fluide HTF sur la variation de la température durant la solidification, $A(x=0.51, r=0.0099)$ m.

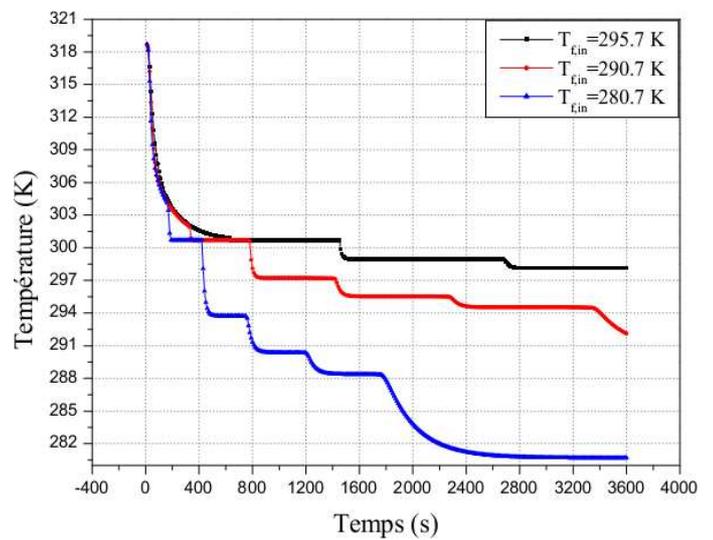


Figure II.18b. Effet de la température d'entrée du fluide HTF sur la variation de la température durant la solidification, $B(x=0.95, r=0.0089)$ m.

II.5.3.2. Variation de la fraction liquide

En observant la **figure II.19 (a-b)**, montre la variation de la fraction liquide pour différents températures d'entrées du fluide caloporteur. L'interprétation physique de l'évolution de la

fraction liquide est similaire à celui présenté pour la température. Le taux de fusion ou de solidification de PCM devient important pour une grande différence de température imposée entre le fluide caloporteur et le PCM (± 10 K et ± 20 K). Pour cela, il y'aura une variation très rapide de la fraction liquide de PCM jusqu'à la fin du processus.

Durant la fusion, **figure II.19a**, la 2^{ème} étape de stockage latent se termine après 1320 s, 680 s et 370 s, pour une différence de température imposée +5 K, +10 K et + 20 K, respectivement. Durant la solidification, **figure II.19b**, la 2^{ème} étape de déstockage latent se termine après 2540 s, 1340 s et 720 s, pour une différence de température imposée -5 K, -10 K et - 20 K

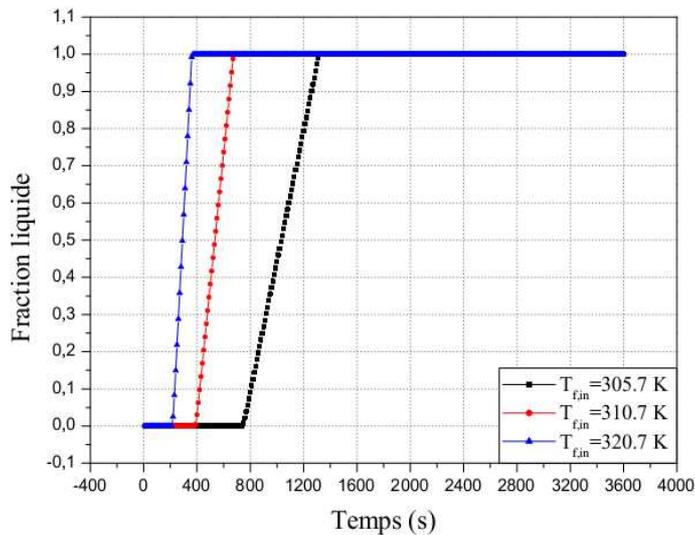


Figure II.19a. Effet de la température d'entrée du fluide HTF sur la variation de la fraction liquide, Fusion, $A(x=0.51, r=0.0099)$ m.

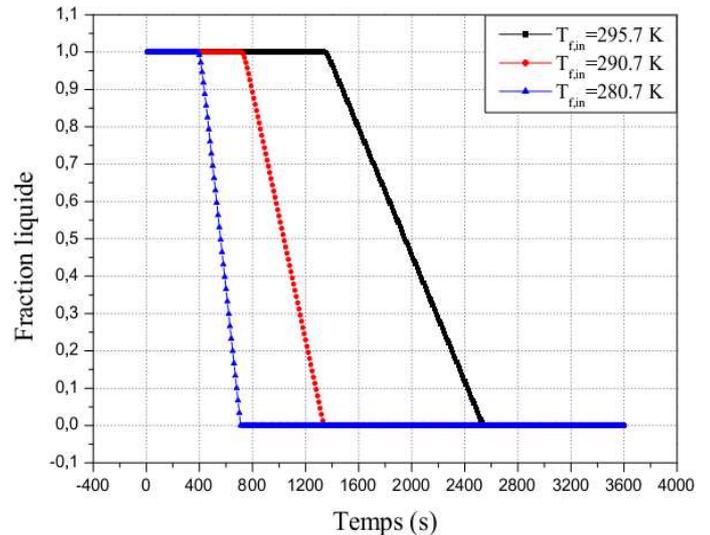


Figure II.19b. Effet de la température d'entrée du fluide HTF sur la variation de la fraction liquide, Solidification, $A(x=0.51, r=0.0099)$ m.

II.5.3.3. Variation du temps de fusion et de solidification

L'effet de la température d'entrée du fluide caloporteur sur le temps de fusion et de solidification de PCM est montré sur la **figure II.20 (a-b)**. Pour une vitesse d'entrée imposée, l'augmentation de la différence de température entre le HTF et le PCM provoque un taux de fusion et de solidification important, donc le temps de fusion et de solidification diminue.

Durant la charge, **figure II.20a**, quand la température d'entrée augmente de 302.7 K jusqu'à 325.7 K, le temps de fusion diminue de 146.83 min à 13.66 min, ce qui réduit le temps de fusion à 90.7 %, pour une vitesse imposé 0.01 m/s. Pour une vitesse 0.05 m/s, le temps de fusion diminue de 122.16 min à 10.83 min, ce qui réduit le temps de fusion à 91.10 %. Pour une vitesse 0.15 m/s, le temps de fusion diminue de 112.33 min à 10 min, ce qui réduit le temps de fusion à 91.13 %. Il faut cependant noter que, l'augmentation de température d'entrée au-delà de 325.7 K, la diminution du temps de fusion devient faible.

Durant la décharge, **figure II.20b**, quand la température d'entrée diminue de 298.7 K jusqu'à 275.7 K, le temps de solidification diminue de 283.83 min à 26.33 min, ce qui réduit le temps de solidification à 90.72 %, pour une vitesse imposé 0.01 m/s. Pour une vitesse 0.05 m/s, le temps de solidification diminue de 210 min à 23 min, ce qui réduit le temps de solidification à 89.04 %. Pour une vitesse 0.15 m/s, le temps de solidification diminue de 180 min à 22 min, ce qui réduit le temps de solidification à 87.77 %.

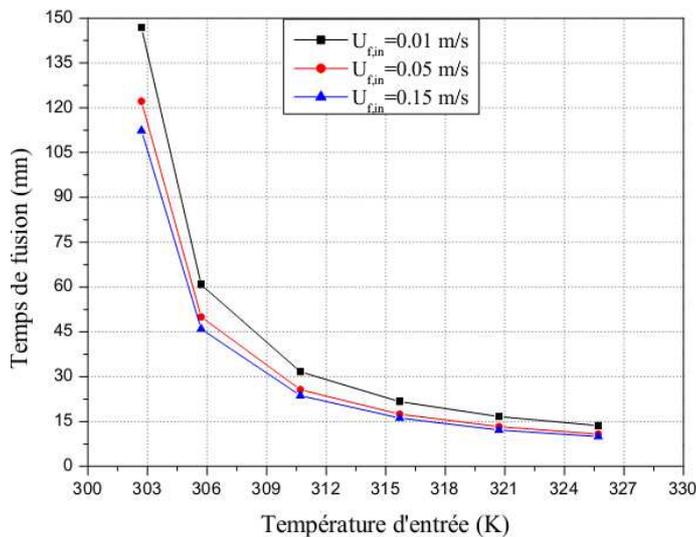


Figure II.20a. Effet de la température d'entrée du fluide HTF sur la variation du temps de fusion.

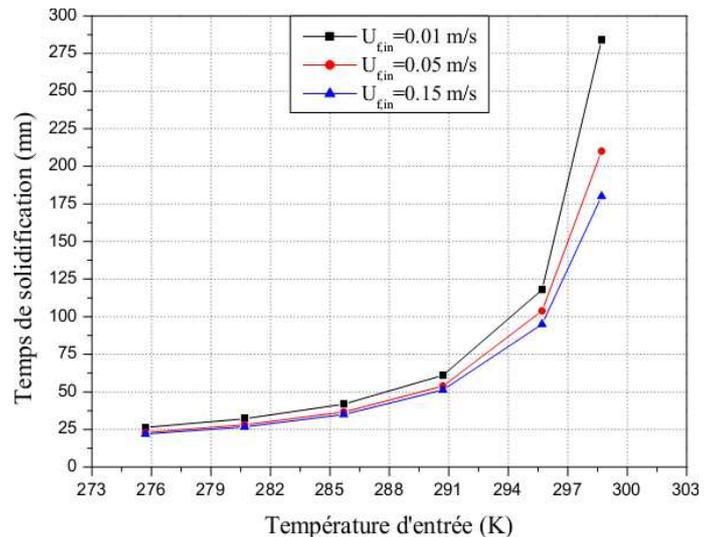


Figure II.20b. Effet de la température d'entrée du fluide HTF sur la variation du temps de solidification.

II.5.3.4. Variation de l'énergie totale stockée

La **figure II.21** présente la variation de l'énergie totale stockée dans le matériau considéré pour différents températures d'entrées du fluide caloporteur. Quand la température d'entrée augmente de 305.7 K jusqu'à 320.7 K, l'énergie thermique transportée par le fluide caloporteur augmente, alors la chaleur transmise au PCM devient importante et le processus de charge est rapidement atteint. Les résultats montrent que l'énergie totale stockée augmente rapidement durant la charge à partir d'une valeur minimale qui définit le début de la première période de stockage. Ensuite, l'énergie stockée atteint une valeur maximale à la fin du processus et égal à 260000 J/kg, 271000 J/kg et 293000 J/kg pour des températures d'entrées du fluide HTF 305.7 K, 310.7 K et 320.7 K, respectivement. Le temps nécessaire pour terminer le processus de charge, lorsque l'énergie totale stockée devient constante est de 3400 s, 1800 s et 1200 s pour des températures d'entrées 305,7 K, 310,7 K et 320,7 K, respectivement.

Comme conclusion de cette interprétation, l'effet de la température d'entrée du fluide caloporteur sur l'énergie totale stockée montre que la capacité de stockage thermique est

importante quand la différence de la température entre le HTF est PCM est grande. Cependant, le processus de charge devient relativement rapide.

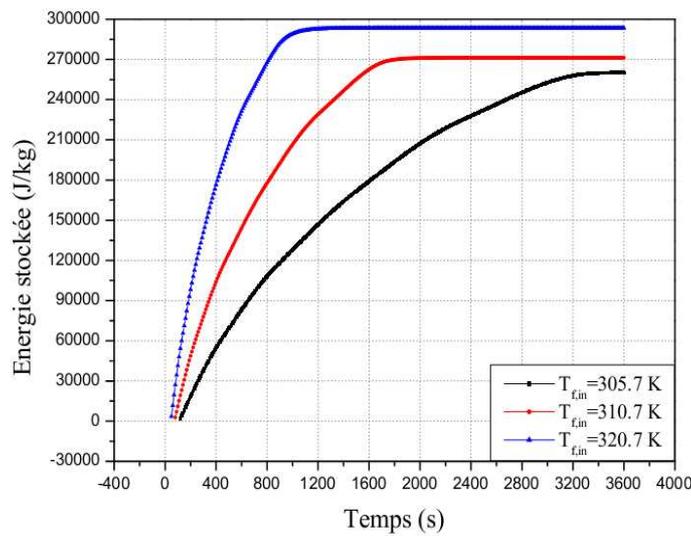


Figure II.21. Energie stockée pour différentes températures d'entrées du fluide HTF.

II.5.4. Effet de la vitesse d'entrée du fluide caloporteur HTF

La variation de la température et la fraction liquide de PCM, pour des vitesses d'entrées du fluide caloporteur différentes et une température d'entrée constante ($T_{f,in} = 305.7$ K, durant la fusion et $T_{f,in} = 295.7$ K, durant la solidification) sont calculées à l'intérieur de PCM aux points: A ($x=0.51$, $r=0.009$) m et B ($x=0.95$, $r=0.0089$) m.

II.5.4.1. Variation de la température de PCM

En observant les **figures II.22 (a-b)** et **figures II.23 (a-b)**, montrent l'effet de la vitesse d'entrée du fluide caloporteur sur la variation de la température de PCM durant la charge et la décharge, respectivement. Les différentes simulations numériques faites pour les tests de vitesse sont fixées une heure de temps de calcul afin de compléter les deux processus.

Pendant le processus de charge, **figures II.22 (a-b)**: avec l'augmentation de la vitesse d'entrée du fluide caloporteur, de 0.01 m/s à 0.15 m/s, le coefficient de transfert thermique par convection augmente, qui mène une augmentation du taux de transfert thermique entre le HTF et le PCM. Donc la température de PCM évolue rapidement jusqu'à la fin du processus. Il faut cependant noter que, la variation de la température de PCM pendant la 1^{ère} période de stockage sensible est remarquée par une légère augmentation sous l'effet de la vitesse d'entrée du fluide HTF.

Pendant le processus de décharge, **figures II.23 (a-b)**: le même comportement thermique que la charge est observé. Le temps nécessaire pour compléter ce processus est relativement long par

rapport au premier. Une faible valeur de conductivité thermique de PCM durant la solidification mène le processus de décharge très long.

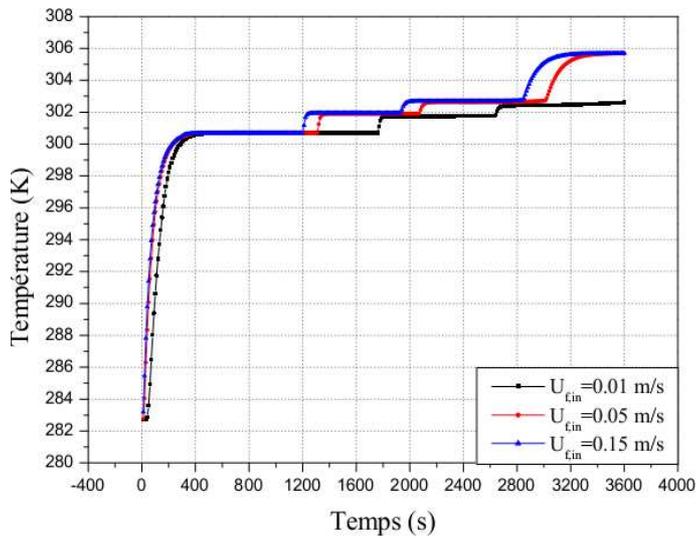


Figure II.22a. Effet de la vitesse d'entrée du fluide HTF sur la variation de la température durant la fusion, $A(x=0.51, r=0.0099)$ m.

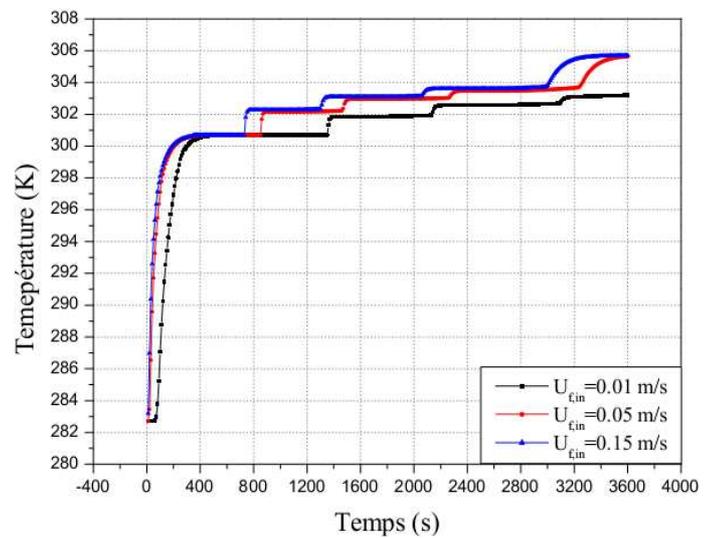


Figure II.22b. Effet de la vitesse d'entrée du fluide HTF sur la variation de la température durant la fusion, $B(x=0.95, r=0.0089)$ m.

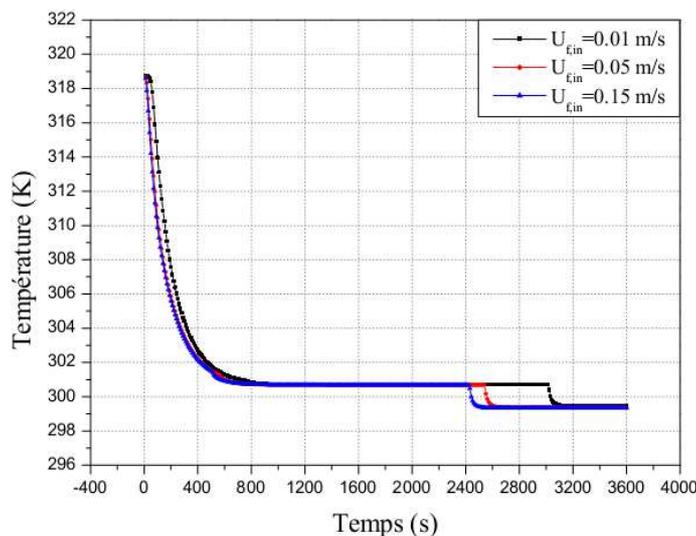


Figure II.23a. Effet de la vitesse d'entrée du fluide HTF sur la variation de la température durant la solidification, $A(x=0.51, r=0.0099)$ m.

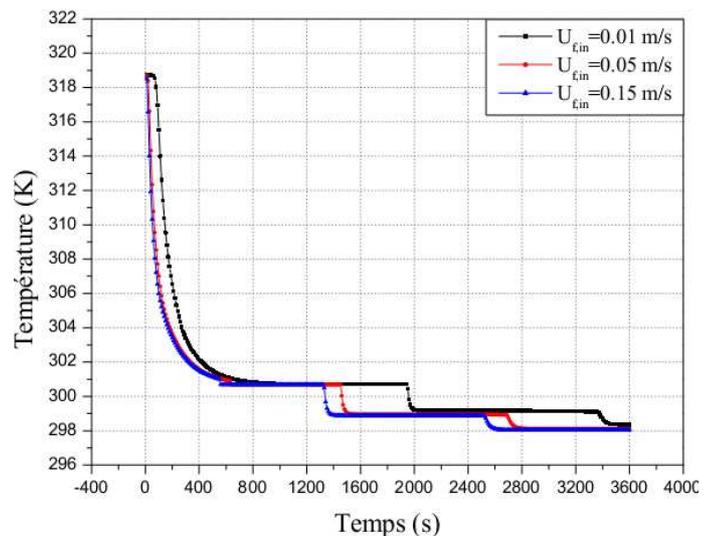


Figure II.23b. Effet de la vitesse d'entrée du fluide HTF sur la variation de la température durant la solidification, $B(x=0.95, r=0.0089)$ m.

II.5.4.2. Variation de la fraction liquide

La **figure II.24 (a-b)**, représente la variation de la fraction liquide pour différents vitesses d'entrées du fluide caloporteur. Le taux de fusion ou de solidification de PCM devient relativement important pour une grande vitesse imposée ($U_{f,in} = 0.15$ m/s). Pour cela, il y'aura une variation rapide de la fraction liquide de PCM jusqu'à la fin du processus.

Durant la fusion, **figure II.24a**, la 2^{ème} étape de stockage latent se termine après 1770 s, 1320 s et 1170 s, pour une vitesse imposée 0.01 m/s, 0.05 m/s et 0.15 m/s, respectivement. Remarquant aussi que, le palier correspondant à la phase solide de PCM diminue avec l'augmentation de la vitesse. Durant la solidification, **figure II.24b**, la 2^{ème} étape de déstockage latent se termine après 3020 s, 2550 s et 2390 s, pour une vitesse imposée 0.01 m/s, 0.05 m/s et 0.15 m/s, respectivement. L'augmentation de vitesse provoque la diminution du palier correspondant à la phase liquide de PCM.

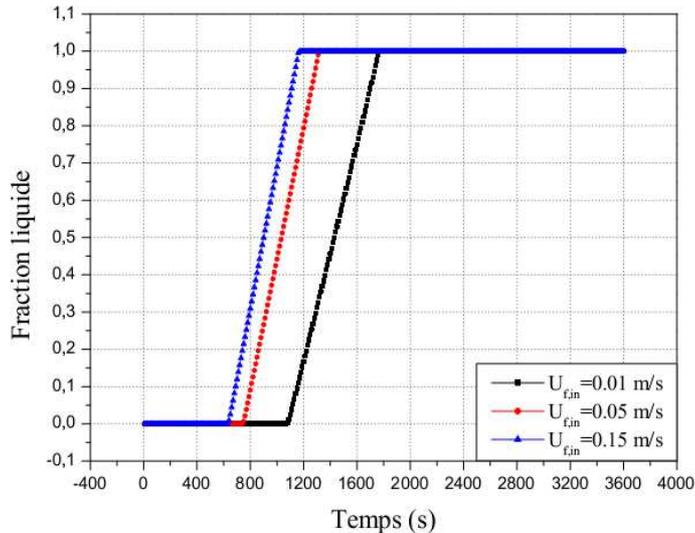


Figure II.24a. Effet de la vitesse d'entrée du fluide HTF sur la variation de la fraction liquide, Fusion, $A(x=0.51, r=0.0099)$ m.

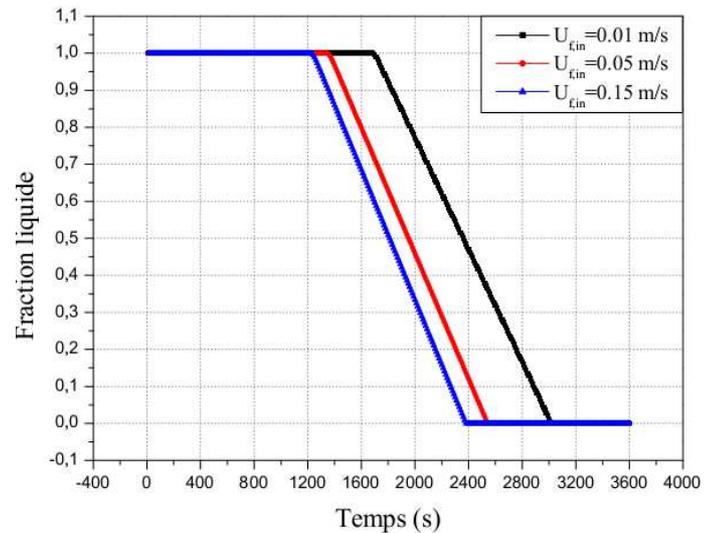


Figure II.24b. Effet de la vitesse d'entrée du fluide HTF sur la variation de la fraction liquide, Solidification, $A(x=0.51, r=0.0099)$ m.

II.5.4.3. Variation du temps de fusion et de solidification

L'effet de la vitesse d'entrée du fluide caloporteur sur le temps de fusion et de solidification de PCM est présenté sur la **figure II.25 (a-b)**. Pour une température imposée, l'augmentation de la vitesse d'entrée du fluide HTF provoque un taux de fusion et de solidification important. Pour cela, l'énergie thermique transportée par le fluide à l'entrée de la conduite de stockage augmente. D'où, la chaleur transmise au PCM devient importante; par conséquent le temps de fusion et de solidification diminue.

Durant la charge, **figure II.25a**, quand la vitesse d'entrée augmente de 0.01 m/s jusqu'à 0.15 m/s, le temps de fusion diminue de 62.83 min à 46 min, ce qui réduit le temps de fusion à 26.78 %, pour une température imposé 305.7 K. Pour une température imposé 310.7 K, le temps de fusion diminue de 32.66 min à 23.66 min, ce qui réduit le temps de fusion à 27.55 %. Pour une température 320.7 K, le temps de fusion diminue de 17.33 min à 12.16 min, ce qui réduit le temps de fusion à 29.83 %.

Durant la décharge, **figure II.25b**, quand la vitesse d'entrée augmente de 0.01 m/s jusqu'à 0.15 m/s, le temps de solidification diminue de 117.83 min à 99.66 min, ce qui réduit le temps de solidification à 15.42 %, pour une température imposé 295.7 K. Pour une température 290.7 K, le temps de solidification diminue de 61 min à 51.33 min, ce qui réduit le temps de solidification à 15.85 %. Pour une température 280.7 K, le temps de solidification diminue de 32.16 min à 26.83 min, ce qui réduit le temps de solidification à 16.57 %.

D'après les pourcentages calculés, il faut noter que, l'effet de la température d'entrée du fluide caloporteur a beaucoup d'influence que l'effet de la vitesse, en termes de temps de fusion et de solidification.

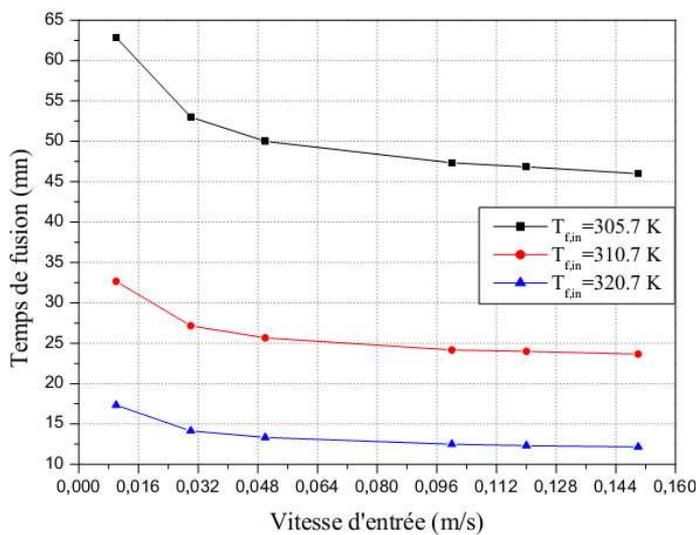


Figure II.25a. Effet de la vitesse d'entrée du fluide HTF sur la variation du temps de fusion.

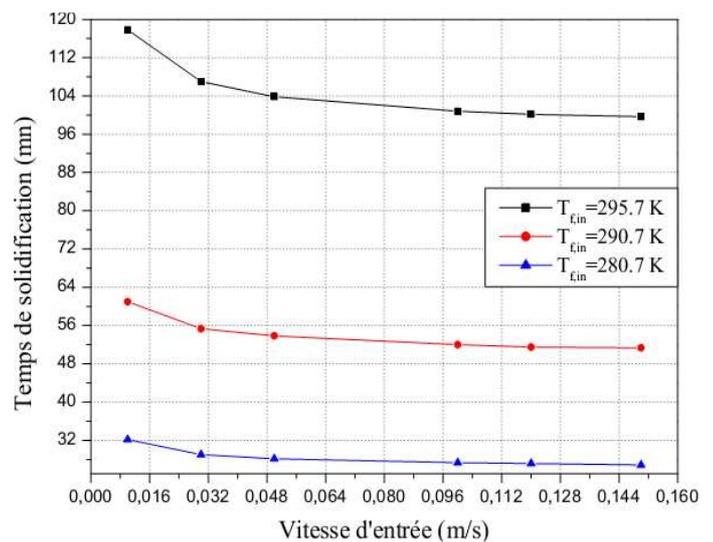


Figure II.25b. Effet de la vitesse d'entrée du fluide HTF sur la variation du temps de solidification.

II.5.4.4. Variation de l'énergie totale stockée

Avec une température imposée constante ($T_{f,in}=310.7$ K), la variation de l'énergie totale stockée dans le matériau pour différents vitesses d'entrées du fluide caloporteur est présenté sur la **figure II.26**. L'augmentation de la vitesse d'entrée du fluide caloporteur n'influe pas la capacité de stockage thermique ou la quantité d'énergie stockée dans le matériau considéré. Sauf sur le temps nécessaire pour compléter le processus de charge. Pour cela, l'énergie totale stockée augmente durant la charge à partir d'une valeur minimale qui définit le début de la première période de stockage. Ensuite, l'énergie stockée atteint une valeur maximale à la fin du processus et égal à 271000 J/kg pour les trois vitesses imposées. Le temps nécessaire pour terminer le processus de charge, lorsque l'énergie totale stockée devient constante est de 2400 s, 1800 s et 1700 s, pour des vitesses imposées 0.01 m/s, 0.05 m/s et 0.15 m/s.

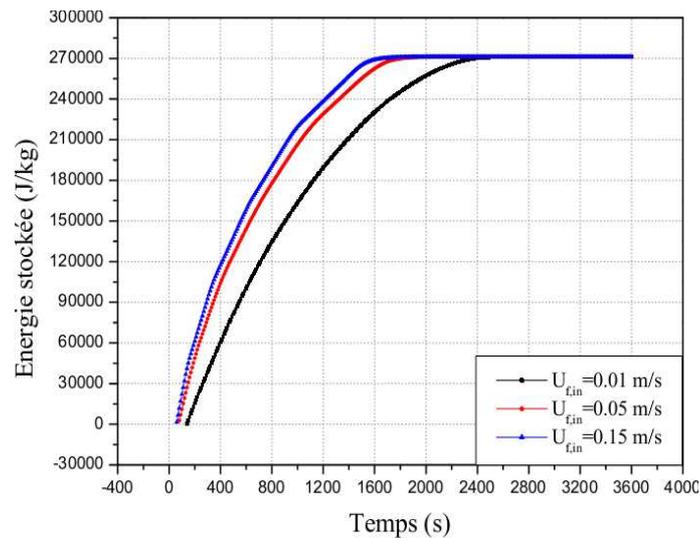


Figure II.26. Energie stockée pour différentes vitesses d'entrées du fluide HTF.

II.5.5. Effet du rayon interne de tube

Les résultats présentés dans cette partie sont relatifs aux conditions de calculs suivants: même débit massique imposé, $Q_m=0.0315$ Kg/s. La différence de température entre le fluide caloporteur et le matériau pendant la charge et la décharge est +5 K et -5 K, respectivement. Par contre, pour la variation de l'énergie totale stockée, nous avons imposé une différence de température de +10 K.

II.5.5.1. Variation de la fraction liquide

En observant la **figure II.27 (a-b)**, montre la variation de la fraction liquide pour différents rayon interne du tube. Les résultats montrent que le taux de transfert thermique entre le fluide caloporteur et le matériau est affaibli lorsque le rayon interne augmente de 0.6 cm à 4 cm. L'augmentation du rayon interne de tube provoque une diminution de la vitesse interne du fluide caloporteur. Pour cela, il y'aura une variation très long de la fraction liquide de PCM jusqu'à la fin du processus.

Durant la fusion, **figure II.27a**, la 2^{ème} étape de stockage latent se termine après 1130 s, 1650 s et 2450 s, pour un rayon interne de 0.6 cm, 2 cm et 4 cm, respectivement. Remarquant aussi que, le palier correspondant à la phase solide de PCM augmente avec l'augmentation du rayon interne. Durant la solidification, **figure II.27b**, la 2^{ème} étape de stockage latent se termine après 2280 s, 2880 s et 3690 s, pour un rayon interne de 0.6 cm, 2 cm et 4 cm, respectivement. Remarquant aussi que, le palier correspondant à la phase liquide de PCM augmente avec l'augmentation du rayon interne.

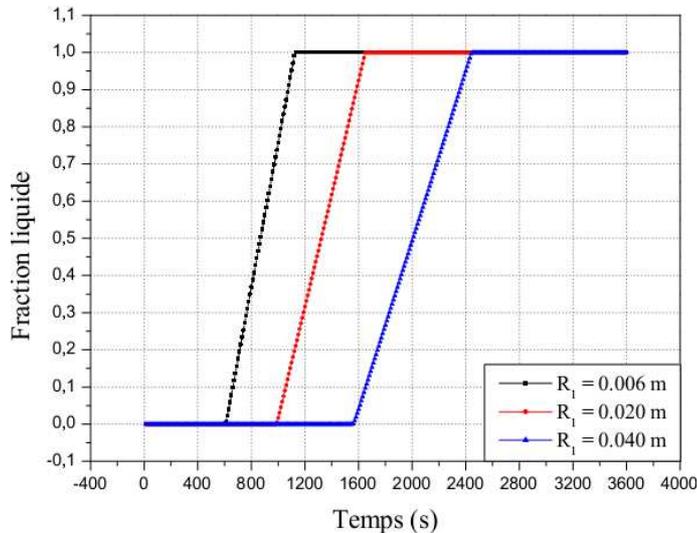


Figure II.27a. Effet du rayon interne de tube sur la variation de la fraction liquide, Fusion, $A(x=0.51, r=0.0099)$ m.

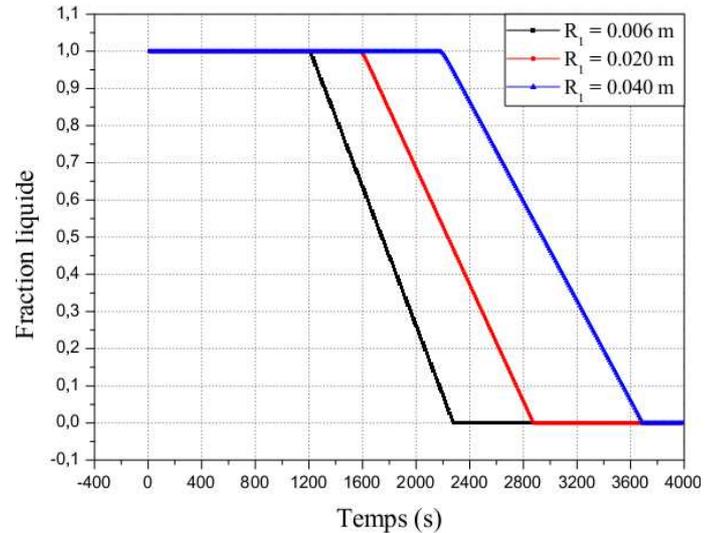


Figure II.27b. Effet du rayon interne de tube sur la variation de la fraction liquide, Solidification, $A(x=0.51, r=0.0099)$ m.

II.5.5.2. Variation du temps de fusion et de solidification

Pour un débit massique et une température imposée, l'effet de l'augmentation du rayon interne de tube sur la variation du temps de fusion et de solidification de PCM est présenté sur la **figure II.28 (a-b)**. L'augmentation du rayon interne de tube provoque une diminution de la vitesse à l'entrée de la conduite, et par conséquent, l'énergie thermique transportée par le fluide caloporteur diminue. Pour cela, le taux de fusion et de solidification devient très faible. Donc, le temps de fusion et de solidification augmente.

Durant la charge, **figure II.28a**, quand le rayon interne augmente de 0.00635 m (la vitesse correspondante est 0.2514 m/s) à 0.05 m (la vitesse correspondante est 0.004 m/s), le temps de fusion augmente de 45.33 min à 89.16 min, ce qui augmente le temps de fusion à 49.15 %, pour une température d'entrée 305.7 K. Pour une température de 310.7 K, le temps de fusion augmente de 23 min à 46.83 min, ce qui augmente le temps de fusion à 50.88 %. Pour une température de 320.7 K, le temps de fusion augmente de 12 min à 25.16 min, ce qui augmente le temps de fusion à 52.30 %.

Durant la décharge, **figure II.28b**, quand le rayon interne augmente de 0.00635 m à 0.05 m, le temps de solidification augmente de 95.66 min à 139.5 min, ce qui augmente le temps de solidification à 31.42 %, pour une température d'entrée 295.7 K. Pour une température de 290.7 K, le temps de solidification augmente de 50.66 min à 74.83 min, ce qui augmente le temps de solidification à 32.30 %. Pour une température de 280.7 K, le temps de solidification augmente de 26.5 min à 40.33 min, ce qui augmente le temps de solidification à 34.30 %.

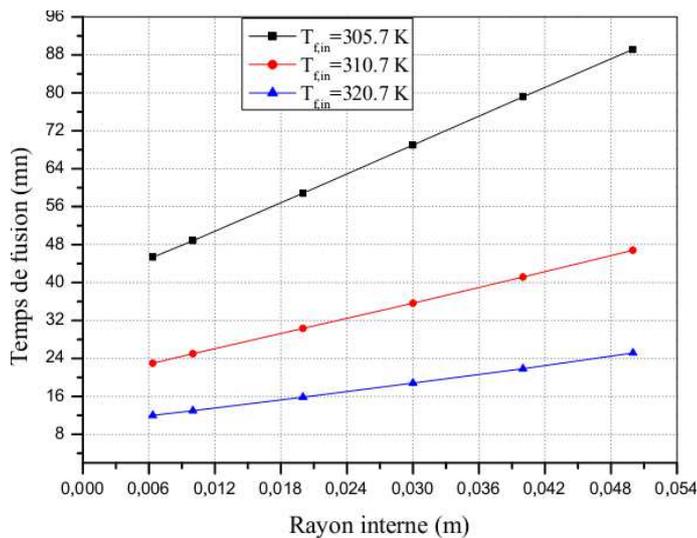


Figure II.28a. Effet du rayon interne de tube sur la variation du temps de fusion.

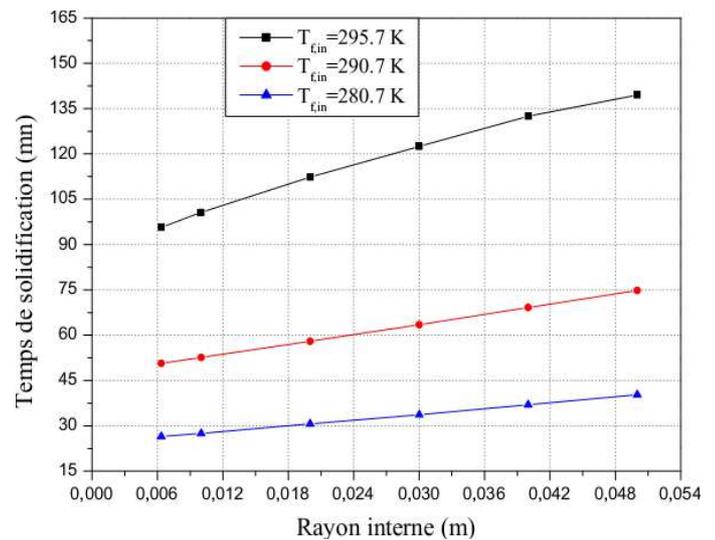


Figure II.28b. Effet du rayon interne de tube sur la variation du temps de solidification.

II.5.5.3. Variation de l'énergie totale stockée

Avec un débit massique et une température imposée constante, la variation de l'énergie totale stockée dans le matériau pour différents rayon interne est présentée sur la **figure II.29**. L'augmentation du rayon interne de tube n'influe pas la capacité de stockage thermique ou la quantité d'énergie stockée dans le matériau. Sauf sur le temps nécessaire pour compléter le processus de charge. Pour cela, l'énergie stockée atteint une valeur maximale à la fin du processus et égal à 271000 J/kg pour tous les rayons testés. Le temps nécessaire pour terminer le processus de charge est de 1700 s, 2100 s et 2900 s, pour un rayon interne de 0.6 cm, 2 cm et 4 cm, respectivement.

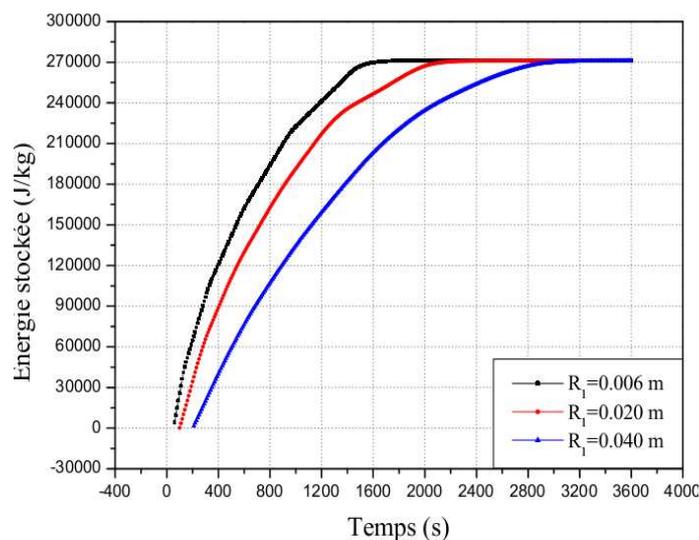


Figure II.29. Energie stockée pour différentes rayons internes du tube.

II.6. Synthèse du chapitre II

Dans l'étude qui a été faite au deuxième chapitre, nous avons pu constater qu'il est nécessaire de fournir des informations complémentaires pour développer la technologie de stockage latent. Pour cela, une unité de stockage constitué de deux tubes concentriques est étudiée. Le modèle mathématique et la procédure de simulation concorde aux résultats expérimentaux, et offrent une bonne estimation sur le comportement thermique de l'unité. L'effet de la température et la vitesse d'entrée du fluide HTF ainsi que le rayon du tube sur la variation de la température de PCM, sa fraction liquide, le temps de fusion/ solidification, le temps de charge et de décharge et l'énergie totale stockée sont étudiés et présentés graphiquement. Les conclusions tirées à partir des résultats présentés dans ce chapitre peuvent être regroupées dans les points suivants:

- a) Le processus de stockage peut être divisé en trois étapes selon la variation de la température et la fraction liquide: (1) l'étape de stockage par chaleur sensible, où la température de PCM est inférieure à la température de fusion et la fraction liquide est zéro; (2) l'étape de stockage par chaleur latente, où la température de PCM atteint la température de fusion, et la fraction liquide augmente de zéro à un; (3) l'étape de stockage par chaleur sensible, où le PCM est complètement fusionné, et la température est plus grande que la température de fusion, et la fraction liquide est un;
- b) Le taux de fusion et de solidification de PCM devient relativement important pour une grande différence de température imposée entre le fluide caloporteur et le PCM. D'autre part, le temps de fusion et de solidification diminue pour un fort gradient de température au niveau de l'interface HTF/PCM;
- c) L'effet de la température d'entrée du fluide HTF sur l'énergie totale stockée montre que la capacité de stockage thermique est importante quand la différence de la température entre le HTF et PCM est grande. Cependant, le processus de charge devient relativement rapide;
- d) Avec l'augmentation de la vitesse d'entrée du fluide HTF, le coefficient de transfert thermique par convection augmente, qui mène une augmentation du taux de transfert thermique entre le HTF et le PCM;
- e) L'augmentation de la vitesse d'entrée du fluide caloporteur et le rayon du tube n'influent pas la capacité de stockage thermique ou la quantité d'énergie stockée dans le matériau considéré. Sauf sur le temps nécessaire pour compléter le processus de charge;
- f) L'effet de la température d'entrée du fluide caloporteur a beaucoup d'influence que l'effet de la vitesse, en termes de temps de fusion et de solidification ainsi que en termes de délais de stockage.

Bibliographie du chapitre II

- [1] Y.B. Tao, M.J. Li, Y.L. He and W.Q. Tao, Effects of parameters on performance of high temperature molten salt latent heat storage unit. *Applied Thermal Engineering* 72 (2014) 48-55.
- [2] M. Lacroix, Numerical simulation of a shell-and-tube latent heat thermal energy storage unit. *Solar Energy* 50 (1993) 357-367.
- [3] M.A. Kibria, M.R. Anisur, M.H. Mahfuz, R. Saidur and I.H.S.C. Metselaar, Numerical and experimental investigation of heat transfer in a shell and tube thermal energy storage system. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 53 (2014) 71-78.
- [4] W.W. Wang, K. Zhang, L.B. Wang and Y.L. He, Numerical study of the heat charging and discharging characteristics of a shell-and-tube phase change heat storage unit. *Applied Thermal Engineering* 58 (2013) 542-553.
- [5] A. Trp, K. Lenic and B. Frankovic, Analysis of the influence of operating conditions and geometric parameters on heat transfer in water-paraffin shell-and-tube latent thermal energy storage unit. *Applied Thermal Engineering* 26 (2006) 1830-1839.
- [6] M. Bechiri and K. Mansouri, Analytical solution of heat transfer in a shell-and-tube latent thermal energy storage system. *Renewable Energy* 74 (2015) 825-838.
- [7] Z. Liu, Y. Yao and H. Wu, Numerical modeling for solid-liquid phase change phenomena in porous media: Shell-and-tube type latent heat thermal energy storage. *Applied Energy* 112 (2013) 1222-1232.
- [8] L. Jian-you, Numerical and experimental investigation for heat transfer in triplex concentric tube with phase change material for thermal energy storage. *Solar Energy* 82 (2008) 977-985.
- [9] K.A.R. Ismail and M.M. Abugderah, Performance of a thermal storage system of the vertical tube type. *Energy Conversion and Management* 41 (2000) 1165-1190.
- [10] A. Trp, An experimental and numerical investigation of heat transfer during technical grade paraffin melting and solidification in a shell-and-tube latent thermal energy storage unit. *Solar Energy* 79 (2005) 648-660.
- [11] Z.X. Gong and A.S. Mujumdar, Thermodynamic optimization of the thermal process in energy storage using multiple phase change materials. *Applied Thermal Engineering* 17 (1997) 1067-1083.
- [12] H. El-Dessouky and F. Al-Juwayhel, Effectiveness of a thermal energy storage system using phase-change materials. *Energy Conversion and Management* 38 (1997) 601-617.
- [13] M. Bechiri, Optimisation du stockage par chaleur sensible et latente dans un module plan et cylindrique en régime instationnaire. Thèse de Doctorat (2015), *Faculté des sciences de l'ingénieur. Université M'hamed Bougara – Boumerdes*.
- [14] Y.B. Tao and Y.L. He, Numerical study on thermal energy storage performance of phase change material under non-steady-state inlet boundary. *Applied Energy* 88 (2011) 4172-4179.
- [15] S. Jegadheeswaran and S.D. Pohekar, Exergy analysis of particle dispersed latent heat thermal storage system for solar water heaters. *Journal of Renewable and Sustainable*

- Energy* 2 (2010)
- [16] S. Jegadheeswaran and S.D. Pohekar, Energy and exergy analysis of particle dispersed latent heat storage system. *International Journal of Energy and Environment* 1 (2010) 445-458.
- [17] M. Akgun, O. Aydin and K. Kaygusuz, Experimental study on melting/solidification characteristics of paraffin as PCM. *Energy Conversion and Management* 48 (2007) 669-678.
- [18] N.H.S. Tay, F. Bruno and M. Belusko, Experimental validation of a CFD model for tubes in a phase change thermal energy storage system. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 55 (2012) 574-585.
- [19] N.H.S. Tay, F. Bruno and M. Belusko, Experimental investigation of dynamic melting in a tube-in-tank PCM system. *Applied Energy* 104 (2013) 137-148.
- [20] A. Erek and I. Dincer, An approach to entropy analysis of a latent heat storage module. *International Journal of Thermal Sciences* 47 (2008) 1077-1085.
- [21] F.P. Incropera, D.P. Dewitt, T.L. Bergman and A.S. Lavine, Fundamentals of heat and mass transfer, Sixth edition, Wiley, New York 1996.
- [22] S.M. Yang and W.Q. Tao, Heat Transfer, fourth ed., Higher Education Press, Beijing, 2006 (in Chinese)
- [23] Y.B. Tao, Y.L. He and Z.G. Qu, Numerical study on performance of molten salt phase change thermal energy storage system with enhanced tubes. *Solar Energy* 86 (2012) 1155-1163.
- [24] F. Colella, A. Sciacovelli and V. Verda, Numerical analysis of a medium scale latent energy storage unit for district heating systems. *Energy* 45 (2012) 397-406.
- [25] E. Guelpa, A. Sciacovelli and V. Verda, Entropy generation analysis for the design improvement of a latent heat storage system. *Energy* 53 (2013) 128-138.
- [26] W.W. Wang, L.B. Wang and Y.L. He, The energy efficiency ratio of heat storage in one shell-and-one tube phase change thermal energy storage unit. *Applied Energy* 138 (2015) 169-182.
- [27] S.R. Idelsohn, M.A. Storti, et L.A. Crivelli, Numerical methods in phase-change problems. *Computational Methods in Engineering* 1 (1994) 49-74.
- [28] A. Soupart-Caron, Stockage de chaleur dans les matériaux à changement de phase. Thèse de Doctorat (2015), CEA-LITEN, École doctorale I-MEP2, Grenoble.
- [29] V.R. Voller, Fast implicit finite-difference method for the analysis of phase change problems. *Numerical Heat Transfer* 17 (1990) 155-169.
- [30] S. Guichard, Contribution à l'étude des parois complexes intégrant des matériaux à changement de phase: modélisation, expérimentation et évaluation de la performance énergétique globale. Thèse de Doctorat (2013), École doctorale Sciences, Technologies et Santé, Université de La Réunion.
- [31] V.R. Voller and C.R. Swaminathan, General source-based method for solidification phase change. *Numerical Heat Transfer, Part B* 19 (1991) 175-189.
- [32] V.R. Voller and C. Prakash, A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 30 (1987) 1709-1719.

- [33] H. Liu, S. Li, Y. Chen and Z. Sun, The melting of phase change material in a cylinder shell with hierarchical heat sink array. *Applied Thermal Engineering* 73 (2014) 973-981.
- [34] A. Al-Abidi, S. Mat, K. Sopian, M.Y. Sulaiman and A. Mohammad, Internal and external fin heat transfer enhancement technique for latent heat thermal energy storage in triplex tube heat exchangers. *Applied Thermal Engineering* 53 (2013) 147-156.
- [35] S. Mat, A. Al-Abidi, K. Sopian, M.Y. Sulaiman and A. Mohammad, Enhance heat transfer for PCM melting in triplex tube with internal-external fins. *Energy Conversion and Management* 74 (2013) 223-236.
- [36] J. C. Kurnia, A.P. Sasmito, S.V. Jangam and A.S. Mujumdar, Improved design for heat transfer performance of a novel phase change material (PCM) thermal energy storage (TES). *Applied Thermal Engineering* 50 (2013) 896-907.
- [37] A. Al-abidi, S.B. Mat, K. Sopian, M.Y. Sulaiman and A. Mohammed, CFD applications for latent heat thermal energy storage: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20 (2013) 353-363.

Chapitre III

Stockage thermique par chaleur latente: Système shell-and-tube avec multiple PCMs

Introduction.....	65
III.1. Techniques d'amélioration du transfert thermique.....	66
III.1.1. Techniques d'amélioration agissant sur le PCM.....	66
III.1.2. Augmentation de la surface d'échange.....	67
III.2. Etat de l'art sur les unités shell-and-tube avec multiple PCMs.....	69
III.2.1. Analyse comparative et conclusion.....	72
III.3. Modèle physique et équations gouvernantes.....	72
III.3.1. Modèle physique pour l'unité de stockage.....	72
III.3.2. Propriétés thermo-physiques du HTF et de PCMs.....	73
III.3.3. Formulation mathématique.....	74
III.3.3.1. Formulation mathématique pour HTF et PCMs.....	74
III.3.3.2. Conditions initiales et aux limites pour HTF.....	75
III.3.3.3. Conditions initiales et aux limites pour PCMs.....	75
III.4. Résultats et discussion.....	76
III.4.1. Cas test avec vitesse d'entrée du fluide caloporteur 0.004 m/s.....	76
III.4.1.1. Comportement thermique de l'unité de stockage.....	76
III.4.1.2. Température de sortie du fluide caloporteur.....	79
III.4.1.3. Evolution du taux de stockage.....	80
III.4.1.4. Evolution du temps de fusion et de solidification pour chaque PCM	81
III.4.1.5. Evolution de l'énergie totale stockée dans chaque PCM.....	82
III.4.2. Cas test avec vitesse d'entrée du fluide caloporteur 0.03 m/s.....	83
III.4.2.1. Comportement thermique de l'unité de stockage.....	83
III.4.2.2. Evolution du temps de fusion pour chaque PCM.....	84
III.4.2.3. Evolution de l'énergie totale stockée dans chaque PCM.....	85
III.5. Synthèse du chapitre III.....	86
 Bibliographie du Chapitre III.....	 88

Chapitre III

Stockage thermique par chaleur latente: Système shell-and-tube avec multiple PCMs

Introduction

La faible conductivité thermique des PCMs, de l'ordre de 0.3 W/m.K, limite le taux de transfert thermique et implique des phases lentes de charge et de décharge, les résultats ont été remarqués en section II.5.3.1. Afin d'augmenter l'échange thermique et d'améliorer le transfert de chaleur entre le fluide caloporteur et le matériau à changement de phase, l'utilisation du multiple PCMs avec différentes températures de fusion, en instaurant un système de PCMs en cascade présente une technique très efficace afin d'augmenter le taux de charge et de décharge.

Au cours de ce chapitre, deux matériaux candidats sont mise en œuvre pour le stockage thermique par chaleur latente. Une unité remplie avec deux types de paraffine sera couplée avec un collecteur solaire. La température de fusion des deux PCMs doit être adéquate pour un usage particulier, si on considère que l'installation mise en œuvre est le chauffage solaire thermique (chauffage de l'eau domestique ou chauffage solaire urbain), **figure III.1**. Le circuit de charge et de décharge est celui présenté en chapitre II. La température d'entrée du fluide caloporteur doit être supérieure et inférieure à la température de fusion des deux PCMs pendant le processus de charge et de décharge, respectivement. Pour cela, une régulation thermique doit être mise en place en amont de cette installation thermique, afin de maintenir une température constante à l'entrée de l'unité de stockage.

En parallèle, ce chapitre s'attarde principalement sur la présentation et l'analyse des résultats obtenus par simulation numérique. L'étude met en lumière l'effet de la température et vitesse d'entrée du fluide caloporteur sur le comportement thermique de cette nouvelle configuration remplie avec deux types de paraffine, avec différentes températures de fusion ainsi que l'évolution des paramètres thermique le long du processus de charge et de décharge.

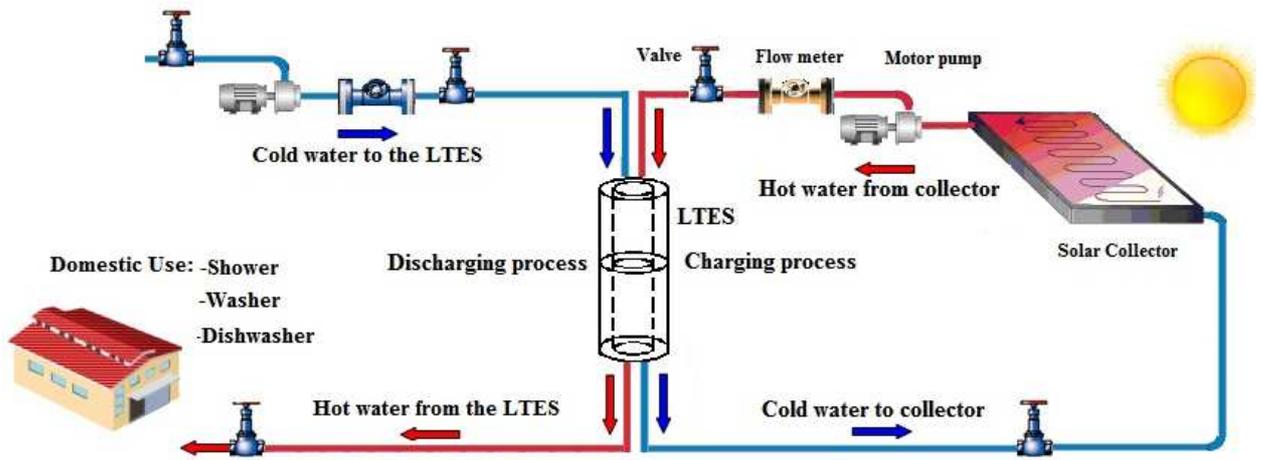


Figure III.1. Unité de stockage couplée avec un collecteur solaire pour le chauffage de l'eau domestique.

III.1. Techniques d'amélioration du transfert thermique

Dans la littérature, de nombreuses solutions notamment dans le domaine de la science des matériaux sont proposées, afin d'améliorer le transfert thermique entre le fluide caloporteur et le matériau qui sert à stocker l'énergie thermique. Deux grandes classes de méthode sont recensées. La première correspond en particulier aux actions sur le matériau à changement de phase; la deuxième, sert à augmenter la surface d'échange, [Soupart-Caron \[1\]](#).

III.1.1. Techniques d'amélioration agissant sur le PCM

Il existe deux possibilités d'agir directement sur le matériau à changement de phase afin d'augmenter le flux global transféré:

- i. Améliorer la conductivité thermique globale du PCM on intégrant des supports métalliques conducteurs comme des additifs en aluminium, en carbone et en cuivre, ou des mousses métalliques, [Hasnain \[2\]](#), [Himran et al \[3\]](#), [Hamada et al. \[4\]](#), [Xia et al. \[5\]](#), afin d'obtenir une conductivité thermique plus élevée. Ainsi, il est possible de l'intégrer dans une matrice métallique ayant une meilleure propriété thermo-physique. L'amélioration de la conductivité thermique est en fonction de la quantité de matériau conducteur inséré dans le PCM. Cependant, une étude expérimentale réalisée par [Li \[6\]](#), a montré que l'association de PCM avec un matériau conducteur peut entraîner une diminution de la chaleur latente comme le montre la **figure III.2**, où la chaleur latente est mesurée en fonction de la quantité de graphite introduite. Une augmentation importante de 900 % de la conductivité thermique est observée résulte en une diminution de 14 % de la chaleur latente.
- ii. Augmenter le flux transféré par utilisation de multiple PCMs. Une autre technique pour améliorer les performances thermique consiste à associer plusieurs PCMs en cascade. Le

taux de chaleur transférée dans l'unité dépend de la différence de température entre le fluide caloporteur et le point de fusion des PCMs. Dans les unités remplis avec un type de PCM, cette différence diminue dans le sens de l'écoulement du fluide HTF, car le fluide refroidit à mesure que la chaleur est transférée au PCM lors d'une charge, ce qui provoque la diminution du flux échangé. Au contraire, si plusieurs PCMs sont placés dans l'unité, alors la différence de température sera quasi-constante au cours d'une charge, même si le fluide caloporteur refroidit. Par conséquent, les performances et le flux de chaleur échangé est presque constant. L'utilisation de multiples PCMs dans un échangeur tube-calandre est illustrée sur la **figure III.3**. Ainsi, plusieurs auteurs ont démontré que le taux de transfert thermique est amélioré dans les unités de stockage remplis avec multiple PCMs, [Ait Adine & El Qarnia \[11\]](#), [Farid & Kanzawa \[12\]](#), [Li et al. \[16\]](#), [Watanabe et al. \[18\]](#), [Gong & Mujumdar \[20\]](#).

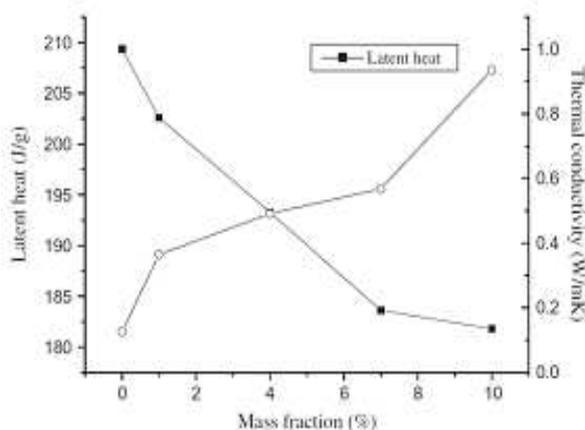


Figure III.2. Chaleur latente et conductivité thermique d'un matériau composite en fonction de la quantité de graphite, [Li \[6\]](#).

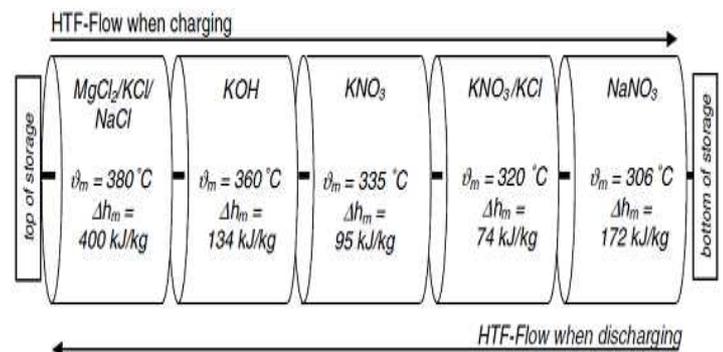


Figure III.3. Unité de stockage thermique rempli avec multiples PCMs, [Dinter et al. \[7\]](#).

III.1.2. Augmentation de la surface d'échange

Une deuxième méthode, consiste à intégrer le PCM dans un échangeur à surface augmentée afin de maximiser le flux total transféré. Deux possibilités sont actuellement envisagées:

- i. L'encapsulation de PCM. Cette technique consiste à piéger le PCM dans des capsules conductrices qui doivent être compatibles avec le PCM et le HTF. L'extension de la surface d'échange ainsi créée permet d'augmenter le flux de chaleur transféré au PCM. Cependant, l'expansion volumique de PCM lors du changement de phase présente un inconvénient majeur l'or de la mise en œuvre de cette méthode. De plus, l'étude de la stabilité thermique des capsules et la compatibilité chimique entre le PCM et sa capsule est nécessaire pour assurer la fonctionnalité du système à long terme. La **figure III.4** illustre un container à lit

fixe avec capsules de PCM. Dans la littérature, [Regin et al. \[8\]](#) a recensé l'ensemble des travaux expérimentaux réalisés sur les capsules en fonction de leur forme.

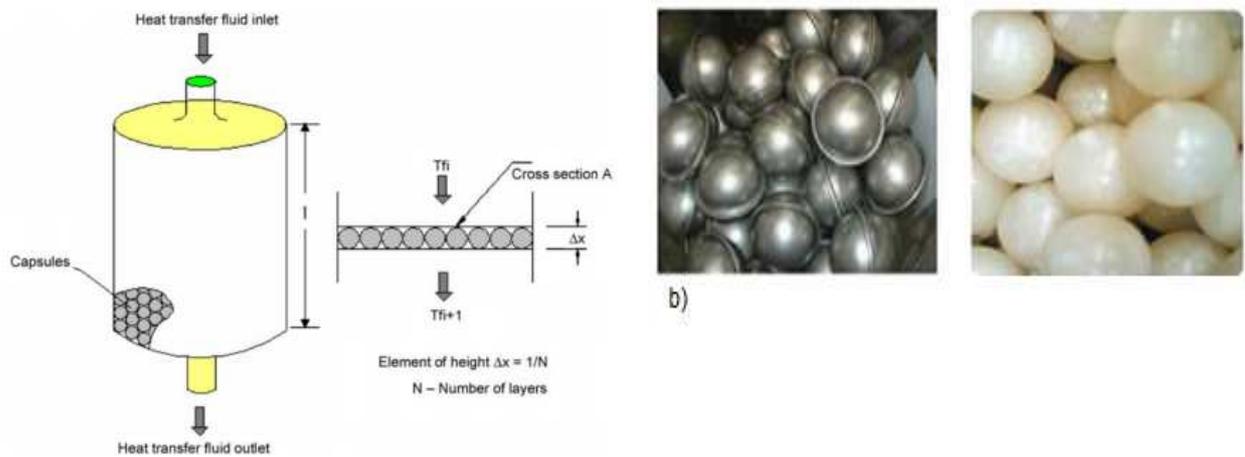


Figure III.4. Technique d'encapsulation des PCMs,
a) Container à lit fixe avec capsules, b) Géométries des macrocapsules.

- ii. L'utilisation d'ailettes qu'elles soient transversales ou longitudinales présente une des possibilités d'amélioration de transfert thermique. Afin d'augmenter la surface d'échange, des ailettes internes et/ou externes ont été ajoutées soit au contact du tube, soit au contact de la calandre, **figure III.5**. Des études expérimentales rapportées par [Al-Abidi at al. \[9-10\]](#), ont montré que cette technique accélère considérablement le processus de charge, elle améliore le transfert thermique et réduit le temps complet de fusion par rapport à un tube lisse. Cependant, la littérature n'a jamais complète, elle n'analyse pas en détail l'impact de la forme, le nombre d'ailettes et sa façon de répartition.

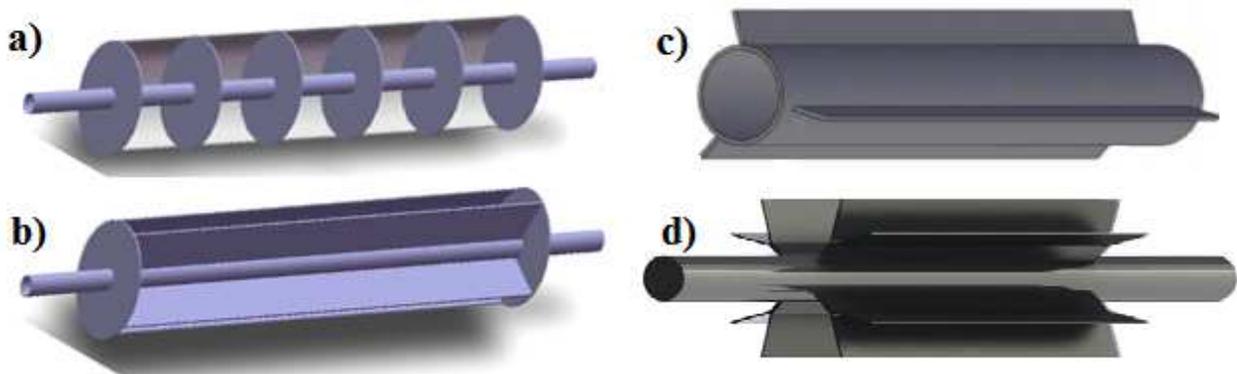


Figure III.5. Echangeurs ailetés,
a) Echangeur à ailettes transversales; b-c-d) Echangeur à ailettes longitudinales.

III.2. Etat de l'art sur les unités shell-and-tube avec multiple PCMs

Un état de l'art sur les unités de stockage thermique par chaleur latente avec multiple PCMs va être présenté dans le paragraphe suivant. Cet état regroupe des résultats d'expériences et des travaux de modélisation relative à la technique d'amélioration de transfert thermique basé sur l'augmentation du flux échangé entre le fluide caloporteur et le matériau à changement de phase. Ce contexte permettra donc de comparer les travaux réalisés dans cet axe de recherche, et d'introduire le lecteur aux notions qui sont à la base de ce chapitre ainsi que pour situer notre travail par rapport à ceux de la littérature. Nous présentons ici les travaux scientifiques traitant ce type de stockage.

[Ait Adine & El Qarnia \[11\]](#) ont présenté un modèle mathématique basé sur les équations de conservation d'énergie pour prévoir le comportement et les performances thermiques d'une unité de stockage remplie avec deux types de PCMs, P116 et n-octadecane, avec différentes basse températures de fusion 50°C et 27.7°C , respectivement. Pendant le processus de charge, l'eau chaude circule dans la direction où la température de fusion diminue. Afin de comparer les performances thermiques de cette unité avec une autre remplie avec un type de PCM, plusieurs investigations numériques ont été conduites dans le but d'examiner l'impact des paramètres physiques sur le comportement thermique de l'unité. Leurs résultats peuvent être utilisés comme des directives pour les performances thermiques, ainsi que pour l'optimisation thermiques de conception.

[Farid & Kanzawa \[12-13\]](#) ont étudié numériquement et expérimentalement une unité de stockage constitué de plusieurs capsules cylindriques fixées dans un tube cylindrique isolé. Les capsules sont disposées en trois groupes contenant trois différents PCMs avec différentes températures de fusion, **figure III.6**. Pendant la charge, de l'air chaud passe à travers les capsules de façon ce que les températures de fusion des trois PCMs décroissent. Cependant, pendant la décharge, la direction de l'écoulement d'air est inversée. Les auteurs rapportent d'après les mesures expérimentales que, le taux de transfert de chaleur est amélioré pendant la charge et la décharge lorsque le processus de stockage thermique inclue trois types de PCMs.

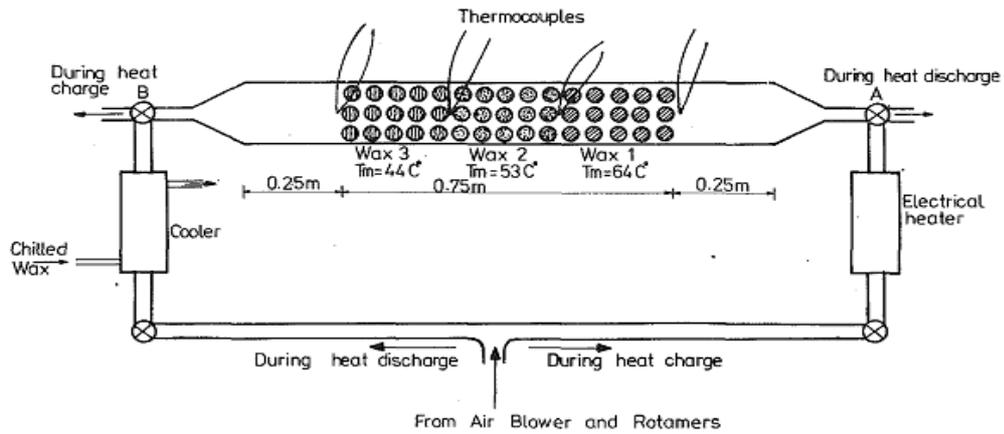


Figure III.6. Dispositif expérimental montre des capsules cylindriques remplis avec PCMs.

Dans leur article, [Fang & Chen \[14\]](#) ont présenté un modèle mathématique basé sur la méthode d'enthalpie afin d'évaluer les performances thermique d'une unité de stockage constitué de deux tubes concentriques. L'espace annulaire de l'unité est remplie avec trois types de PCMs, avec différentes températures de fusion. Des simulations numériques ont été effectuées pour étudier l'effet du multiple PCMs sur la fraction de fusion des PCMs, l'énergie thermique stockée et la température de sortie du fluide caloporteur. Leurs résultats indiquent que les températures de fusion jouent un rôle important dans l'évaluation des performances thermiques. Pour cela, le choix approprié du multiple PCMs est très significatif pour améliorer les performances de ce type d'unité de stockage.

Une étude expérimentale a été faite par [Akgun et al. \[15\]](#) dans le but d'étudier les caractéristiques de fusion/solidification de trois types de paraffine, dans une unité formée par deux tubes concentriques. L'eau est utilisée comme un fluide caloporteur. Les propriétés thermo-physiques de la paraffine utilisée dans ce processus sont déterminées à travers un scanner différentiel calorimétrique DSC (Differential Scanning Calorimeter). Une nouvelle géométrie de stockage d'énergie thermique est introduite dans ces travaux. L'effet du nombre de Reynolds et de Stefan sur les processus de fusion et de solidification a été examiné.

Par ailleurs, [Li et al. \[16\]](#) ont développé un modèle mathématique bidimensionnel pour décrire le phénomène de transfert thermique dans une unité de stockage, type shell-and-tube, remplis avec trois type de PCMs avec différentes haute températures de fusion 983 K, 823 K et 670 K, **figure III.7.** L'effet de la température d'entrée de l'air et la longueur de l'unité de stockage sur le temps de fusion des PCMs sont analysés numériquement. Les résultats prouvent que le taux de fusion de PCM3 est plus rapide que PCM1 sur les deux plans de calcul axial et radial. Les auteurs constatent également que le temps de fusion des PCMs diminue avec l'augmentation de la

température d'entrée de l'air. Vu l'application de cette unité dans une installation solaire thermique, les auteurs proposent des longueurs optimale qui sont $L_1=250$ mm, $L_2=400$ mm et $L_3=550$ mm, qui correspond aux mêmes temps de fusion de PCM1, PCM2 et PCM3 (3230 second) avec une température d'entrée de 1200 K.

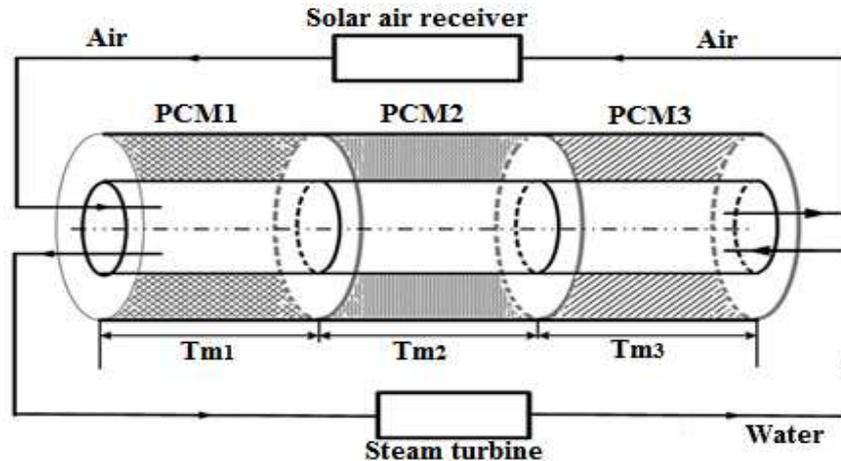


Figure III.7. Schéma de l'unité de stockage thermique remplie avec trois types de PCMs.

El Qarnia [17] a développé un modèle théorique basé sur les équations de conservation de l'énergie pour analyser les performances thermiques d'une unité de stockage latente couplé avec un collecteur solaire. Un programme basé sur la méthode des volumes finis a été également mis au point pour évaluer numériquement les performances thermiques de l'unité. Une série de simulations numériques ont été réalisées pour trois types de PCM afin de trouver la conception optimale pour des conditions climatiques estivales données de la ville de Marrakech, le rayonnement solaire et la température ambiante. L'optimisation de l'unité implique la détermination de la masse de chaque PCM, le nombre de tubes, et le débit de l'eau dans le collecteur solaire qui maximise l'efficacité de stockage thermique. Plusieurs simulations ont été également faites pour étudier l'effet du débit d'eau sur sa température de sortie, pendant le mode de décharge.

Des études expérimentales ont été réalisées par Watanabe et al. [18] afin d'améliorer le taux de charge et de décharge d'une unité de stockage thermique remplie avec trois types de PCMs, placés en cascade dans des capsules cylindriques. Les trois PCMs mis en œuvre ont une plage de fusion de 42-44°C, 50-52°C et 60-62°C. Une augmentation de 10 % du taux de chaleur échangée entre le fluide caloporteur et les PCMs a été observée. Dans le même axe de recherche, Michels & Pitz-Paal [19] ont montré expérimentalement les bénéfices d'utiliser plusieurs PCMs en cascade dans un échangeur tube-calandre. Trois types de matériaux sont placés dans la calandre

avec haut température de fusion. L'huile synthétique est utilisée en tant que fluide caloporteur. L'expérience a montré qu'une grande quantité de PCMs a subi le changement de phase lors d'une charge, et que la capacité de stockage d'une unité avec trois PCMs est plus importante qu'une unité de stockage simple.

Finalement, plus de détails sur des études numériques et expérimentales traitant les performances thermiques des unités de stockage en se basant sur la théorie de multiples PCMs peuvent être trouvés dans les références suivantes [Gong & Mujuldar \[20\]](#), [Yang et al. \[21\]](#), [Aceves et al. \[22\]](#), [Rady \[23\]](#), [Wang et al. \[24\]](#).

III.2.1. Analyse comparative et conclusion

L'ensemble de publications présentées dans ce chapitre montrent que la technique d'amélioration de transfert thermique, en instaurant un système de PCMs en cascade est une technique très efficace afin d'augmenter le taux de charge et de décharge. Cette nouvelle configuration garde un flux échangé constant entre le fluide caloporteur et les PCMs. Le fluide caloporteur circule dans la direction où la température de fusion des PCMs diminue. La température d'entrée du fluide caloporteur reste toujours le facteur qui influe beaucoup l'évolution des paramètres thermique le long du processus de charge et de décharge. Pour cela, le comportement thermique de cette nouvelle configuration, ainsi que l'évolution des autres nouvelles paramètres comme la température des différents PCMs utilisés, la température de sortie du fluide caloporteur, le taux de stockage thermique, le temps de fusion et de solidification et la quantité d'énergie stockée dans chaque PCM sont étudiés numériquement et présentés graphiquement.

III.3. Modèle physique et équations gouvernantes

III.3.1. Modèle physique pour l'unité de stockage

Une nouvelle configuration a été mise en évidence dans ce chapitre. Une unité de stockage thermique par chaleur latente constituée de deux tubes concentriques est étudiée, **figure III.8**. Cette unité est similaire à celle présentée en chapitre II. Cependant, l'espace annulaire de l'unité est rempli avec deux types de paraffine, nommée PCM1 et PCM2 avec différentes températures de fusion 333 K et 323 K, respectivement. Le modèle physique bidimensionnel associé à cette nouvelle configuration est présenté sur la **figure III.9**. Les dimensions de l'unité de stockage sont semblables au travail numérique présenté par [Ait Adine & El Qarnia \[11\]](#). Cependant, les PCMs mises en œuvre et les conditions de fonctionnement sont différentes. La longueur de l'unité est $L_1=0.47$ m, $L_2=0.53$ m, le rayon du tube intérieur et extérieur sont $R_1=0.635$ cm et $R_2=1.135$ cm, respectivement.

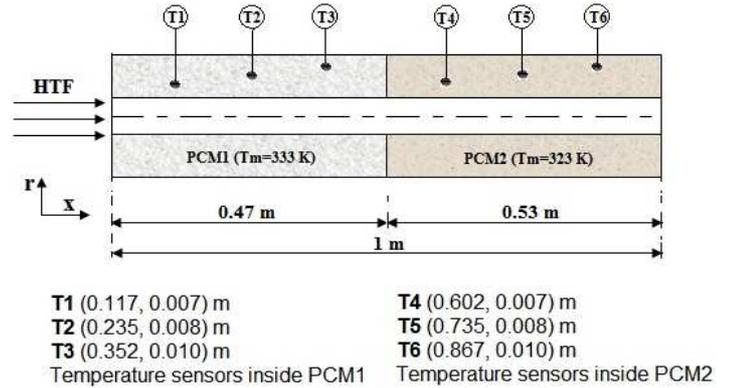
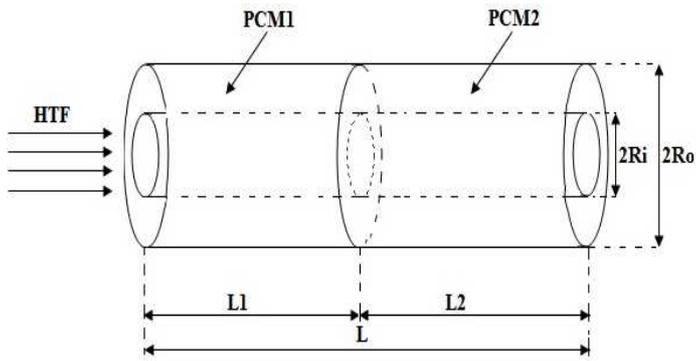


Figure III.8. Schéma de l'unité de stockage remplie avec deux types de paraffine.

Figure III.9. Modèle physique de l'unité de stockage.

III.3.2. Propriétés thermo-physiques du HTF et de PCMs

Le fluide caloporteur, eau saturé, circule en régime laminaire à l'intérieur de l'unité de stockage. Durant la charge, l'eau chaude passe à l'intérieur du tube interne ou les températures de fusion des PCMs augmentent. Cependant, durant la décharge, la direction de l'écoulement d'eau est inversée. La température d'entrée du fluide caloporteur est ($T=338$ K, $T=343$ K et $T=353$ K) pendant le processus de charge, et ($T=303$ K, $T=313$ K et $T=318$ K) pendant le processus de décharge. La vitesse d'entrée du fluide caloporteur est supposée constante ($U=0.004$ m/s).

Les deux matériaux de stockage mise en œuvre dans cette étude sont de type paraffine, ils sont caractérisés par différents propriétés thermo-physiques sauf leurs valeurs de conductivité thermique, [Watanabe et al. \[18\]](#), [Yang et al. \[21\]](#). Pendant la charge, les PCMs sont en état solide, leurs températures initiale est 20 K au dessous de la température de fusion de PCM2. Par contre, pendant la décharge, les PCMs sont en état liquide, leurs températures initiale est 20 K au dessus de la température de fusion de PCM1. Les propriétés thermo-physiques de PCM1, PCM2 et HTF sont représentés dans le **tableau III.1** et **tableau III.2**, respectivement.

Tableau III.1. Propriétés thermo-physiques de PCM1 et PCM2.

	PCM1	PCM2
Température de fusion (K)	333	323
Chaleur latente ($kJ\ kg^{-1}$)	$2.09 \cdot 10^2$	$2.00 \cdot 10^2$
Conductivité thermique ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)	0.4	0.4
Chaleur spécifique ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$)	1850	1650
Masse volumique ($kg\ m^{-3}$)	861	848
Viscosité dynamique ($kg\ m^{-1}\ s^{-1}$)	$6.3 \cdot 10^{-3}$	$5.6 \cdot 10^{-3}$

Tableau III.2. Propriétés thermo-physiques du fluide caloporteur, Incropera et al. [25].

Processus de charge	T=338 K	T=343 K	T=353 K
Masse volumique ($kg\ m^{-3}$)	979	976	970
Conductivité thermique ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)	0.660	0.668	0.671
Chaleur spécifique ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$)	4188	4191	4199
Viscosité dynamique ($Kg\ m^{-1}\ s^{-1}$)	420.10^{-6}	389.10^{-6}	343.10^{-6}
Processus de décharge	T=303 K	T=313 K	T=318 K
Masse volumique ($kg\ m^{-3}$)	995	991	989
Conductivité thermique ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)	0.620	0.634	0.640
Chaleur spécifique ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$)	4178	4179	4180
Viscosité dynamique ($Kg\ m^{-1}\ s^{-1}$)	769.10^{-6}	631.10^{-6}	577.10^{-6}

III.3.3. Formulation mathématique

Le modèle mathématique, formulé en coordonnées cylindrique bidimensionnel est le même qu'on a présenté en chapitre II, les mêmes hypothèses simplificatrices sont aussi imposées. Cependant, les valeurs des conditions initiales et conditions aux limites pour le fluide HTF et PCMs sont différentes, vue la nouvelle configuration étudiée et les propriétés thermo-physiques des PCMs.

III.3.3.1. Formulation mathématique pour HTF et PCMs

Les équations bidimensionnelles de conservation d'énergie pour le fluide caloporteur, qui circule à l'intérieur du tube interne et les matériaux à changement de phase, qui remplis l'espace annulaire, sont formulées en coordonnées cylindriques tel que:

$$(\rho C_p)_f \left(\frac{\partial T_f(x, r, t)}{\partial t} + U \frac{\partial T_f(x, r, t)}{\partial x} \right) = k_f \left(\frac{\partial^2 T_f(x, r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_f(x, r, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_f(x, r, t)}{\partial x^2} \right) \quad (III.01)$$

$$x > 0, \quad 0 < r < R_1, \quad t > 0$$

$$(\rho C_p)_{pcm} \frac{\partial \theta_{pcm}(x, r, t)}{\partial t} = k_{pcm} \left[\frac{\partial^2 \theta_{pcm}(x, r, t)}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta_{pcm}(x, r, t)}{\partial r} \right) \right] - \rho_{pcm} \Delta H \frac{\partial f}{\partial t} \quad (III.02)$$

$$x > 0, \quad R_1 < r < R_2, \quad t > 0$$

$$\text{Avec: } \theta_{pcm} = (T_{pcm} - T_M), \quad T_M = \begin{cases} T_{M1} & 0 \leq x \leq L_1 \\ T_{M2} & L_1 \leq x \leq L_2 \end{cases} \quad (III.03)$$

III.3.3.2. Conditions initiales et aux limites pour HTF

$$\begin{cases} U_f(x, r, t = 0) = U_{f,ini} \\ T_f(x, r, t = 0) = T_{f,ini} \end{cases} \quad x > 0, \quad 0 < r < R_1 \quad (\text{III.04})$$

A l'entrée de la conduite

$$\begin{cases} U_f(x = 0, r, t) = U_{f,in} \\ T_f(x = 0, r, t) = T_{f,in} \end{cases} \quad 0 < r < R_1, \quad t > 0 \quad (\text{III.05})$$

Condition de symétrie

$$\left. \frac{\partial U_f(x, r, t)}{\partial r} \right|_{r=0} = \left. \frac{\partial T_f(x, r, t)}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad x > 0, \quad t > 0 \quad (\text{III.06})$$

III.3.3.3. Conditions initiales et aux limites pour PCMs

$$T_{pcm}(x, r, t = 0) = T_{pcm,ini} \quad x > 0, \quad R_1 < r < R_2 \quad (\text{III.07})$$

Durant la charge

$$T_{pcm1}(0 \leq x \leq L_1, R_1 \leq r \leq R_2, t = 0) = T_{pcm2}(L_1 \leq x \leq L_2, R_1 \leq r \leq R_2, t = 0) = 303 \text{ K} \quad (\text{III.08})$$

Durant la décharge

$$T_{pcm1}(0 \leq x \leq L_1, R_1 \leq r \leq R_2, t = 0) = T_{pcm2}(L_1 \leq x \leq L_2, R_1 \leq r \leq R_2, t = 0) = 353 \text{ K} \quad (\text{III.09})$$

Condition adiabatique

$$\left. \frac{\partial \theta_{pcm1}(x, r, t)}{\partial r} \right|_{r=R_2} = \left. \frac{\partial \theta_{pcm2}(x, r, t)}{\partial r} \right|_{r=R_2} = 0 \quad x > 0, \quad t > 0 \quad (\text{III.10})$$

$$\left. \frac{\partial \theta_{pcm1}(x, r, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial \theta_{pcm2}(x, r, t)}{\partial x} \right|_{x=L} = 0 \quad R_1 < r < R_2, \quad t > 0 \quad (\text{III.11})$$

Interface PCM1/PCM2

$$k_{pcm1} \left. \frac{\partial \theta_{pcm1}(x, r, t)}{\partial x} \right|_{x=L1} = k_{pcm2} \left. \frac{\partial \theta_{pcm2}(x, r, t)}{\partial x} \right|_{x=L1} \quad (\text{III.12})$$

$$\theta_{pcm1}(x = L_1, r, t)_{PCM1} = \theta_{pcm2}(x = L_1, r, t)_{PCM2} \quad (\text{III.13})$$

L'égalité des flux d'échange à l'interface HTF/PCMs est donnée par:

$$h_f (\theta_f - \theta(x, r = R_1, t)) = -k_{pcm1} \left. \frac{\partial \theta_{pcm1}(x, r, t)}{\partial r} \right|_{r=R_1} \quad 0 \leq x \leq L_1, r = R_1, t > 0 \quad (\text{III.14})$$

$$h_f (\theta_f - \theta(x, r = R_1, t)) = -k_{pcm2} \left. \frac{\partial \theta_{pcm2}(x, r, t)}{\partial r} \right|_{r=R_1} \quad L_1 \leq x \leq L_2, r = R_1, t > 0 \quad (\text{III.15})$$

h est le coefficient de transfert thermique convectif.

III.4. Résultats et discussion

III.4.1. Cas test avec vitesse d'entrée du fluide caloporteur 0.004 m/s

Le comportement thermique de cette nouvelle configuration, ainsi que la variation des différents paramètres thermiques le long du processus de charge et de décharge est étudié sous l'effet de différentes températures d'entrées du fluide caloporteur. La vitesse d'entrée du fluide HTF est maintenant constante et égal à 0.004 m/s.

III.4.1.1. Comportement thermique de l'unité de stockage

L'évolution instationnaire de la température de PCM1 et PCM2 pour trois points de référence durant le processus de charge et de décharge sont représentés sur les **figures III.10 (a-b-c)** et **figures III.11 (a-b-c)**, respectivement. Le même comportement thermique a été observé concernant les trois périodes de variation de température de chaque PCM, période de stockage sensible, stockage latent et deuxième période de stockage sensible l'orque le PCM est complètement fusionné. Cependant, durant le mode de charge, **figures III.10 (a-b-c)**, le taux de fusion de PCM2 est plus rapide que PCM1, la température de PCM2 évolue très rapidement jusqu'à la fin du processus. Par contre, durant le mode de décharge, **figures III.11 (a-b-c)**, le taux de solidification de PCM1 est plus rapide que PCM2. Ceci est du au premier lieu à la température de fusion de chaque PCM. Durant la charge, la différence de température entre le HTF et PCM2 est grande, ce qui provoque un taux de fusion important. Par contre, durant la décharge, cette différence est imposée entre le HTF et le PCM1.

Ainsi, le taux de fusion et de solidification de chaque PCM devient relativement important pour une grande différence de température imposée entre le HTF et chaque PCM. Par conséquent, le processus de charge et de décharge est rapidement atteint. Il faut cependant noter que, le temps nécessaire pour compléter le processus de charge est de 3600 s, 2200 s et 1400 s pour des températures d'entrée 338 K, 343 K et 353 K, respectivement.

Afin d'augmenter le flux transféré aux PCMs, les résultats montrent que, pour une température d'entrée du fluide HTF donné, un flux de chaleur important est transféré au PCM1 après la fin de

la 1^{ère} période de stockage sensible de PCM2. Ainsi, la fin de la 2^{ème} période de stockage latent de PCM2 présente le début de la 2^{ème} période de stockage latent de PCM1. Par conséquent, le flux de chaleur transféré été quasi-constant au cours d'une charge.

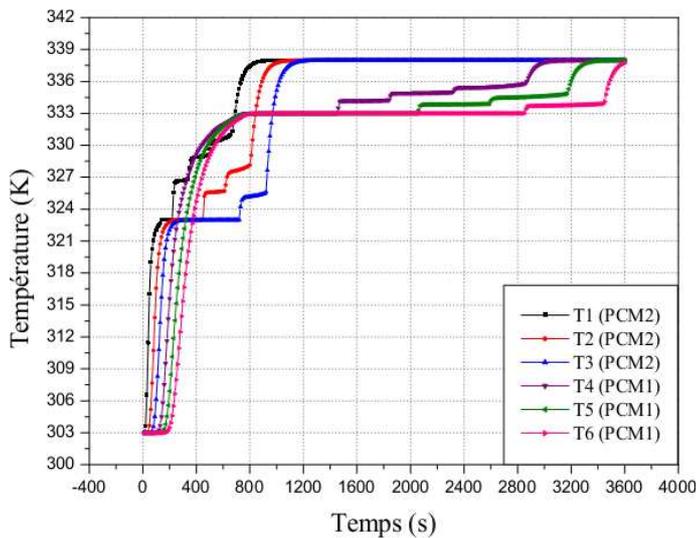


Figure III.10a. Evolution instationnaire de la température de PCM1 et PCM2 durant le mode de fusion ($T_{f,in}=338$ K).

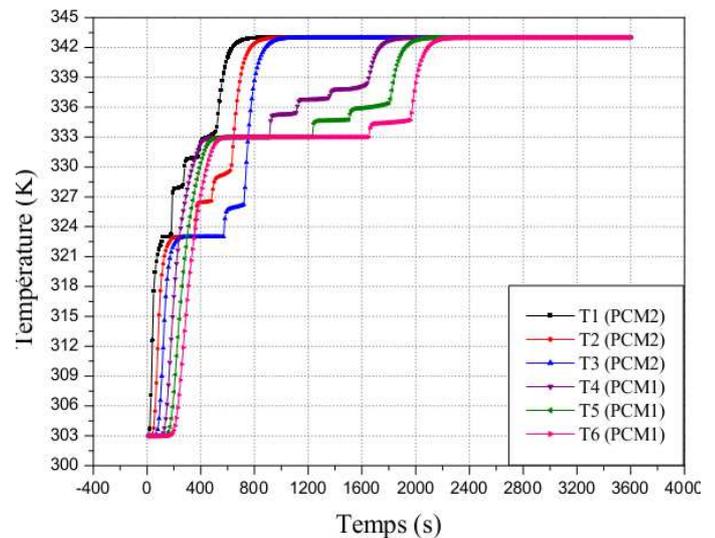


Figure III.10b. Evolution instationnaire de la température de PCM1 et PCM2 durant le mode de fusion ($T_{f,in}=343$ K).

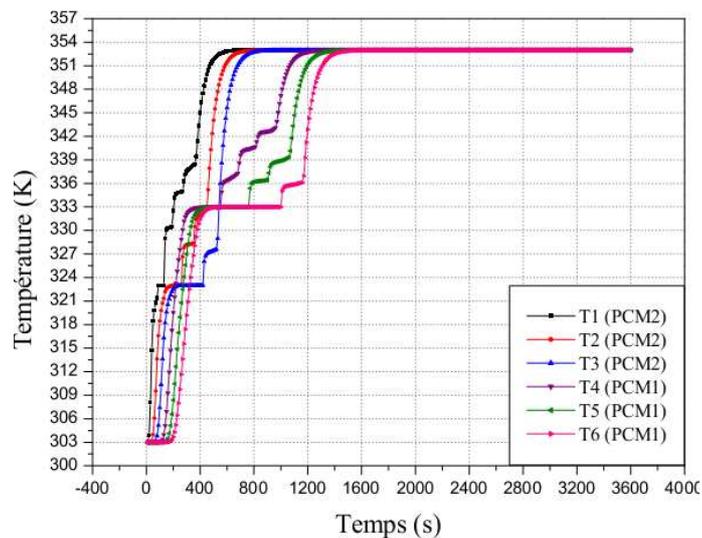


Figure III.10c. Evolution instationnaire de la température de PCM1 et PCM2 durant le mode de fusion ($T_{f,in}=353$ K).

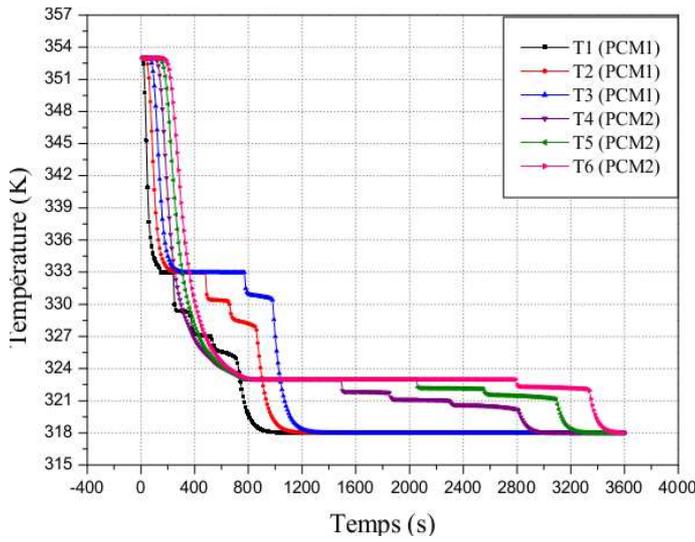


Figure III.11a. Evolution instationnaire de la température de PCM1 et PCM2 durant le mode de solidification ($T_{f,in}=318$ K).

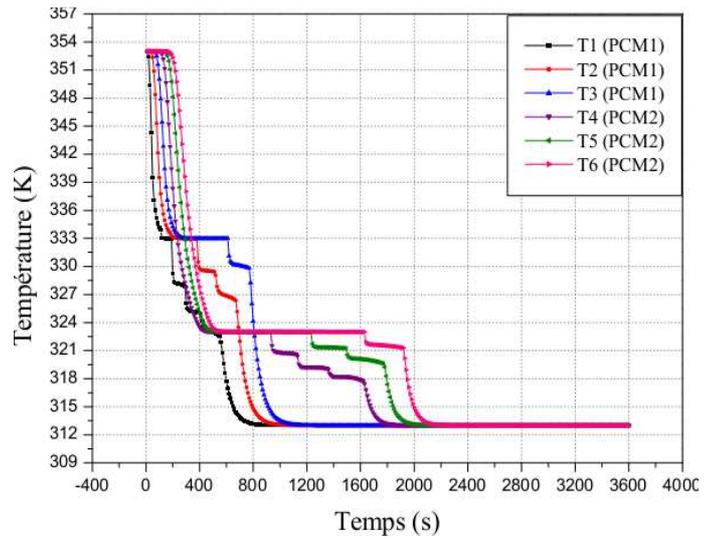


Figure III.11b. Evolution instationnaire de la température de PCM1 et PCM2 durant le mode de solidification ($T_{f,in}=313$ K).

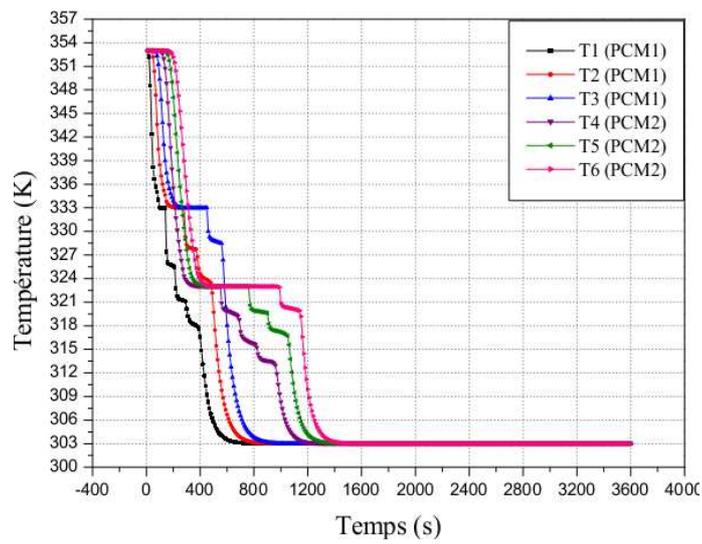


Figure III.11c. Evolution instationnaire de la température de PCM1 et PCM2 durant le mode de solidification ($T_{f,in}=303$ K).

III.4.1.2. Température de sortie du fluide caloporteur

La variation instationnaire de la température de sortie du fluide caloporteur durant le processus de charge et de décharge est illustrée sur la **figure III.12 (a-b)**. Durant la charge, **figure III.12a**, la température de sortie du fluide HTF reste constante et égal à la température initiale pendant la première 200 s de charge. Durant cette période, le taux de stockage thermique est important, une quantité importante d'énergie thermique fournie par le HTF est transférée au PCMs afin accomplir la 1^{ère} période de stockage sensible pour PCM2, et d'entamer cette période pour PCM1. Après 200 s, jusqu'à 400 s, une augmentation rapide de la température de sortie du fluide HTF a été observée. Durant cette période, le PCM2 va procéder au changement de phase, ou sa température reste constante. Cependant, pour PCM1, sa température commence à augmenter afin d'accomplir sa 1^{ère} période de stockage sensible. Après 400 s, une légère augmentation de la température du fluide HTF est observée, jusqu'à atteindre la température d'entrée du fluide caloporteur. Durant cette période, le PCM2 est complètement fusionné, il est en 2^{ème} période de stockage sensible. Par contre, le PCM1 va procéder au changement de phase après environ 800 s. Les mêmes périodes ont été observées durant la période de décharge, **figure III.12b**.

Il faut cependant noter que, le temps pour laquelle la température de sortie du fluide HTF devient égale à sa température d'entrée correspond au même temps nécessaire pour compléter le processus de charge, 3600 s, 2200 s et 1400 s pour des températures d'entrée 338 K, 343 K et 353 K, respectivement.

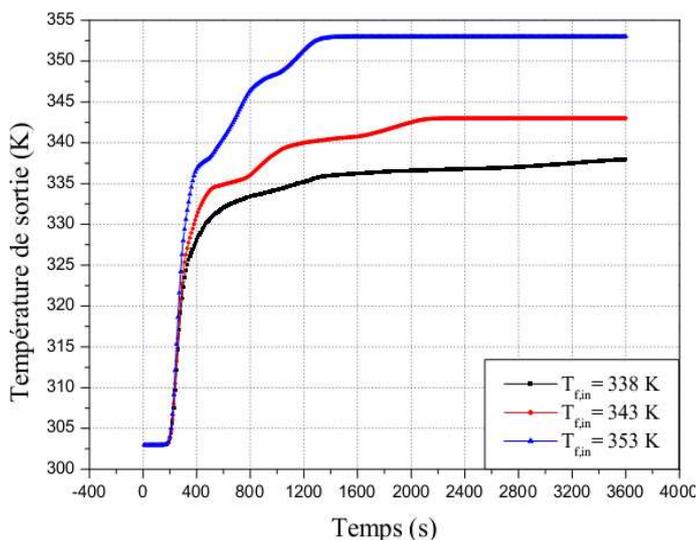


Figure III.12a. Température de sortie du fluide caloporteur durant la fusion.

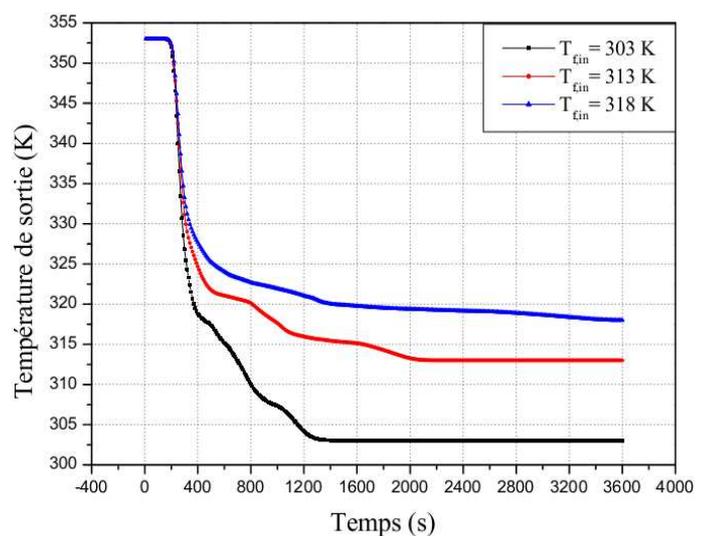


Figure III.12b. Température de sortie du fluide caloporteur durant la solidification.

III.4.1.3. Evolution du taux de stockage

La variation instationnaire du taux de stockage thermique durant le processus de charge et de décharge est illustrée sur la **figure III.13 (a-b)**. Durant la charge, **figure III.13a**, pour une température d'entrée du fluide caloporteur donnée, l'évolution du taux de stockage passe par trois périodes différentes. La 1^{ère} période dure environ 200 s, où le taux de stockage thermique augmente très rapidement jusqu'à une valeur maximale. Durant cette période, une quantité importante d'énergie thermique est transférée au PCMs. La valeur maximale du taux de stockage dépend de la température d'entrée du fluide HTF, elle est 4000 W, 3150 W et 2650 W pour des températures d'entrées 353 K, 343 K et 338 K, respectivement. La 2^{ème} période dépend aussi de la température d'entrée, où le taux de stockage commence à diminuer, jusqu'à atteindre une valeur de 1625 W, 1300 W et 600 W pour des températures d'entrées 353 K, 343 K et 338 K, respectivement. Durant cette période, le PCM2 va procéder au changement de phase. Par contre, le PCM1, sa température commence à augmenter afin d'accomplir sa 1^{ère} période de stockage sensible. Après 600 s, 700 s et 1000 s qui correspondent à la fin de la 2^{ème} période, la 3^{ème} période commence. Le taux de stockage continue à diminuer jusqu'à une valeur zéro. La fin de cette dernière période correspond exactement au temps pour laquelle le processus de charge est terminé, 3600 s, 2200 s et 1400 s pour des températures d'entrées 338 K, 343 K et 353 K, respectivement. Les mêmes périodes ont été aussi observées durant la période de décharge, **figure III.13b**.

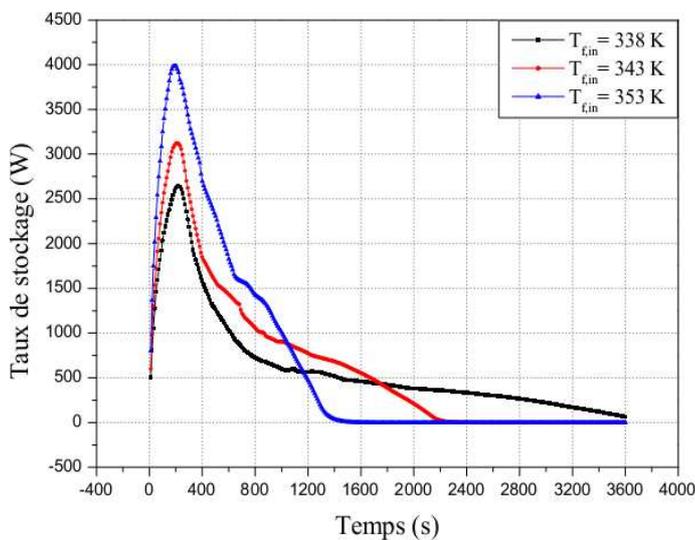


Figure III.13a. Taux de stockage thermique durant le processus de fusion.

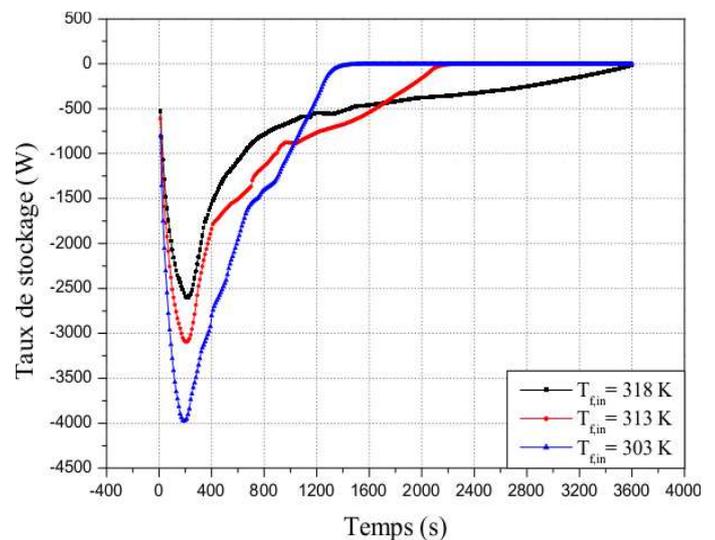


Figure III.13b. Taux de stockage thermique durant le processus de solidification.

III.4.1.4. Evolution du temps de fusion et de solidification pour chaque PCM

La **figure III.14 (a-b)** illustre la variation du temps de fusion et de solidification pour différents températures d'entrées du fluide caloporteur. L'augmentation de la différence de température entre le HTF et chaque PCM provoque un taux de fusion et de solidification important, donc le temps de fusion et de solidification diminue. Cependant, cette diminution varie en fonction de la température de fusion de chaque PCM.

Durant la charge, **figure III.14a**, le temps de fusion de PCM1 diminue considérablement avec l'augmentation de la température du HTF par rapport au PCM2. Quand la température d'entrée augmente de 338 K jusqu'à 353 K, le temps de fusion de PCM1 diminue de 52.83 min à 17.83 min, ce qui réduit le temps de fusion à 66 %. Cependant, pour PCM2, le temps de fusion diminue de 13.5 min à 7.5 min, ce qui réduit le temps de fusion à 44 %. Durant la décharge, **figure III.14b**, le temps de solidification de PCM2 diminue considérablement avec la diminution de la température du HTF. Quand la température d'entrée diminue de 318 K jusqu'à 303 K, le temps de solidification de PCM2 diminue de 51.5 min à 17.66 min, ce qui réduit le temps de solidification à 65 %. Cependant, pour PCM1, le temps de solidification diminue de 14.33 min à 8.16 min, ce qui réduit le temps de solidification à 43 %. Il faut cependant noter que, quand la différence de température entre le HTF et le PCM est assez grande, la diminution du temps de fusion devient faible.

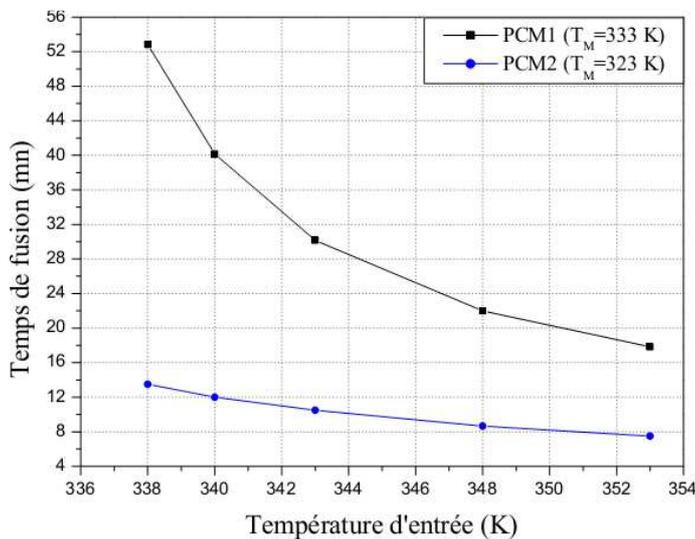


Figure III.14a. Variation du temps de fusion pour différents températures d'entrées.

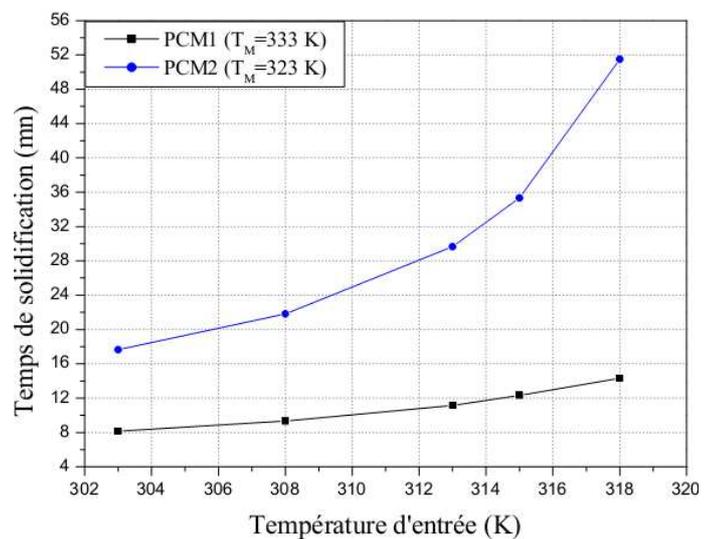


Figure III.14b. Variation du temps de solidification pour différents températures d'entrées.

III.4.1.5. Evolution de l'énergie totale stockée dans chaque PCM

La **figure III.15 (a-b-c)** représente la variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM pour différents températures d'entrées du fluide caloporteur. Quand la température d'entrée augmente de 338 K jusqu'à 353 K, l'énergie thermique transportée par le fluide HTF augmente, et la chaleur transmise à chaque PCM devient importante. Par conséquent, le processus de charge est rapidement atteint. Les résultats montrent que l'énergie totale stockée augmente rapidement dans le PCM2 jusqu'à atteindre une valeur maximale à la fin du processus. Cependant, pour PCM1, l'augmentation est relativement faible. A la fin du processus, la grande quantité d'énergie stockée est comprise dans le PCM qui a une grande température de fusion.

Ainsi, l'énergie totale stockée atteint une valeur maximale à la fin du processus et égal à 281940 J/kg dans PCM1 et 265630 J/kg dans PCM2, pour température d'entrée 338 K. Par contre, pour une température d'entrée 343 K, l'énergie stockée est 291850 J/kg dans PCM1 et 273880 J/kg dans PCM2. Cependant, pour une température d'entrée 353 K, l'énergie stockée est 310350 J/kg dans PCM1 et 290380 J/kg dans PCM2.

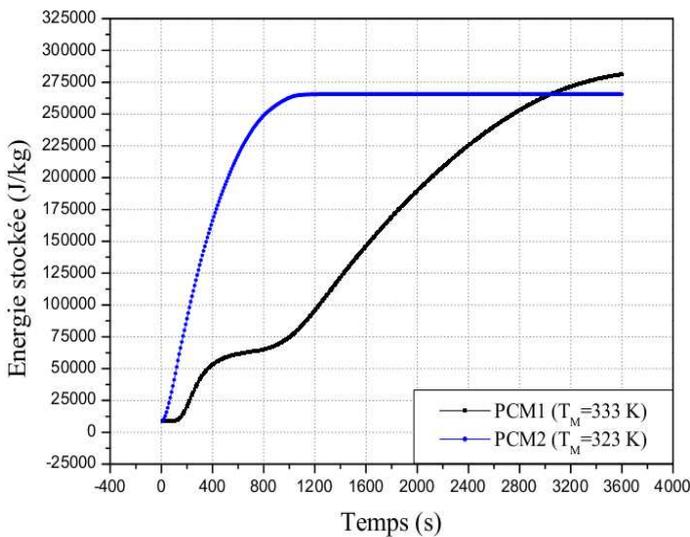


Figure III.15a. Variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=338$ K).

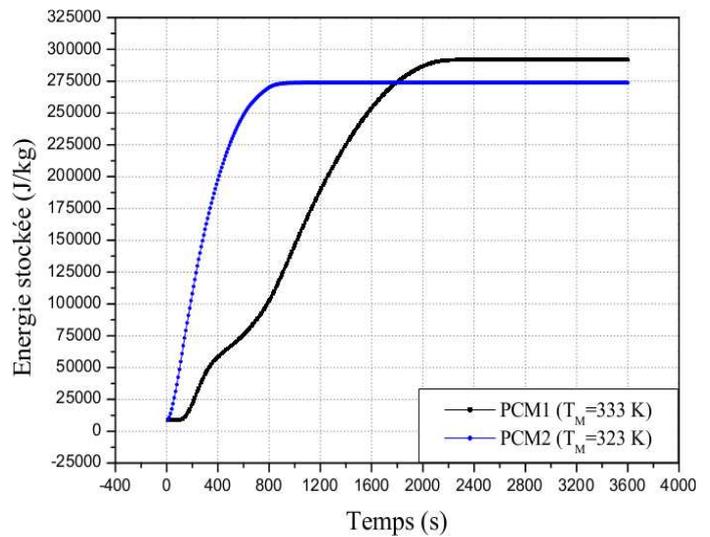


Figure III.15b. Variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=343$ K).

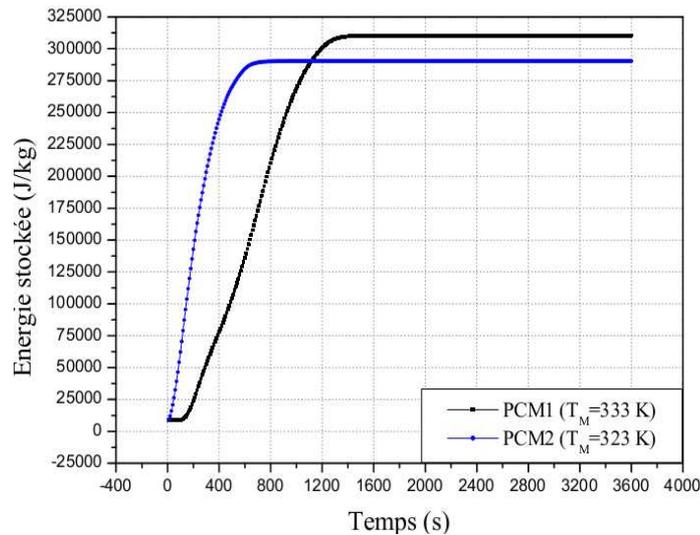


Figure III.15c. Variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=353$ K).

III.4.2. Cas test avec vitesse d'entrée du fluide caloporteur 0.03 m/s

Afin de visualiser l'influence de la vitesse d'entrée du fluide caloporteur sur la variation de quelques paramètres thermique le long du processus de charge, l'unité de stockage rempli avec les deux type de paraffine est étudié. La vitesse d'entrée du fluide caloporteur est maintenant constante et égal à 0.03 m/s.

III.4.2.1. Comportement thermique de l'unité de stockage

Le même comportement thermique a été observé concernant les trois périodes de variation de température de chaque PCM, période de stockage sensible, stockage latent et deuxième période de stockage sensible, **figure III.16 (a-b-c)**. Ainsi, la température de PCM qui à une basse température de fusion évolue rapidement jusqu'à la fin du processus. L'augmentation de la vitesse d'entrée du fluide caloporteur n'influe pas l'évolution instationnaire de la température. Sauf sur le temps nécessaire pour compléter chaque période mentionné au dessus.

Par comparaison entre les deux vitesses testées, pour une même température d'entrée de 338 K, et pour les mêmes points de références. Le temps nécessaire pour compléter la 3^{ème} période de stockage sensible pour une vitesse 0.004 m/s est 1200 s pour PCM2 ($T_M=323$ K) et 3600 s pour PCM1 ($T_M=333$ K). Par contre, Le temps nécessaire pour compléter la 3^{ème} période de stockage sensible pour une vitesse 0.03 m/s est 750 s pour PCM1 ($T_M=323$ K) et 2100 s pour PCM2 ($T_M=333$ K). Par conséquent, l'effet de la vitesse d'entrée du fluide HTF est bien visualiser au niveau du temps de processus de stockage.

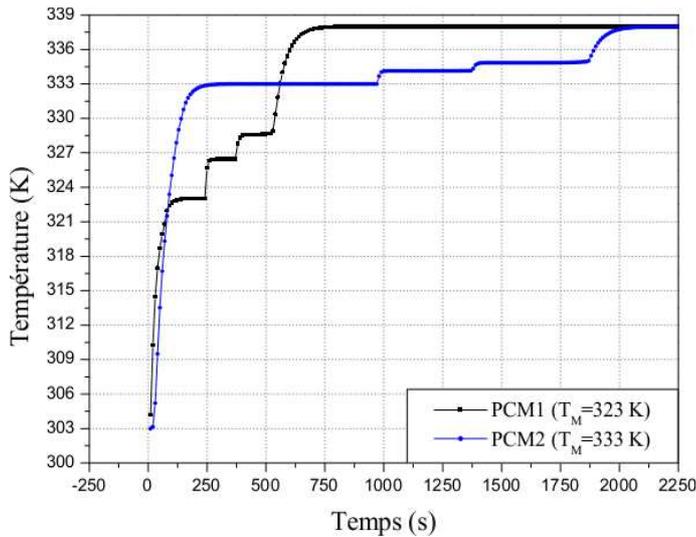


Figure III.16a. Variation instationnaire de la température de PCM1 et PCM2 durant le mode de fusion ($T_{f,in}=338$ K).

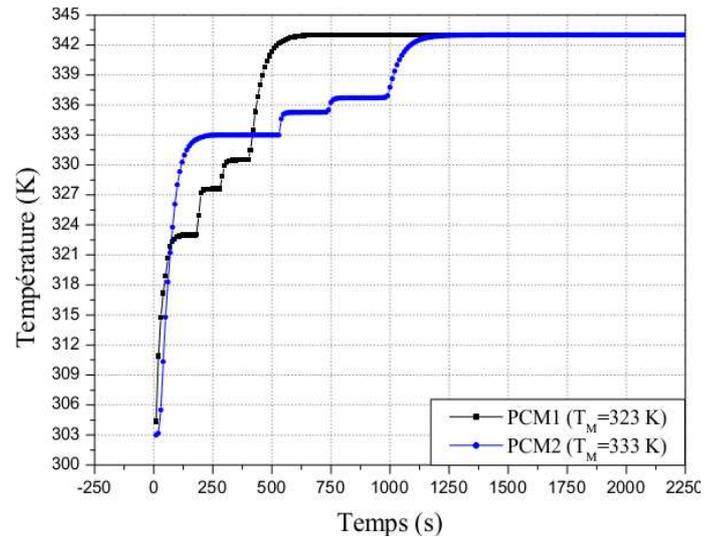


Figure III.16b. Variation instationnaire de la température de PCM1 et PCM2 durant le mode de fusion ($T_{f,in}=343$ K).

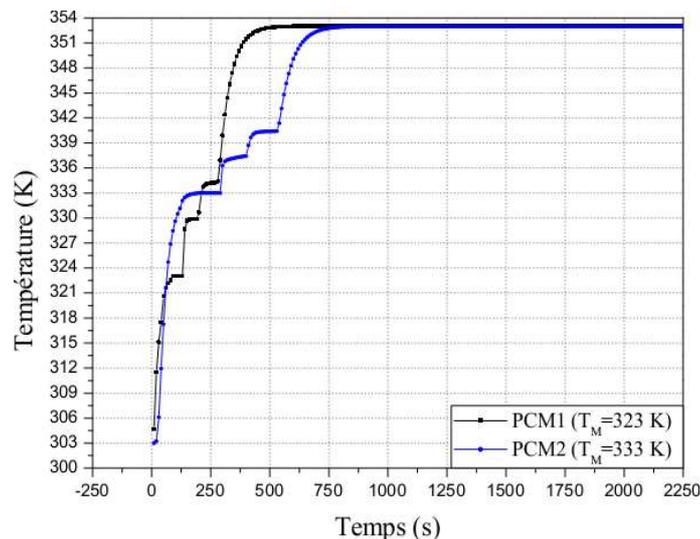


Figure III.16c. Variation instationnaire de la température de PCM1 et PCM2 durant le mode de fusion ($T_{f,in}=353$ K).

III.4.2.2. Evolution du temps de fusion pour chaque PCM

La variation du temps de fusion pour chaque PCM pour une vitesse d'entrée de 0.03 m/s est illustrée sur la **figure III.17**. Le temps de fusion de PCM qui à une haute température de fusion diminue considérablement avec l'augmentation de la température d'entrée du fluide HTF. Quand la température d'entrée augmente de 338 K jusqu'à 355 K, le temps de fusion de PCM2 diminue de 1870 s à 490 s, ce qui réduit le temps de fusion à 73.8 %. Cependant, pour PCM1, le temps de fusion diminue de 530 s à 270 s, ce qui réduit le temps de fusion à 49.1 %.

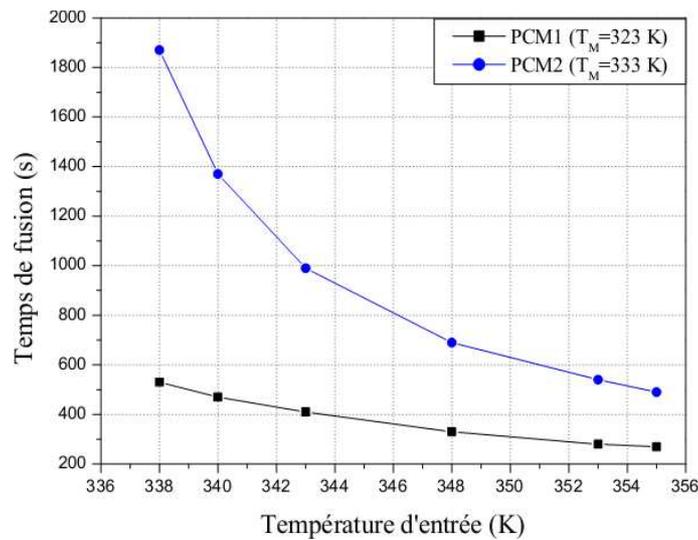


Figure III.17. Variation du temps de fusion pour différentes températures d'entrées.

III.4.2.3. Evolution de l'énergie totale stockée dans chaque PCM

La **figure III.18 (a-b-c)** illustre la variation de la quantité d'énergie stockée dans chaque PCM, pour une vitesse d'entrée du fluide HTF 0.03 m/s. L'énergie totale stockée augmente rapidement dans le PCM1 ($T_M=323$ K) jusqu'à atteindre une valeur maximale à la fin du processus. Par contre, pour PCM2 ($T_M=333$ K), l'augmentation est relativement faible. Cependant, l'augmentation de la vitesse d'entrée du fluide HTF accélère l'augmentation de l'énergie stockée dans le PCM2. A la fin du processus, la grande quantité d'énergie stockée est comprise dans le PCM qui a une grande température de fusion. Ainsi, les mêmes valeurs de la quantité d'énergie ont été trouvées malgré l'augmentation de la vitesse d'entrée du fluide caloporteur.

Les résultats montrent que l'augmentation de la vitesse d'entrée du fluide caloporteur n'influe pas la capacité de stockage thermique, ou la quantité d'énergie stockée dans le matériau considéré. Sauf sur le temps nécessaire pour compléter le processus de charge.

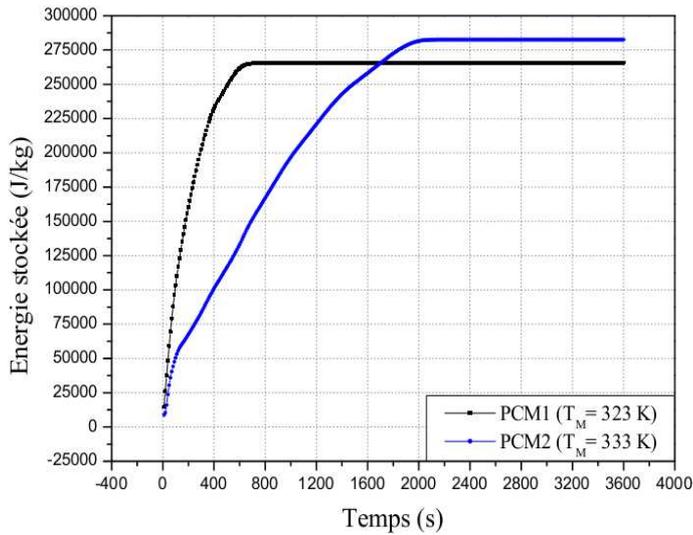


Figure III.18a. Variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=338$ K).

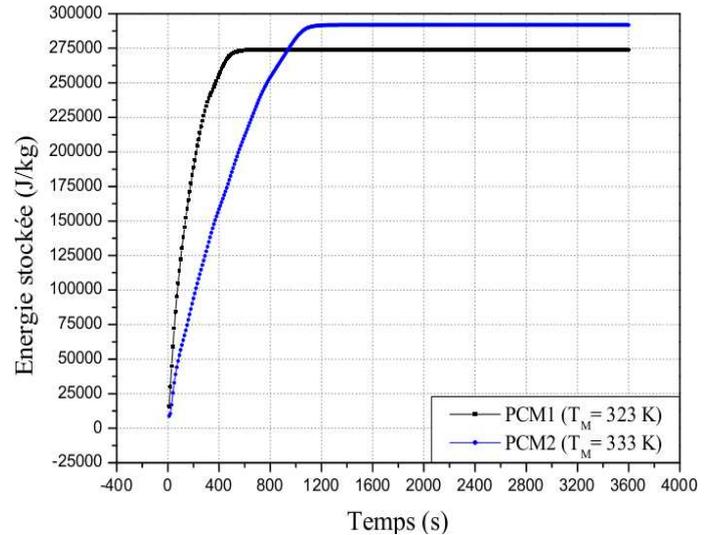


Figure III.18b. Variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=343$ K).

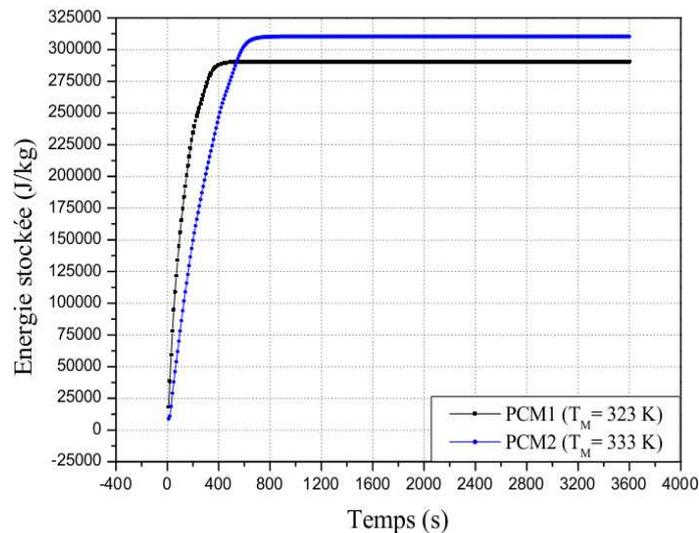


Figure III.18c. Variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=353$ K).

III.5. Synthèse du chapitre III

Dans l'étude qui a été faite au troisième chapitre, et afin d'augmenter l'échange thermique et d'améliorer le transfert de chaleur entre le fluide caloporteur et le matériau à changement de phase. Le comportement thermique d'une unité de stockage remplie avec deux types de paraffine est étudié. Cette étude met en lumière l'effet de la température et la vitesse d'entrée du fluide caloporteur sur la variation de différents paramètres thermiques dans chaque PCM le long du processus de charge et de décharge. Les conclusions suivantes ont été établies:

- Le même comportement thermique a été observé concernant les trois périodes de variation de température de chaque PCM, période de stockage sensible, stockage latent et deuxième

- période de stockage sensible. Cependant, la température de fusion de chaque PCM influe sur le taux de fusion et de solidification;
- b) Le taux de fusion et de solidification de chaque PCM devient relativement important pour une grande différence de température imposée entre le HTF et chaque PCM;
 - c) Un flux de chaleur important est transféré au PCM1 après la fin de la 1^{ère} période de stockage sensible de PCM2. Ainsi, la fin de la 2^{ème} période de stockage latent de PCM2 présente le début de la 2^{ème} période de stockage latent de PCM1;
 - d) L'évolution du taux de stockage passe par trois périodes: (1) la 1^{ère} période dure environ 200 s, ou le taux de stockage augmente très rapidement jusqu'à une valeur maximale, qui dépend de la température d'entrée du fluide HTF; (2) la 2^{ème} période dure entre 600 s et 1000 s, le taux de stockage commence à diminuer jusqu'à atteindre trois valeurs différentes; (3) dans la 3^{ème} période, le taux de stockage continue à diminuer jusqu'à une valeur zéro. La fin de cette dernière période correspond exactement au temps pour laquelle le processus de charge est terminé;
 - e) Durant la charge, le temps de fusion de PCM1 diminue considérablement avec l'augmentation de la température du HTF. Cependant, durant la décharge, le temps de solidification de PCM2 diminue considérablement avec la diminution de la température du HTF. Il faut cependant noter que, quand la différence de température entre le HTF et le PCM est assez grande, la diminution du temps de fusion devient faible;
 - f) La capacité de stockage thermique est importante quand la différence de température entre le HTF et PCM est grande. Ainsi, la grande quantité d'énergie stockée est comprise dans le PCM qui a une grande température de fusion;
 - g) L'augmentation de la vitesse d'entrée du fluide caloporteur n'influe pas l'évolution instationnaire de la température. Sauf sur le temps nécessaire pour compléter chaque période de stockage;
 - h) L'augmentation de la vitesse d'entrée du fluide caloporteur n'influe pas la capacité de stockage thermique. Sauf sur le temps nécessaire pour compléter le processus de charge.

Bibliographie du chapitre III

- [1] A. Soupart-Caron, Stockage de chaleur dans les matériaux à changement de phase. Thèse de Doctorat (2015), *CEA-LITEN, École doctorale I-MEP2, Grenoble*.
- [2] S.M. Hasnain, Review on sustainable thermal energy storage technologies, part I: heat storage materials and techniques, *Energy Conversion and Management* 11 (1998) 1127-1138.
- [3] S. Himran, A. Suwono and G. Mansoori, Characterization of alkanes and paraffin waxes for application of phase change energy storage medium, *Energy Sources* 16 (1994) 117-128.
- [4] Y. Hamada, W. Ohtsu and J. Fukai, Thermal response in thermal energy storage material around heat transfer tubes: effect of additives on heat transfer rates, *Solar Energy* 75 (2003) 317-328.
- [5] X. Xiao, P. Zhang and M. Li, Effective thermal conductivity of open-cell metal foams impregnated with pure paraffin for latent heat storage, *International Journal of Thermal Sciences* 81 (2014) 94-105.
- [6] M. Li, A nano-graphite/paraffin phase change material with high thermal conductivity, *Applied Energy* 106 (2013) 25-30.
- [7] F. Dinter, M. Geyer and R. Tamme, Thermal energy storage for commercial applications (TESCA), a feasibility study on economic storage systems, *Springer-Verlag*, Berlin ed 1991.
- [8] A. F. Regin, S. C. Solanki and J. S. Saini, Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12 (2008) 2438-2451.
- [9] A. Al-Abidi, S. Mat, K. Sopian, M.Y. Sulaiman and A.T. Mohammad, Numerical study of PCM solidification in a triplex tube heat exchanger with internal and external fins, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 61 (2013) 684-695.
- [10] A. Al-Abidi, S. Mat, K. Sopian, M.Y. Sulaiman and A.T. Mohammad, Internal and external fin heat transfer enhancement technique for latent heat thermal energy storage in triplex tube heat exchangers, *Applied Thermal Engineering* 53 (2013) 147-156.
- [11] H. Ait Adine and H. El Qarnia, Numerical analysis of the thermal behaviour of a shell-and-tube heat storage unit using phase change materials, *Applied Mathematical Modelling* 33 (2009) 2132-2144.
- [12] M.M. Farid and A. Kanzawa, Thermal performance of a heat storage module using PCMs with different melting temperatures: Mathematical modeling, *Transactions of the ASME. Journal of Solar Energy Engineering* 111 (1989) 152-157.
- [13] M.M. Farid and A. Kanzawa, Thermal performance of a heat storage module using PCMs with different melting temperatures: Experimental, *Transactions of the ASME. Journal of Solar Energy Engineering* 112 (1990) 125-131.
- [14] M. Fang and G. Chen, Effects of different multiple PCMs on the performance of a latent thermal energy storage system, *Applied Thermal Engineering* 27 (2007) 994-1000.
- [15] M.Akgun, O. Aydin and K. Kaygusuz, Thermal energy storage performance of paraffin in a novel tube-in-shell system, *Applied Thermal Engineering* 28 (2008) 405-413.

- [16] Y.Q Li, Y.L He, H.J Song, C Xu and W.W. Wang, Numerical analysis and parameters optimization of shell-and-tube heat storage unit using three phase change materials, *Renewable Energy* 59 (2013) 92-99.
- [17] H. El Qarnia, 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 (2009) 247-254.
- [18] T. Watanabe, H. Kikuchi and A. Kanzawa, Enhancement of charging and discharging rates in a latent heat storage system by use of PCM with different melting temperatures, *Heat Recovery Systems & CHP* 13 (1993) 57-66.
- [19] H. Michels and R. Pitz-Paal, Cascaded latent heat storage for parabolic trough solar power plants, *Solar Energy* 81 (2007) 829-837.
- [20] Z.X. Gong and A.S. Mujumdar, Cyclic heat transfer in a novel storage unit of multiple phase change materials, *Applied Thermal Engineering* 16 (1996) 807-815.
- [21] L. Yang, X. Zhang and G. Xu, Thermal performance of a solar storage packed bed using spherical capsules filled with PCM having different melting points, *Energy and Buildings* 68 (2014) 639-646.
- [22] S.M. Aceves, H. Nakamura, G.M. Reistad and J. Martinez-Frias, Optimization of a class of latent thermal energy storage systems with multiple phase-change materials, *Transactions of the ASME. Journal of Solar Energy Engineering* 120 (1998) 14-19.
- [23] M. Rady, Thermal performance of packed bed thermal energy storage units using multiple granular phase change composites, *Applied Energy* 86 (2009) 2704-2720.
- [24] J.F. Wang, Y.X. Ouyang and G.M. Chen, Experimental study on charging processes of a cylindrical heat storage capsule employing multiple-phase-change materials, *International Journal of Energy Research* 25 (2001) 439-447.
- [25] F.P. Incropera, D.P. Dewitt, T.L. Bergman and A.S. Lavine, Fundamentals of heat and mass transfer, Sixth edition, Wiley, New York 1996.

Chapitre IV

Effet des propriétés thermo-physiques des PCMs sur les performances de stockage

Introduction.....	90
IV.1. Description de l'unité considérée.....	91
IV.1.1. Modèle physique pour l'unité de stockage.....	91
IV.1.2. Propriétés thermo-physiques du HTF et de PCMs.....	91
IV.2. Résultats et discussion.....	92
IV.2.1. Effet de la température de fusion de chaque PCM.....	92
IV.2.2. Effet de la conductivité thermique.....	94
IV.2.3. Effet de la chaleur spécifique.....	95
IV.2.4. Effet de l'enthalpie de changement de phase.....	97
IV.3. Synthèse du chapitre IV.....	99

Chapitre IV**Effet des propriétés thermo-physiques des PCMs sur les performances de stockage****Introduction**

Le comportement thermique d'une unité de stockage latente remplie avec un et deux types de PCMs a été étudié numériquement dans le chapitre II et III. L'effet des différents paramètres physiques du fluide caloporteur sur le processus de charge et de décharge, et sur la variation des autres paramètres ont été étudiés et présentés graphiquement. Cependant, les propriétés thermo-physiques des PCMs ont été imposées comme des paramètres indépendantes, sauf la température de fusion qui a été choisie selon la gamme de température de fonctionnement du système considéré.

L'objectif principal de ce chapitre est d'exposer encore une fois la démarche de simulation numérique que nous avons adoptée au chapitre II et III, afin d'analyser l'effet des propriétés thermo-physiques de trois type de PCM (température de fusion, conductivité thermique, chaleur spécifique et chaleur latente) sur les performances de stockage thermique. Les performances sont comparées en termes de la quantité d'énergie stockée dans le PCM considéré, avec le temps nécessaire pour compléter le processus de charge. Pour cela, l'ensemble des simulations sera effectué selon les cas tests suivantes:

- i. *Premier cas test:* Les propriétés thermo-physiques des trois PCMs sont similaires à celui de PCM1, sauf leurs valeurs de températures de fusion;
- ii. *Deuxième cas test:* Les propriétés thermo-physiques des trois PCMs sont similaires à celui de PCM1, sauf leurs valeurs de conductivités thermique;
- iii. *Troisième cas test:* Les propriétés thermo-physiques des trois PCMs sont similaires à celui de PCM1, sauf leurs valeurs de chaleurs spécifique;
- iv. *Quatrième cas test:* Les propriétés thermo-physiques des trois PCMs sont similaires à celui de PCM1, sauf leurs valeurs d'enthalpie de changement de phase.

IV.1. Description de l'unité considérée

IV.1.1. Modèle physique pour l'unité de stockage

Une unité de stockage thermique par chaleur latente constitué de deux tubes concentriques est étudiée, **figure IV.1a**. Cette unité est similaire à celui présenté en chapitre III. Cependant, l'espace annulaire de l'unité est remplie avec trois types de paraffine, nommée PCM1, PCM2 et PCM3 avec différentes températures de fusion 338 K, 323 K et 308 K, respectivement. Le modèle physique bidimensionnel associé à cette configuration est présenté sur la **figure IV.1b**.

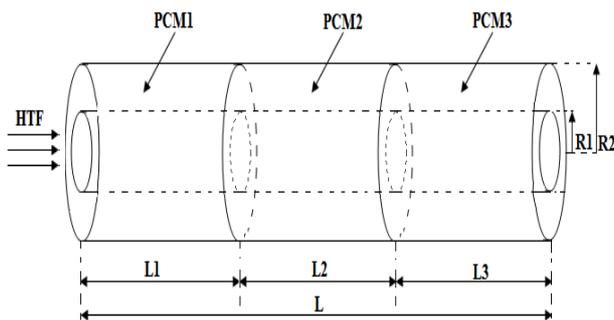


Figure IV.1a. Schéma de l'unité de stockage remplie avec trois types de paraffine.

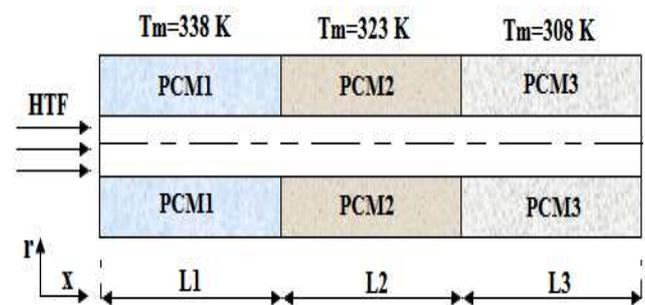


Figure IV.1b. Modèle physique de l'unité de stockage.

IV.1.2. Propriétés thermo-physiques du HTF et de PCMs

Le fluide caloporteur, eau saturé, circule en régime laminaire à l'intérieur de l'unité de stockage. Durant la charge, l'eau chaude passe à l'intérieur du tube interne où les températures de fusion des trois PCMs diminuent. Trois températures de charge, qui représentent trois hautes intensités de radiations solaires, ont été étudiées ($T=343$ K, $T=348$ K et $T=358$ K). La vitesse d'entrée du fluide caloporteur est supposée constante ($U=0.05$ m/s).

Les trois types de matériaux de stockage mis en œuvre dans cette étude sont de type paraffine, ils sont caractérisés par différentes propriétés thermo-physiques. Pendant la charge, les trois PCMs sont en état solide, leur température initiale est 15 K au-dessous de la température de fusion de PCM3. Les propriétés thermo-physiques de PCM1, PCM2, PCM3 et HTF sont représentées dans le **tableau IV.1** et **tableau IV.2**, respectivement.

Tableau IV.1. Propriétés thermo-physiques de PCM1, PCM2 et PCM3.

	PCM1	PCM2	PCM3
Température de fusion (K)	338	323	308
Chaleur latente ($kJ\ kg^{-1}$)	$2.55 \cdot 10^2$	$2.75 \cdot 10^2$	$2.95 \cdot 10^2$
Conductivité thermique ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)	0.2	0.8	1.8
Chaleur spécifique ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$)	2000	2100	2200
Masse volumique ($kg\ m^{-3}$)	800	800	800
Viscosité dynamique ($kg\ m^{-1}\ s^{-1}$)	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$

Tableau IV.2. Propriétés thermo-physiques du fluide caloporteur.

Processus de charge	T=343 K	T=348 K	T=358 K
Masse volumique ($kg\ m^{-3}$)	976	973	967
Conductivité thermique ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)	0.668	0.668	0.674
Chaleur spécifique ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$)	4191	4195	4203
Viscosité dynamique ($Kg\ m^{-1}\ s^{-1}$)	389.10^{-6}	365.10^{-6}	324.10^{-6}

IV.2. Résultats et discussion

Dans cette partie, afin d'analyser l'effet des propriétés thermo-physiques de chaque PCM sur la quantité d'énergie stockée, nous analysons les profils de l'énergie totale stockée, on intéressant en particulier à la quantité d'énergie que peut stockée chaque PCM avec le temps nécessaire pour compléter le processus de charge. Pour cela, les calculs d'estimation de l'évolution de l'énergie totale stockée ont été effectués pour une durée de stockage estimé à une heure (3600 s), avec trois valeurs différentes de températures d'entrée du fluide HTF, soit 334 k, 348 K et 358 K.

IV.2.1. Effet de la température de fusion de chaque PCM

La **figure IV.2 (a-b-c)** représente la variation de l'énergie stockée dans chaque PCM. Une comparaison montre la quantité d'énergie stockée avec le temps nécessaire pour compléter le processus de charge pour chaque PCM est présenté sur la **figure IV.3**. Pour une température du fluide HTF donnée, les résultats montrent que l'énergie totale stockée augmente rapidement dans le PCM qui à une basse température de fusion (PCM3) jusqu'à atteint une valeur maximale à la fin du processus. Cependant, pour le PCM qui a une haute température de fusion, l'augmentation est relativement faible. A la fin du processus, la quantité d'énergie stockée est la même pour les trois PCM, malgré la différence de température de fusion. Il faut cependant noter que, la température d'entrée du fluide HTF influe sur la quantité d'énergie stockée, elle est de 344500 J/kg, 354500 J/kg et 374570 J/kg pour des températures 343 K, 348 K et 358 K, respectivement. Comme conclusion, la température de fusion n'influe pas la quantité d'énergie stockée. Sauf sur le temps nécessaire pour compléter le processus de charge dans chaque PCM. Cependant, la température de fusion c'est le paramètre important qui définit la gamme de fonctionnement du système étudié.

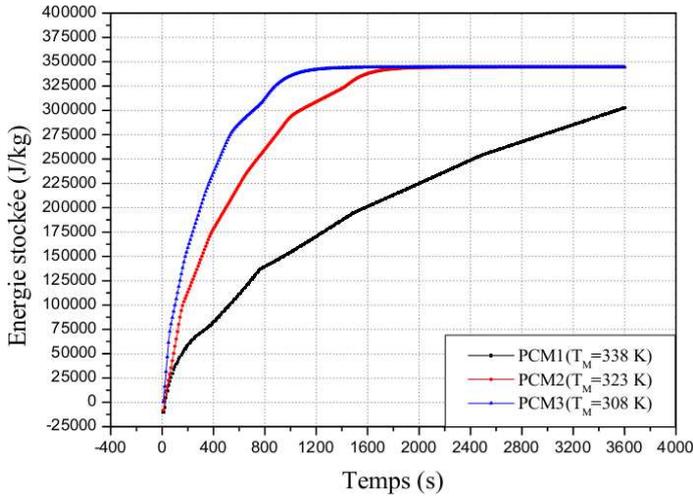


Figure IV.2a. Effet de la température de fusion sur la variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=343$ K).

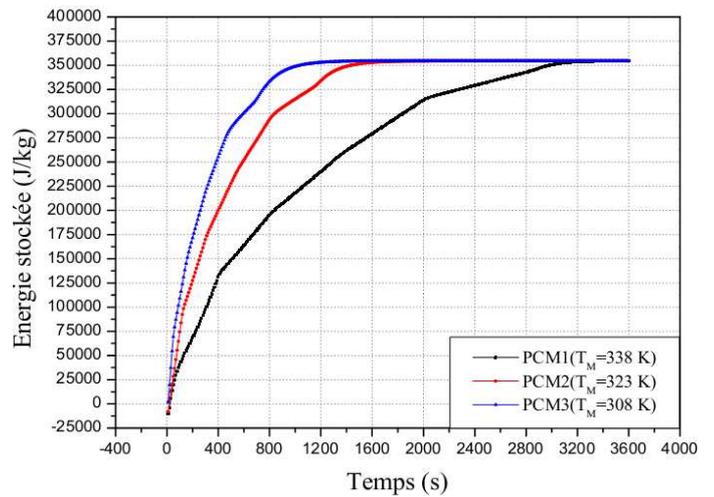


Figure IV.2b. Effet de la température de fusion sur la variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=348$ K).

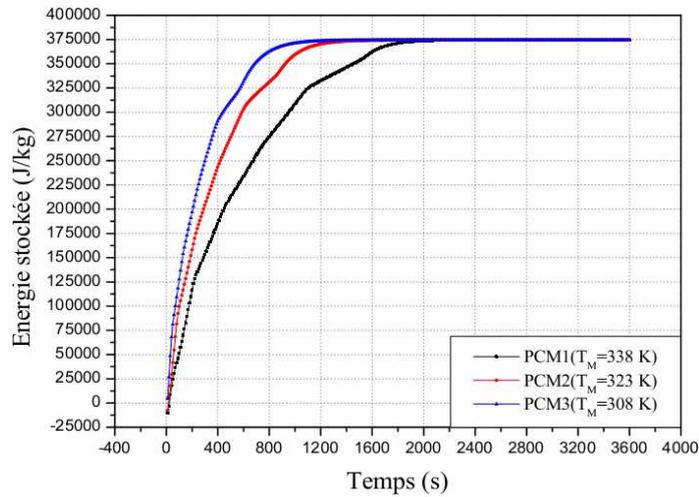


Figure IV.2c. Effet de la température de fusion sur la variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=358$ K).

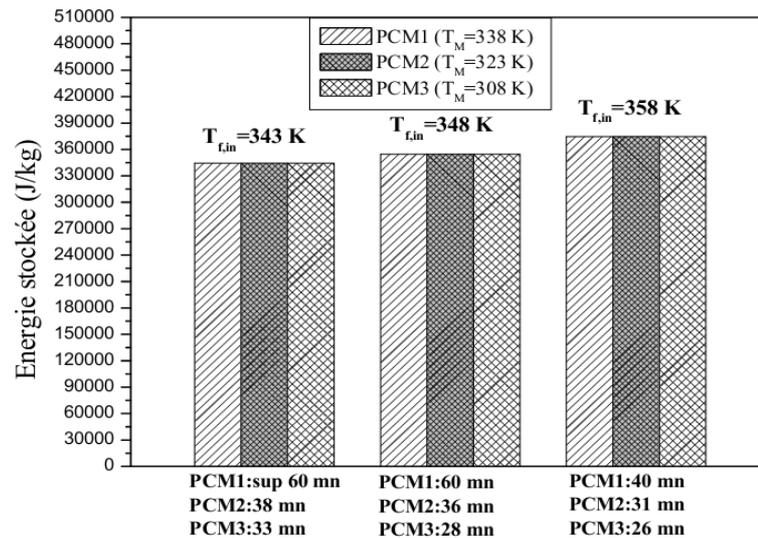


Figure IV.3. Influence de la température de fusion sur l'énergie stockée dans chaque PCM et sur le temps de stockage estimé.

IV.2.2. Effet de la conductivité thermique

Pour montrer l'influence de la conductivité thermique, les calculs d'estimation de la variation de l'énergie stockée et le temps nécessaire pour terminer la charge pour chaque PCM ont été analysés et présentés sur la **figure IV.4 (a-b-c)** et la **figure IV.5**. Pour une température donnée, l'énergie totale stockée augmente rapidement dans le PCM avec haute conductivité thermique (PCM3). Cependant, l'augmentation est relativement long quant la conductivité thermique est faible. Par conséquent, une faible conductivité thermique est responsable de la lenteur des transferts de chaleur au sein de PCM. Ainsi, pour une température du fluide HTF 348 K, quand la conductivité thermique augmente de 0.8 W/m.K jusqu'à 1.8 W/m.K, le temps de charge diminue de 10 mn à 4.3 mn, ce qui réduit le temps de charge à 43 %. À la fin du processus, la quantité d'énergie stockée est la même pour les trois PCMs.

Comme conclusion, la conductivité thermique influe fortement sur le temps nécessaire pour compléter le processus de charge et pas sur la quantité d'énergie stockée.

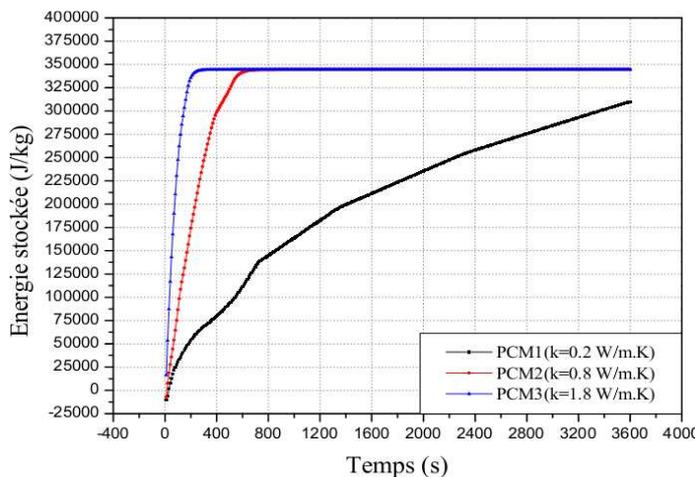


Figure IV.4a. Effet de la conductivité thermique sur la variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=343$ K).

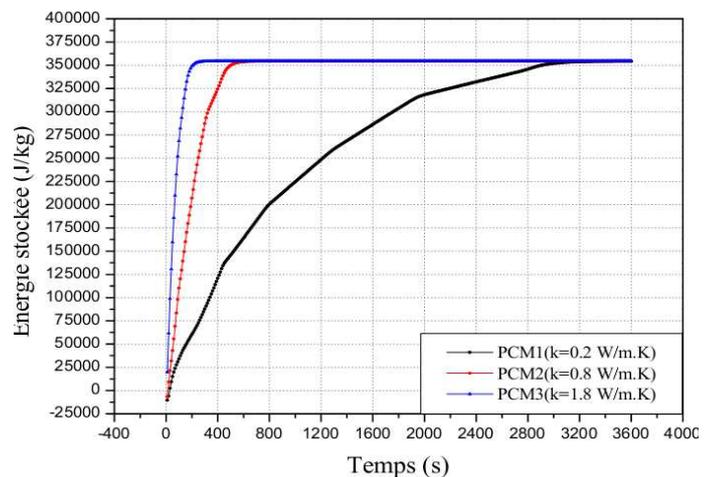


Figure IV.4b. Effet de la conductivité thermique sur la variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=348$ K).

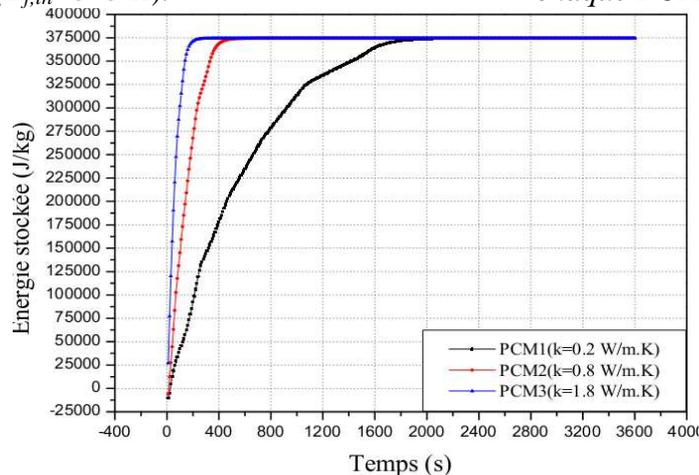


Figure IV.4c. Effet de la conductivité thermique sur la variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=358$ K).

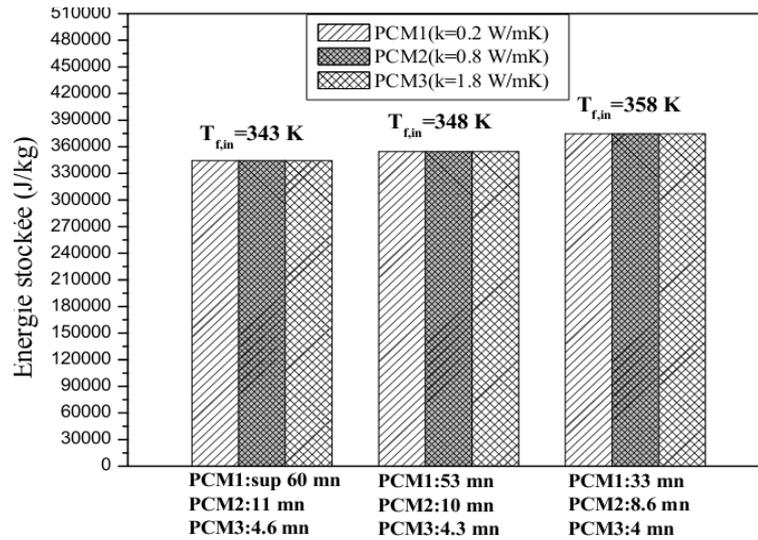


Figure IV.5. Influence de la conductivité thermique sur l'énergie stockée dans chaque PCM et sur le temps de stockage estimé.

IV.2.3. Effet de la chaleur spécifique

Nous présentons sur la **figure IV.6 (a-b-c)** l'effet de la chaleur spécifique sur la variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM. Ainsi, une comparaison donnant la quantité d'énergie stockée pour chaque température du fluide HTF, **figure IV.7**. En effet, la chaleur spécifique intervient dans la 1^{ère} et la 3^{ème} période de stockage sensible. Son augmentation permet d'avoir un taux de stockage relativement important. Par conséquent, une quantité de chaleur sensible supplémentaire sera alors stockée. Les résultats montrent que, pour une température du fluide HTF donnée, l'énergie stockée est importante dans le PCM avec grande chaleur spécifique. Ainsi, l'énergie totale stockée atteint une valeur maximale à la fin du processus et égal à 340000 J/kg dans PCM1, 349000 J/kg dans PCM2 et 353500 J/kg dans PCM3, pour température d'entrée 343 K. Par contre, pour une température d'entrée 358 K, l'énergie stockée est 374560 J/kg dans PCM1, 380550 J/kg dans PCM2 et 386530 J/kg dans PCM3. Concentrons sur le temps de charge, pour une température du fluide HTF 348 K, quand la chaleur spécifique augmente de 2000 J/kg K jusqu'à 2100 J/kg K, le temps de charge diminue de 53 mn à 26 mn, ce qui réduit le temps de charge à 49 %.

Comme conclusion, pour une température du fluide caloporteur donnée, la chaleur spécifique influe sur la quantité d'énergie stockée ainsi que sur le temps pour compléter le processus de charge.

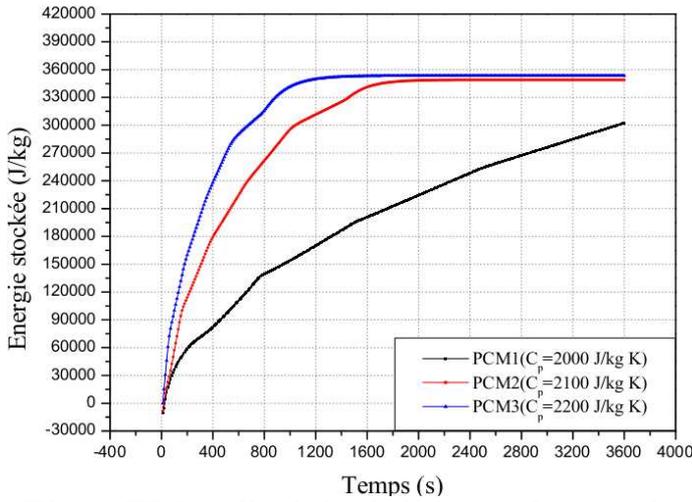


Figure IV.6a. Effet de la chaleur spécifique sur la variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=343\text{ K}$).

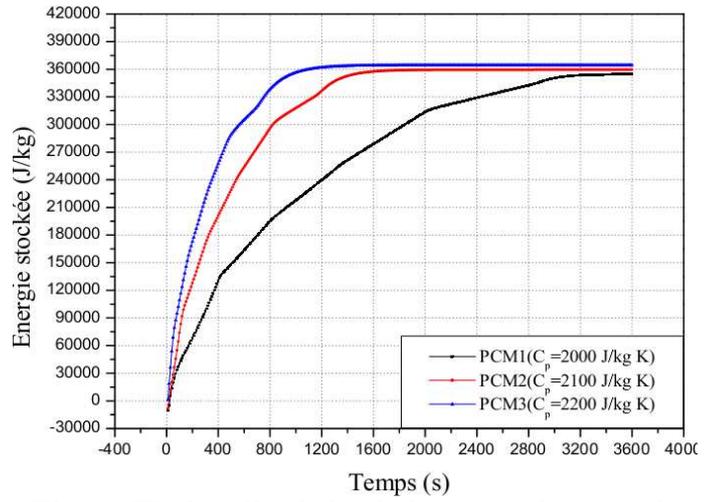


Figure IV.6b. Effet de la chaleur spécifique sur la variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=348\text{ K}$).

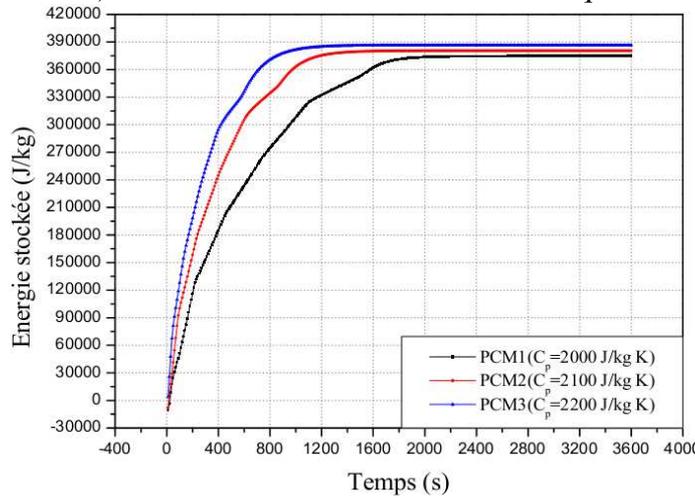


Figure IV.6c. Effet de la chaleur spécifique sur la variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=358\text{ K}$).

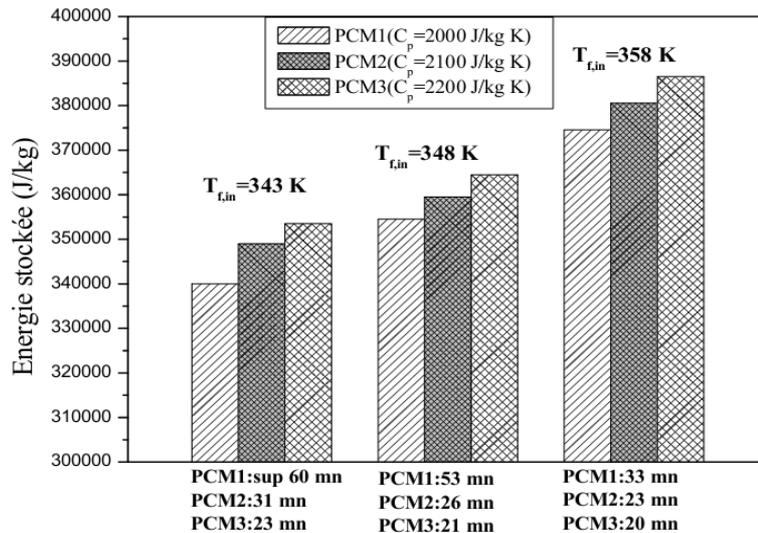


Figure IV.7. Influence de la chaleur spécifique sur l'énergie stockée dans chaque PCM et sur le temps de stockage estimé.

IV.2.4. Effet de l'enthalpie de changement de phase

La **figure IV.8 (a-b-c)** représente l'effet de l'enthalpie de changement de phase sur la variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM. Ainsi, une comparaison donnant la quantité d'énergie stockée avec le temps nécessaire pour compléter la charge pour chaque température du fluide HTF, **figure IV.9**. En effet, l'enthalpie de changement de phase intervient dans la 2^{ème} période de stockage latent, lorsque la température de PCM atteint sa température de fusion. Son augmentation permet d'avoir un taux de stockage important. Par conséquent, une quantité de chaleur latente supplémentaire sera aussi stockée. Les résultats montrent que, pour une température du fluide HTF donnée, l'énergie stockée est importante dans le PCM avec grande enthalpie de changement de phase. Ainsi, l'énergie totale stockée atteint une valeur maximale à la fin du processus et égal à 340000 J/kg dans PCM1, 364550 J/kg dans PCM2 et 384560 J/kg dans PCM3, pour température d'entrée 343 K. Par contre, pour une température d'entrée 358 K, l'énergie stockée est 374560 J/kg dans PCM1, 394560 J/kg dans PCM2 et 414560 J/kg dans PCM3. Concentrons sur le temps de charge, pour une température du fluide HTF 358 K, quand l'enthalpie de changement de phase augmente de 255 kJ/kg jusqu'à 295 kJ/kg, le temps de charge diminue de 33 mn à 20 mn, ce qui réduit le temps de charge à 60 %.

Comme conclusion, pour une température du fluide caloporteur donnée, l'enthalpie de changement de phase influe sur la quantité d'énergie stockée ainsi que sur le temps pour compléter le processus de charge.

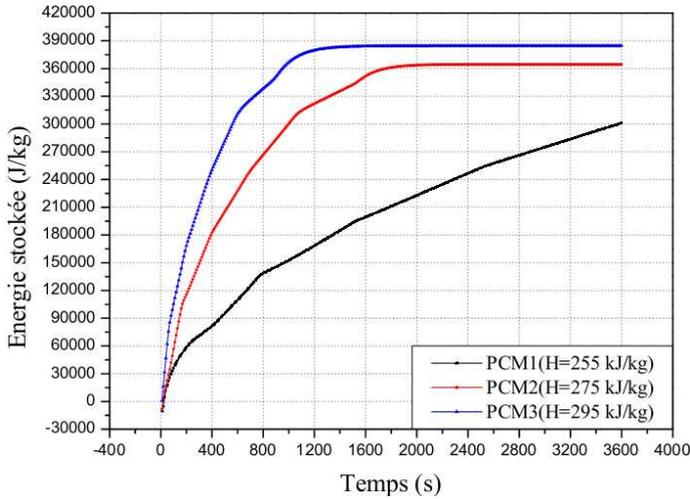


Figure IV.8a. Effet de l'enthalpie sur la variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=343\text{ K}$).

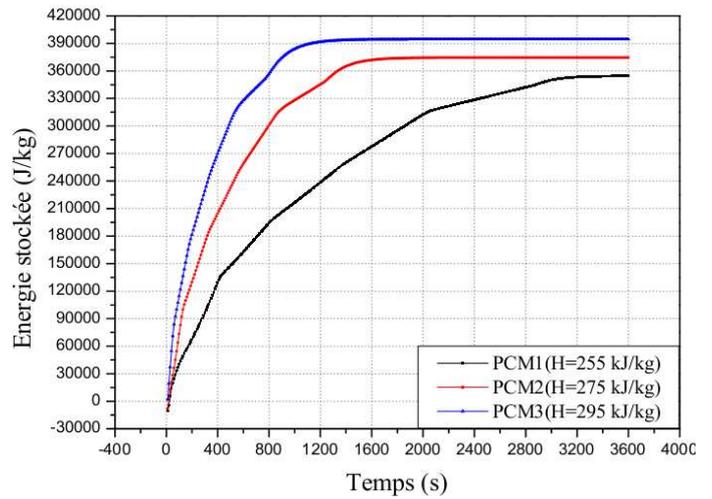


Figure IV.8b. Effet de l'enthalpie sur la variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=348\text{ K}$).

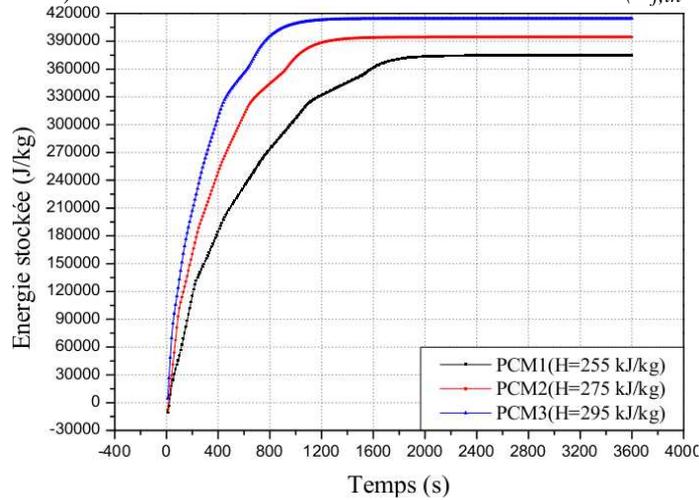


Figure IV.8c. Effet de l'enthalpie sur la variation de l'énergie totale stockée dans chaque PCM ($T_{f,in}=358\text{ K}$).

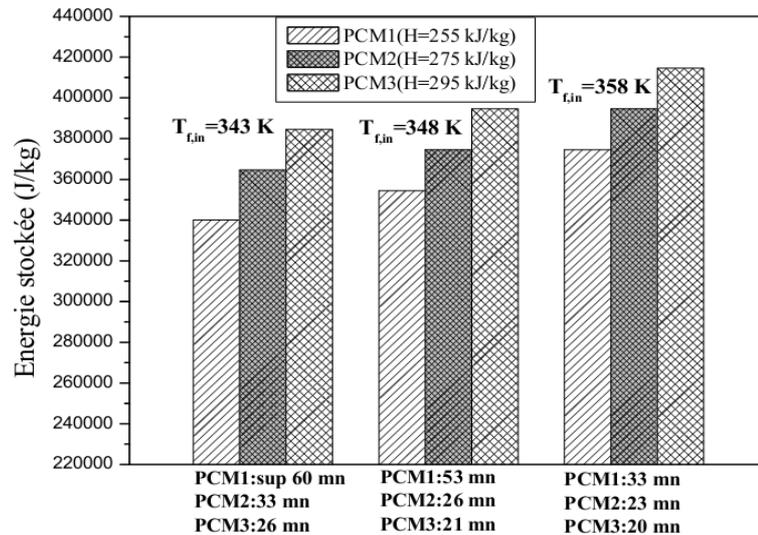


Figure IV.9. Influence de l'enthalpie de changement de phase sur l'énergie stockée dans chaque PCM et sur le temps de stockage estimé.

IV.3. Synthèse du chapitre IV

Dans l'étude qui a été faite au quatrième chapitre, nous nous sommes intéressés à analyser l'effet des propriétés thermo-physiques des PCMs (température de fusion, conductivité thermique, chaleur spécifique et chaleur latente) sur les performances de stockage thermique. Pour cela, une unité de stockage thermique remplie avec trois types de paraffine, placés en cascade est étudié. Les performances thermiques sont comparées en termes de la quantité d'énergie stockée dans chaque PCM, avec le temps nécessaire pour compléter le processus de charge. Les conclusions suivantes ont été établies:

- a) La variation de l'énergie totale stockée augmente rapidement dans le PCM qui à une basse température de fusion. Cependant, pour le PCM qui a une haute température de fusion, l'augmentation est relativement faible;
- b) Une faible conductivité thermique est responsable de la lenteur des transferts de chaleur au sein de PCM, ce qui provoque un temps de charge relativement long;
- c) La température de fusion et la conductivité thermique n'influe pas la quantité d'énergie stockée. Sauf sur le temps nécessaire pour compléter le processus de charge. Par conséquent, la température de fusion présente un paramètre important afin de choisir la gamme de fonctionnement du système considéré;
- d) L'augmentation de la chaleur spécifique permet d'avoir un taux de stockage relativement important. Donc, une quantité de chaleur sensible supplémentaire sera alors stockée. Par conséquent, l'énergie stockée est importante dans le PCM avec grande chaleur spécifique;
- e) L'augmentation de l'enthalpie de changement de phase permet d'augmenter le taux de stockage thermique. Donc, une quantité de chaleur latente supplémentaire sera alors stockée. Par conséquent, l'énergie stockée est importante dans le PCM avec grande enthalpie de changement de phase;
- f) Loin des propriétés thermo-physiques, la capacité de stockage thermique est importante quand la différence de température entre le fluide caloporteur et la température de fusion de chaque PCM est grande. Cependant, le délai de stockage sera relativement petit.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Les travaux menés dans cette thèse concernent principalement la compréhension et l'analyse du comportement thermique associé au phénomène de stockage/déstockage de l'énergie thermique par chaleur latente, dans un élément de stockage constitué de deux tubes concentriques. Ce travail a pour but d'apporter des connaissances supplémentaires et nécessaires pour le développement de la technologie de stockage thermique par chaleur latente. Pour cela, l'effet des différents paramètres physiques du fluide caloporteur et thermo-physiques du matériau à changement de phase sur le processus de charge et de décharge est étudié.

Dans un premier temps, les généralités et l'étude bibliographique menées au cours du premier chapitre a montré l'intérêt d'utiliser les systèmes de stockages latents, afin d'exploiter la chaleur de changement de phase des PCMs. Pour cela, le stockage latent est le procédé de stockage thermique le plus mature technologiquement, celui-ci offre plusieurs avantages par rapport aux autres systèmes de stockage thermique tel que: la densité énergétique élevée des PCMs, leur grande capacité de stockage, aussi il est efficace pour des différences de températures faibles. Cependant, la faible conductivité thermique des PCMs présente un inconvénient majeur, et mène à développer d'autre techniques visant à améliorer le transfert thermique au sein de ces matériaux.

En second lieu, afin d'analyser le comportement thermique de ce système, une approche simpliste permet d'étudier l'échange de chaleur entre le HTF et le PCM (n-octadécane) d'un élément typique à savoir deux tubes concentriques. Le modèle mathématique et la procédure de simulation adoptés au deuxième chapitre ont été validés en comparant nos résultats avec d'autres résultats expérimentaux. Un bon accord a été trouvé entre les résultats de calculs et ceux des expériences. L'effet de la température et la vitesse d'entrée du fluide caloporteur sur la variation de la température de PCM, sa fraction liquide, le temps de fusion et de solidification, le temps de charge et de décharge et l'énergie totale stockée ont été étudiés et présentés graphiquement.

Afin d'augmenter l'échange thermique et d'améliorer le transfert de chaleur entre le HTF et le PCM, l'utilisation de multiple PCMs avec différentes propriétés thermo-physique, en instaurant un système de PCMs en cascade présente l'idée principale du troisième chapitre. En effet, deux matériaux candidats ont été mises en place dans une unité de stockage couplée avec un collecteur solaire. En régime instationnaire avec un fluide caloporteur classique, l'eau, l'installation a été mise en œuvre afin d'évaluer la technologie de chauffage solaire thermique. L'étude met en

lumière l'effet de la température et la vitesse d'entrée du fluide HTF sur le comportement thermique de cette nouvelle configuration remplie avec deux types de paraffine, ainsi que l'évolution des paramètres thermiques le long du processus de charge et de décharge, notamment la quantité d'énergie stockée dans chaque PCM.

Enfin, une unité de stockage thermique remplie avec trois types de paraffine, placés en cascade a été étudié au quatrième chapitre. Ce chapitre a pour but d'analyser l'effet des propriétés thermophysiques de trois types de PCM (température de fusion, conductivité thermique, chaleur spécifique et chaleur latente) sur les performances de stockage thermiques. Les performances sont comparées en termes de la quantité d'énergie stockée dans chaque PCM avec le temps nécessaire pour compléter le processus de charge.

Les différents résultats obtenus dans le cadre de cette étude et pour chaque cas test ont été synthétisés à la fin de chaque chapitre.

Ce travail de thèse, qui a mené à une compréhension plus précise du comportement thermique d'une unité de stockage latente remplie avec certains PCM, ouvre également de nombreuses perspectives qui paraissent intéressantes à la suite de ce travail telles que: l'amélioration des systèmes de stockage par l'optimisation des échangeurs. Plusieurs pistes sont possibles: l'impact de la forme, le nombre d'ailettes et sa façon de répartition. D'autre part, l'étude de stockage latent à haute température sera un axe de recherche très intéressant, afin d'exploiter la chaleur latente des PCMs à haute température de fusion. Cela permettra de pénétrer le domaine des centrales solaires thermodynamiques.

Case Studies in Thermal Engineering

Certificate of Publication

**Thermal behavior of latent thermal
energy storage unit using two phase
change materials: Effects of HTF
inlet temperature**

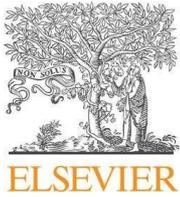
**Fouzi Benmoussa, Ahmed Benzaoui,
Hocine Benmoussa**

Volume 10, 2017, Pages 475-483



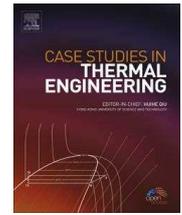
The Editors of Case Studies in Thermal Engineering
Elsevier, Amsterdam, The Netherlands





Contents lists available at ScienceDirect

Case Studies in Thermal Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/csite

Thermal behavior of latent thermal energy storage unit using two phase change materials: Effects of HTF inlet temperature

Fouzi Benmoussa^{a,*}, Ahmed Benzaoui^b, Hocine Benmoussa^a^a LESEI Laboratory, Faculty of Technology, Mechanics Department, University of Batna-2, Batna, Algeria^b Faculty of Physics, University of Sciences and Technology Houari Boumedienne, Algiers, Algeria

ARTICLE INFO

Keywords:

Thermal energy storage
Phase change materials
Heat transfer fluid
Charging process
Melting time

ABSTRACT

This work presents a numerical study of the thermal behavior of shell-and-tube latent thermal energy storage (LTES) unit using two phase change materials (PCMs). The heat transfer fluid (HTF) flow through the inner tube and transfer the heat to PCMs. First, a mathematical model is developed based on the enthalpy formulation and solved through the governing equations. Second, the effects of HTF inlet temperature on the unsteady temperature evolution of PCMs, the total energy stored evolution as well as the total melting time is studied. Numerical results show that for all HTF inlet temperature, melting rate of PCM1 is the fastest and that of PCM2 is the slowest; increasing the HTF inlet temperature considerably increases the temperature evolution of PCMs. The maximum energy stored is observed in PCM2 with high melting temperature and high specific heat; heat storage capacity is large for high HTF inlet temperature. When the HTF inlet temperature increases from 338 K to 353 K, decreasing degree of melting time of PCM2 is the biggest from 1870 s to 490 s, which reduces about 73.8%; decreasing degree of melting time of PCM1 is the smallest from 530 s to 270 s, which reduces about 49.1%.

1. Introduction

The shell-and-tube latent thermal energy storage (LTES) using phase change materials (PCMs) has attracted a large number of applications in recent years, such as solar energy due to its advantages of high energy storage density and its isothermal operating characteristics during charging and discharging processes. In a latent heat storage system, thermal energy is stored during melting while it is recovered during solidification of PCMs. The development of LTES involves the understanding of heat transfer in PCMs when they undergo solid-to-liquid phase transition in the required operating conditions.

A number of studies have been performed to examine the overall thermal behaviors of the LTES unit with single PCM. Trp et al. [1,2] established a mathematical model in order to analyze the transient heat transfer phenomena of melting and solidification of paraffin wax in a cylindrical shell. They concluded that the operating conditions and geometric parameters should be chosen carefully to optimize the thermal performance of the storage unit. Tao et al. [3] investigated the performance of high temperature molten salt LTES under variable conditions, the effects of heat transfer fluid (HTF) inlet temperature, velocity and tube geometric parameters. The results show that within the studied parameters, the HTF inlet temperature has the largest effect on heat storage rate. Kibria et al. [4] numerically and experimentally investigated a thermal storage unit of phase change process under various flow parameters and system dimensions. The thermal energy storage involves a shell-and-tube, where paraffin wax is used as PCM. Experimental setup has been designed to examine the physical validity of the numerical results. Lacroix [5] numerically studied the effects of temperature

* Corresponding author.

E-mail addresses: benmoussa_fouzi@yahoo.fr (F. Benmoussa), a1benzaoui@yahoo.fr (A. Benzaoui), hocine_b@hotmail.com (H. Benmoussa).<http://dx.doi.org/10.1016/j.csite.2017.10.010>

Received 26 August 2017; Received in revised form 9 October 2017; Accepted 16 October 2017

Available online 18 October 2017

2214-157X/ © 2017 Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Nomenclature		Greek symbols	
C_p	Specific heat, (J/kg K)	μ	Dynamic viscosity, (kg/m s)
E	Total energy stored, (J)	ρ	Density, (kg/m ³)
f	PCM melting fraction	ΔH	Latent heat of fusion, (kJ/kg)
h	Convective heat transfer coefficient, (W/m ² K)	θ	Relative temperature, (K)
k	Thermal conductivity, (W/m K)		
L	Length of the tube, (m)	<i>Abbreviations</i>	
m	Mass of the PCMs, (kg)	<i>CFD</i>	Computational fluid dynamics
R_i	Inner tube radius, (m)	<i>FVM</i>	Finite volume method
R_o	Outer tube radius, (m)	<i>HTF</i>	Heat transfer fluid
r	Radial coordinate, (m)	<i>LTES</i>	Latent thermal energy storage
T	Temperature, (K)	<i>PCMs</i>	Phase change materials
$T1, T2$	Representative locations inside PCM1 and PCM2, respectively		
T_M	Melting temperature, (K)	<i>Subscripts</i>	
$T_{f,in}$	HTF inlet temperature, (K)	f	Heat transfer fluid
T_{pcm}	Temperature of PCM, (K)	pcm	Phase change material
t	Time, (s)	M	Melting temperature
U	Velocity, (m/s)	in	Inlet boundary
x	Axial coordinate, (m)	ini	Initial condition

difference between HTF inlet temperature and melting point of PCM, HTF inlet mass flow rate on heat charging and heat discharging performance. The layout of the phase change storage unit considered consists of a shell-and-tube type. The annulus space is filled with PCM (n-octadecane).

However, the low thermal conductivity of most PCM ranging from 0.1 to 0.6 W m⁻¹ K⁻¹ limits heat transfer rates during both charging and discharging processes. In order to enhance the heat transfer exchange during such processes, multiple PCMs with different melting temperatures were employed. Akgun et al. [6,7] analyzed the LTES system of the shell-and-tube type with three kinds of paraffin as PCMs. A novel tube-in-shell storage geometry was introduced and the effects of the Reynolds number on the melting and solidification behaviors were examined. Ait Adine and El Qarnia [8] performed numerical studies of LTES unit consisting of a shell-and-tube type. The storage unit consists of an inner tube, outer tube and an annulus space filled with two PCMs, P116 and n-octadecane. In order to compare the thermal performances of the unit using two PCMs and single PCM, a mathematical model was developed and validated with experimental data. Farid and Kanzawa [9] numerically and experimentally studied the thermal characteristic of the LTES unit using different PCMs of different melting temperatures, with air as HTF. Results showed that, compared to the LTES using single PCM, some improvement in the thermal performance of the unit may be achieved. El Qarnia [10] developed a theoretical and numerical analysis to predict the thermal performance of a coupled solar collector LTES unit using multiple PCMs. The effects of the HTF flow rate on its outlet temperature are determined. Results showed that, the selection of PCMs should be done carefully in order to produce hot water in acceptable range of temperature. Li et al. [11] developed a mathematical model of a shell-and-tube LTES unit of three kinds of PCMs, having different high melting temperature for solar thermal power, air is used as HTF. Instantaneous solid-liquid interface positions, liquid fractions and melting times of each PCM have been obtained by a series of numerical calculations and represented graphically. Fang and Chen [12] presented a theoretical model for the performance of a shell-and-tube LTES unit using multiple PCMs. Numerical simulations are carried out to investigate the effects of different multiple PCMs on the melted fraction, stored thermal energy and fluid outlet temperature of the LTES unit.

The search in the literature shows that the numerical analysis reported by Ait Adine and El Qarnia [8] is the most related investigation to the present work. However, the effects of the HTF inlet temperatures on the thermal behavior of the LTES unit and on the variation of different parameters have not been analyzed. In the present study, in order to study the transient thermal behavior of the LTES unit under different HTF inlet temperature, a physical and mathematical model was established for the shell-and-tube LTES unit with two kinds of PCMs named PCM1 and PCM2 having different melting temperature. The simulation for the LTES process was based on the enthalpy method which takes into account phase change phenomenon. Numerical simulations are carried out to investigate the effects of HTF inlet temperature on the unsteady temperature evolution of PCM1 and PCM2; the total energy stored evolution in different zone of PCMs as well as the total melting time of each PCM.

2. Physical model and governing equations

2.1. Physical model

The shell-and-tube PCMs storage unit considered in the present study is shown in Fig. 1a, which is similar to the model used by Ait Adine and El Qarnia [8]. It consists of an inner tube, an outer tube and an annulus filled with two PCMs named PCM1 and PCM2, having different melting temperatures (323 K and 333 K, respectively). HTF (water) flows through the inner tube and exchanges heat

with PCMs. During charging process, hot water circulates in the direction of the melting temperature increase. The thermo-physical properties of the HTF and PCMs are listed in Table 1. The two-dimension physical model to be analyzed is represented by a geometry shown in Fig. 1b. The dimensions of the unit are: $L_1 = 0.47$ m, $L_2 = 0.53$ m, $R_i = 0.635$ cm and $R_o = 1.135$ cm. Initially each PCM are in solid phase; its temperatures are set to 303 K. Analysis has been performed for three different HTF inlet temperatures above the melting point of PCM2 (338 K, 343 K and 353 K). The HTF inlet velocity was maintained constant during the numerical tests to a value of 0.03 m/s.

2.2. Assumptions

In order to simplify the physical and mathematical model, the following assumptions are adopted.

- The HTF is incompressible and can be considered as a Newtonian fluid.
- The HTF flow is laminar, HTF inlet temperature and inlet velocity are both constant.
- The thermo-physical properties of the HTF and PCMs are independent of temperature.
- Initial temperature of the unit is uniform, the PCMs are in solid phase.
- The outer surface of the shell side is treated as an adiabatic boundary.
- The problem is axisymmetric.

2.3. Governing equations

Based on the above assumptions, the LTES melting process in the shell-and-tube unit can be treated as an axisymmetric model. The enthalpy method is used to deal with the moving boundary problem in PCMs melting process. The energy equations for the HTF and PCMs are shown as follows:

- For the HTF region

$$(\rho C_p)_f \left(\frac{\partial T_f(x, r, t)}{\partial t} + U_f(r) \frac{\partial T_f(x, r, t)}{\partial x} \right) = k_f \left(\frac{\partial^2 T_f(x, r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_f(x, r, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_f(x, r, t)}{\partial x^2} \right) \tag{1}$$

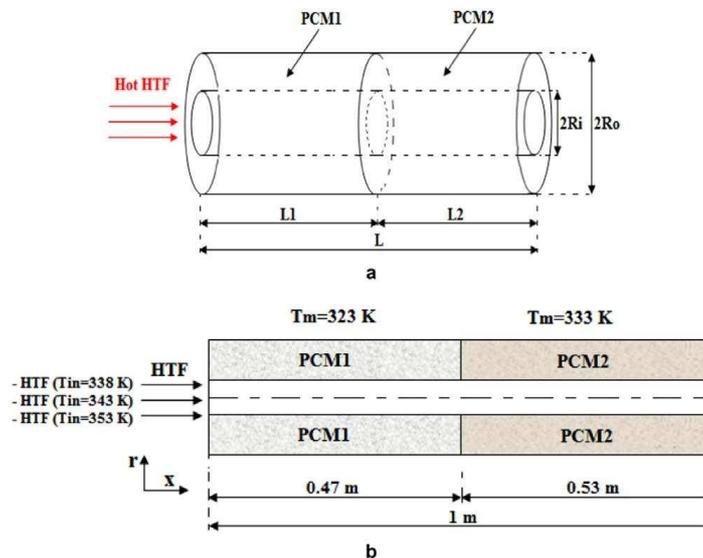


Fig. 1. a. Schematic representation of the LTES unit with two PCMs. b. Physical model for numerical calculations.

Table 1

Thermo-physical properties of the HTF and PCMs: Watanabe et al. [13], Yang et al. [14] and Incropera et al. [15].

	HTF (T = 343 K)	PCM 1	PCM 2
Fusion temperature, T_M (K)	/	323	333
Density, ρ (kg/m ³)	976	848	861
Thermal conductivity, k (W/m K)	0.668	0.4	0.4
Specific heat, C_p (J/kg K)	4191	1650	1850
Latent heat of fusion, ΔH (kJ/kg)	$3.34 \cdot 10^2$	$2.00 \cdot 10^2$	$2.09 \cdot 10^2$
Dynamic viscosity, μ (kg/m s)	$389 \cdot 10^{-6}$	$5.6 \cdot 10^{-3}$	$6.3 \cdot 10^{-3}$

$$x > 0, \quad 0 < r < R_i, \quad t > 0$$

where ρ is the density of fluid, C_p the specific heat, U the fluid velocity and k the thermal conductivity

• For the PCMs region

$$(\rho C_p)_{pcm} \frac{\partial \theta_{pcm}(x, r, t)}{\partial t} = k_{pcm} \left[\frac{\partial^2 \theta_{pcm}(x, r, t)}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta_{pcm}(x, r, t)}{\partial r} \right) \right] - \rho_{pcm} \Delta H \frac{\partial f}{\partial t} \tag{2}$$

$$x > 0, \quad R_i < r < R_o, \quad t > 0$$

where:

$$\theta_{pcm} = (T - T_M), \quad T_M = \begin{cases} T_{M1} & 0 \leq x \leq L_1 \\ T_{M2} & L_1 \leq x \leq L_2 \end{cases} \tag{3}$$

f is the PCMs melting fraction. The melting fraction during charging process is determined as:

$$\left. \begin{cases} f = 0, & \theta < 0 & \text{Solid} \\ 0 < f < 1, & \theta = 0 & \text{Solid + Liquid} \\ f = 1, & \theta > 0 & \text{Liquid} \end{cases} \right\} \tag{4}$$

The Eq. (2) is formulated by using the enthalpy method (Voller [16]), in which the total enthalpy is split into sensible heat and latent heat:

$$H(T) = h(T) + \rho f \Delta H \tag{5}$$

where:

$$h(T) = \int_{T_M}^T \rho C_p dT \tag{6}$$

2.4. Initial and boundary conditions

• Initial conditions For the HTF region:

$$\begin{cases} T_f(x, 0 < r < R_i, t = 0) = T_{f,ini} \\ U_f(x, 0 < r < R_i, t = 0) = U_{f,ini} \end{cases} \tag{7a}$$

For the PCMs region:

$$T_{PCM1} = T_{PCM2}(x, R_i \leq r \leq R_o, t = 0) = 303 \text{ K} \tag{7b}$$

• Boundary conditions

For the HTF region:

$$\begin{cases} T_f(0, 0 \leq r \leq R_i, t) = T_{f,in} \\ U_f(0, 0 \leq r \leq R_i, t) = 0.03 \text{ m/s} \end{cases} \tag{8a}$$

$$\left. \frac{\partial U_f(x, r, t)}{\partial r} \right|_{r=0} = \left. \frac{\partial T_f(x, r, t)}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad x > 0, \quad t > 0 \tag{8b}$$

For the PCMs region:

$$\left. \frac{\partial \theta_{pcm}(x, r, t)}{\partial r} \right|_{r=R_o} = 0 \quad x > 0, \quad t > 0 \tag{8c}$$

$$\left. \frac{\partial \theta_{pcm1}(x, r, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial \theta_{pcm2}(x, r, t)}{\partial x} \right|_{x=L} = 0 \quad R_i < r < R_o, \quad t > 0 \tag{8d}$$

$$k_{pcm1} \left. \frac{\partial \theta_{pcm1}(x, r, t)}{\partial x} \right|_{x=L_1} = k_{pcm2} \left. \frac{\partial \theta_{pcm2}(x, r, t)}{\partial x} \right|_{x=L_1} \tag{8e}$$

$$\theta_{pcm1}(x = L_1, r, t)_{PCM1} = \theta_{pcm2}(x = L_1, r, t)_{PCM2} \tag{8f}$$

At the inner surface boundary:

$$h_f(\theta_f - \theta(x, r = R_i, t)) = -k_{pcmi} \frac{\partial \theta_{pcmi}(x, r, t)}{\partial r} \Big|_{r=R_i} \quad x > 0, \quad r = R_i, \quad t > 0 \tag{8g}$$

where h is local convective heat transfer coefficient ($W/m^2 K$).

The total energy stored capacity for each zone of PCM during charging process can be represented by the following expression:

$$E_{PCMi} = \int_{T_{PCMi}}^{T_{Mi}} (mC_p)_{PCMi} dT + (m\Delta H)_{PCMi} f_i + \int_{T_{PCMi}}^{T_{f.in}} (mC_p)_{PCMi} dT \tag{9}$$

$$E_{PCMi} = (mC_p)_{PCMi}(T_{Mi} - T_{PCMi}) + (m\Delta H)_{PCMi} f_i + (mC_p)_{PCMi}(T_{f.in} - T_{PCMi}) \tag{10}$$

The first term of the Eq. (10) represents the sensible heat charging period, when each PCM temperature increase from its initial temperature to the phase change. The second term represents the latent heat charging during the phase change period. The third term represents the second sensible heat charging period under a fusion form until reaching the steady state.

3. Simulation model

3.1. Numerical computations

Numerical computations are performed by adopting commercial CFD code Fluent 6.3.26, which employs the finite volume method (FVM) described by Patankar [17] and uses the enthalpy-porosity technique for modeling the melting process. The energy equations were discretized with the first order upwind scheme. The time integration has been performed fully implicitly and control volumes of a uniform size and constant time steps were used. An enthalpy-porosity technique is used for modeling the melting process. In this technique, the liquid melt fraction in each cell is computed every iteration, based on enthalpy balance. The mushy zone is the region where the porosity increases from 0 to 1 as the PCM melts. When the region is complete solid, the porosity is zero. Details on the computational fluid dynamics application in the latent heat thermal energy storage can be found in Al-Abidi et al. [18].

3.2. Selection of grid size

In order to validate the solution independency of the computational grid size, six different grid sizes for the same working conditions are tested: (100 × 20), (100 × 30), (100 × 40), (300 × 20), (300 × 30) and (300 × 40). Fig. 2 shows the different computation grids used in the preliminary calculations. In charging process, the results of the temperature variation of PCM ($T_M = 300.7 K$) respecting to time using the six different grid sizes are shown in Fig. 3a. As shown in the figure, the grid sizes of (300 × 20), (300 × 30) and (300 × 40) are not suitable. The relative solution deviations with grid sizes of (100 × 20), (100 × 30) and (100 × 40) are small. By enlarging the result as shown in Fig. 3b, the grid sizes of (100 × 30) and (100 × 40) presents some perturbations around the melting temperature of PCM, on the other hand, the temperature evolution for the grid size (100 × 20) during the melting time is very stable and keeps a fixed value (value of melting temperature). The grid size of (100 × 20) can be regarded as a grid size through which grid independent results can be obtained.

4. Analysis of computational results

The transient thermal behavior of the shell-and-tube LTES including two kinds of PCMs having different melting temperature is presented in this section. A large set of numerical tests have been conducted in order to analyze the heat transfer process inside the

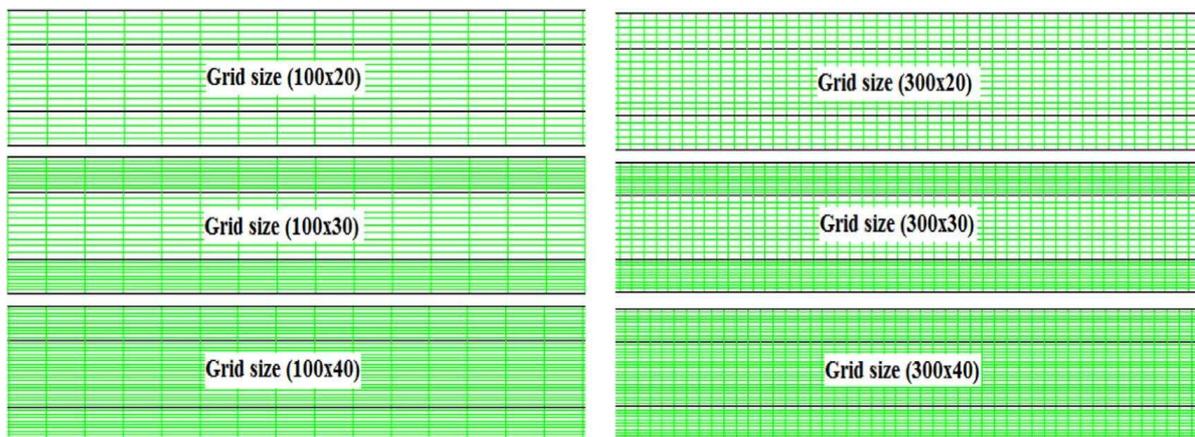


Fig. 2. Different computation grids used in the preliminary calculations.

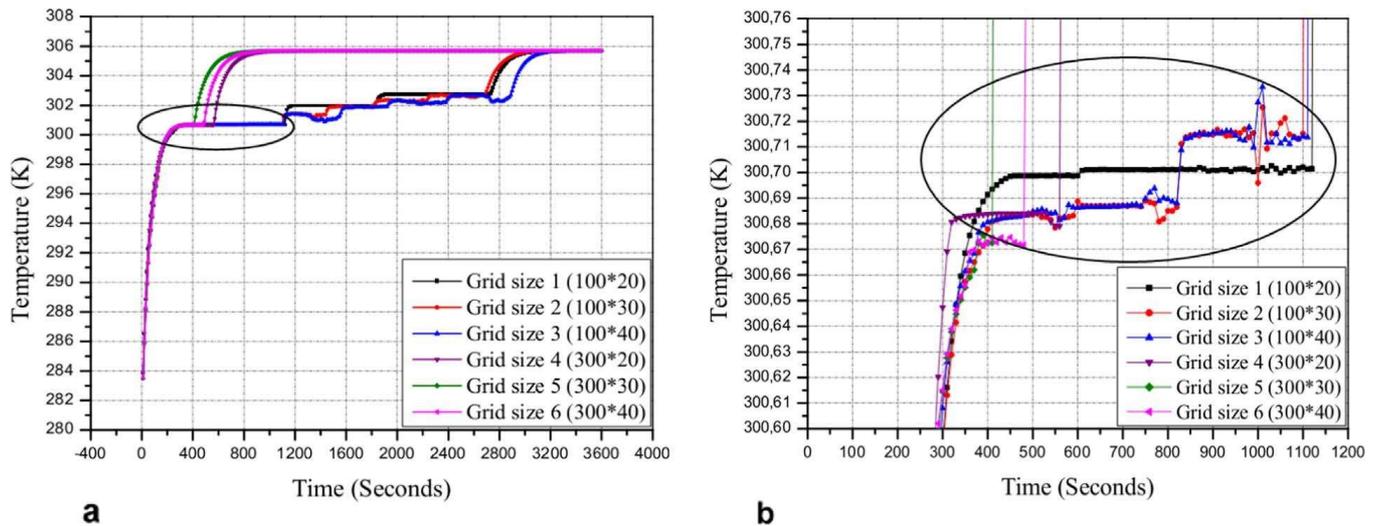


Fig. 3. a. Temperature variation of PCM for different grid sizes. b. Temperature variation of PCM for different grid sizes (Enlarging results).

unit under the effects of different HTF inlet temperature. The variation of temperature respecting to time at locations $T1$ ($x = 0.235$, $r = 0.00885$) m inside PCM1 and $T2$ ($x = 0.735$, $r = 0.00885$) m inside PCM2, the variation of total energy stored in different zone of PCMs as well as the total melting time of each PCM have been obtained by a series of numerical calculations and represented graphically.

4.1. Effects of HTF inlet temperature on PCMs temperature evolution

Fig. 4(a-b-c) show the unsteady temperature evolution of PCM1 and PCM2 for three different HTF inlet temperatures (338 K, 343 K and 353 K, respectively). The transient thermal behavior of the unit shows three distinct periods. During the first period, an increasing in temperature of each PCM was observed from the start of heating process until the beginning of the phase change, corresponding to the melting point of each PCM ($T_{M1} = 323$ K and $T_{M2} = 333$ K), the two PCMs stores energy primarily by sensible heat. During the second period, the thermal energy is mainly charged by latent heat and the temperature evolution of each PCM keeps constant for a period of time. At the third period, each PCM temperature starts to increase again, reaches its maximum value, then remains constant and equals to the HTF inlet temperature; during this period, the energy is charged only by sensible heat under a fusion form.

It can be seen that, the melting rate of PCM1 is the fastest and that of PCM2 is the slowest for all three different HTF inlet temperatures. The PCM1 temperature evolution increases rapidly with time during the heating process, which can be explained by the fact that the melting point of PCM1 is lower than PCM2, the PCM1 temperature reaches quickly the melting point, then enter to the second period before PCM2.

Increasing the HTF inlet temperature considerably increases the temperature evolutions of each PCM until reaching the steady state. The effects of HTF inlet temperature show that for high temperature difference between HTF inlet temperature and melting point of each PCM, charging process is rapidly reached. An increase in temperature difference will lead to an increase in the heat transfer rates as a result of rapidly increasing of temperature evolution until reaching the steady state.

4.2. Effects of HTF inlet temperature on total energy stored evolution

Fig. 5(a-b-c) depict the unsteady total energy stored evolution in different zone of PCMs for three different HTF inlet temperatures; for all the cases reported in Fig. 5(a-b-c), the HTF inlet velocity is maintained constant during the numerical tests to a value of 0.03 m/s. As shown in the figures, when the HTF inlet temperature increases from 338 K to 353 K, the thermal energy carried by the HTF enhances, then, the heat transmitted to each PCM becomes important and the charging process is rapidly reached.

The results show also that, for each HTF inlet temperature, the maximum thermal energy stored is observed in PCM2 with high melting temperature, high specific heat and high latent heat of fusion.

It's very clear to observe that, heat storage capacity is large for high temperature difference between HTF inlet temperature and melting point of each PCM. The total energy stored reaches its maximum value, then remains constant at the end of charging process and equals to: (265600 J for PCM1 and 282600 J for PCM2) for HTF inlet temperature 338 K; (273800 J for PCM1 and 291800 J for PCM2) for HTF inlet temperature 343 K; (290300 J for PCM1 and 310300 J for PCM2) for HTF inlet temperature 353 K.

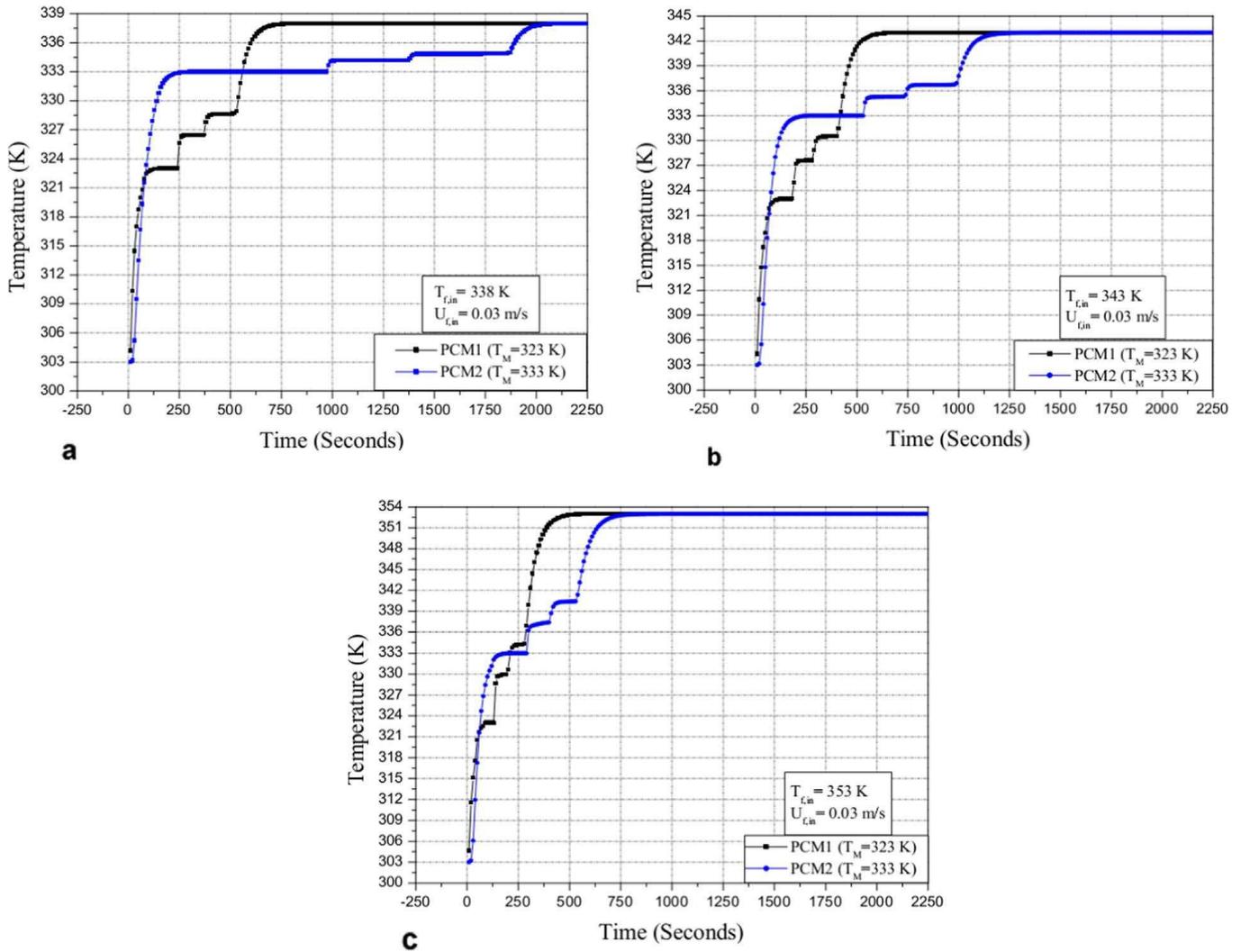


Fig. 4. a. Unsteady temperature evolution of PCM1 and PCM2 ($T_{f,in} = 338\text{ K}$, $U_{f,in} = 0.03\text{ m/s}$). b. Unsteady temperature evolution of PCM1 and PCM2 ($T_{f,in} = 343\text{ K}$, $U_{f,in} = 0.03\text{ m/s}$). c. Unsteady temperature evolution of PCM1 and PCM2 ($T_{f,in} = 353\text{ K}$, $U_{f,in} = 0.03\text{ m/s}$).

Fig. 6 illustrates the amount of total energy stored in each PCM for the three different HTF inlet temperatures. Due to the same reason, the thermal energy carried by the HTF enhances for high HTF inlet temperature. It can be seen from Fig. 6, for each HTF inlet temperature, the maximum energy stored is observed in PCM2.

4.3. Effects of HTF inlet temperature on total melting time

The effects of HTF inlet temperature on the total melting time (time required for each PCM completely melted) is shown in Fig. 7. For different HTF inlet temperature, melting time of PCM2 decrease considerably with increase in HTF inlet temperature compared to PCM1. The effects of increasing in HTF inlet temperature is considerably observed in PCM with high melting temperature. With high temperature difference between HTF inlet temperature and melting point of each PCM, the heat transfer rate increase, so, each PCM melting time reduce. when the HTF inlet temperature increases from 338 K to 353 K, decreasing degree of melting time of PCM2 is the biggest from 1870 s to 490 s, which reduces about 73.8%; decreasing degree of melting time of PCM1 is the smallest from 530 s to 270 s, which reduces about 49.1%.

5. Conclusions

A two-dimension mathematical model formulated in two-dimensional cylindrical coordinates based on the enthalpy formulation is developed in order to study the transient thermal behavior of a shell-and-tube LTES unit using two phase change materials named PCM1 and PCM2 having different melting temperatures. A variety of numerical tests were conducted in order to analyze the effect of HTF inlet temperature on the unsteady temperatures evolution of PCM1 and PCM2, the total energy stored evolution in different zone of PCMs as well as the total melting time of each PCM. According to the results and discussions, the following conclusions can be derived:

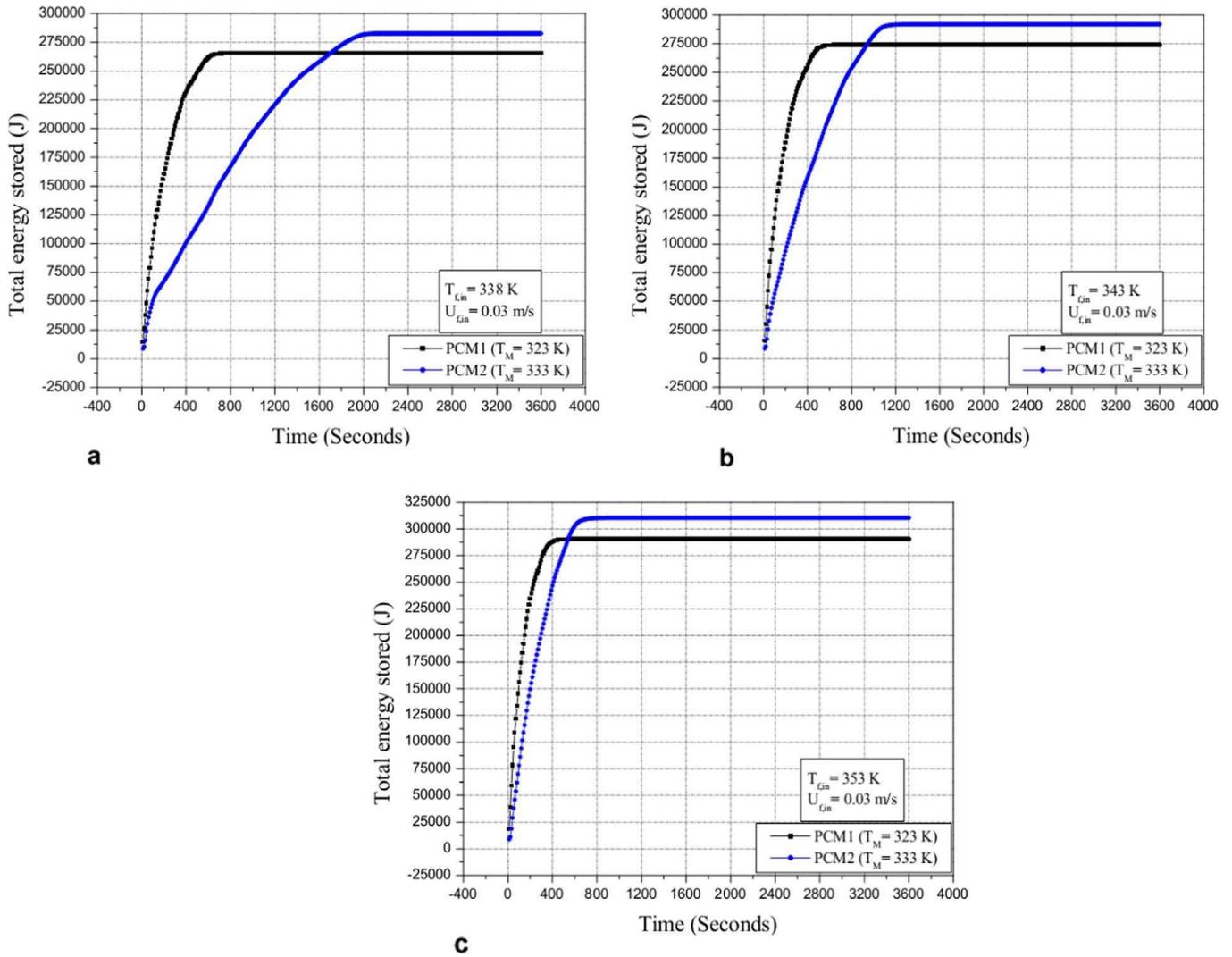


Fig. 5. a. Unsteady total energy stored evolution in PCM1 and PCM2 ($T_{f,in} = 338$ K, $U_{f,in} = 0.03$ m/s). b. Unsteady total energy stored evolution in PCM1 and PCM2 ($T_{f,in} = 343$ K, $U_{f,in} = 0.03$ m/s). c. Unsteady total energy stored evolution in PCM1 and PCM2 ($T_{f,in} = 353$ K, $U_{f,in} = 0.03$ m/s).

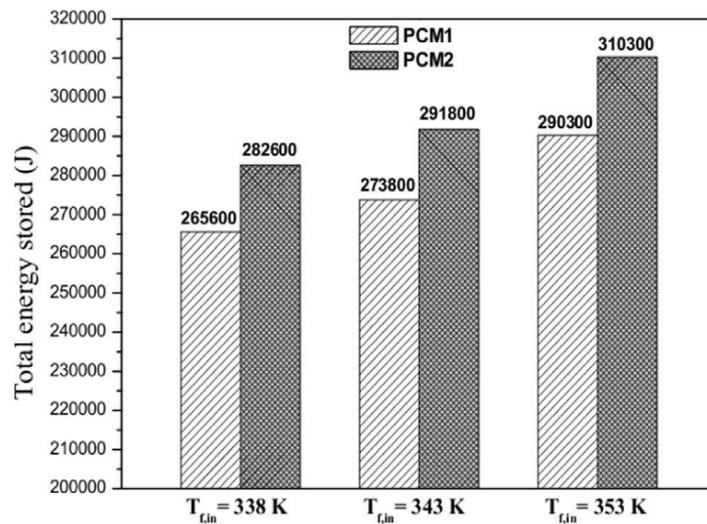


Fig. 6. The amount of total energy stored in each PCM.

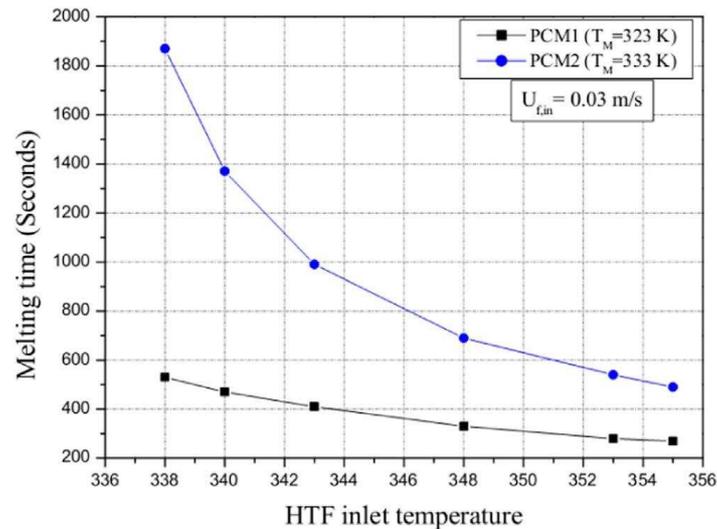


Fig. 7. Effects of HTF inlet temperature on total melting time ($U_{f,in} = 0.03$ m/s).

- (1) The transient thermal behavior of the LTES unit shows three distinct periods for the change of PCMs temperatures regarding to time;
- (2) For a given HTF inlet temperature, melting rate of PCM1 is the fastest and that of PCM2 is the slowest;
- (3) For high temperature difference between HTF inlet temperature and melting point of PCMs, the higher the heat transfer rate is observed; and the charging process is rapidly reached;
- (4) For each HTF inlet temperature, the maximum energy stored is observed in PCM2 with high melting temperature, high specific heat and high latent heat of fusion;
- (5) Heat storage capacity is large when the temperature difference between HTF inlet temperature and melting point of each PCM is large;
- (6) The higher HTF inlet temperature, the smaller melting times is needed.

References

- [1] A. Trp, An experimental and numerical investigation of heat transfer during technical grade paraffin melting and solidification in a shell-and-tube latent thermal energy storage unit, *Sol. Energy* 79 (2005) 648–660.
- [2] A. Trp, K. Lenic, B. Frankovic, Analysis of the influence of operating conditions and geometric parameters on heat transfer in water-paraffin shell-and-tube latent thermal energy storage unit, *Appl. Therm. Eng.* 26 (2006) 1830–1839.
- [3] Y.B. Tao, M.J. Li, Y.L. He, W.Q. Tao, Effects of parameters on performance of high temperature molten salt latent heat storage unit, *Appl. Therm. Eng.* 72 (2014) 48–55.
- [4] M.A. Kibria, M.R. Anisur, M.H. Mahfuz, R. Saidur, I.H.S.C. Metselaar, Numerical and experimental investigation of heat transfer in a shell-and-tube thermal energy storage system, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 53 (2014) 71–78.
- [5] M. Lacroix, Numerical simulation of a shell-and-tube latent heat thermal energy storage unit, *Sol. Energy* 50 (1993) 357–367.
- [6] M. Akgun, O. Aydin, K. Kaygusuz, Experimental study on melting/solidification characteristics of a paraffin as PCM, *Energy Convers. Manag.* 48 (2007) 669–678.
- [7] M. Akgun, O. Aydin, K. Kaygusuz, Thermal energy storage performance of paraffin in a novel tube-in-shell system, *Appl. Therm. Eng.* 28 (2008) 405–413.
- [8] H. Ait Adine, H. El Qarnia, Numerical analysis of the thermal behavior of a shell-and-tube heat storage unit using phase change materials, *Appl. Math. Model.* 33 (2009) 2132–2144.
- [9] M.M. Farid, A. Kanzawa, Thermal performance of a heat storage module using PCMs with different melting temperatures: mathematical modeling, *Trans. ASME J. Sol. Energy Eng.* 111 (1989) 152–157.
- [10] H. El Qarnia, Numerical analysis of a coupled solar collector latent heat storage unit using various phase change materials for heating the water, *Energy Convers. Manag.* 50 (2009) 247–254.
- [11] Y.Q. Li, Y.L. He, H.J. Song, C. Xu, W.W. Wang, Numerical analysis and parameters optimization of shell-and-tube heat storage unit using three phase change materials, *Renew. Energy* 59 (2013) 92–99.
- [12] M. Fang, G. Chen, Effects of different multiple PCMs on the performance of a latent thermal energy storage system, *Appl. Therm. Eng.* 27 (2007) 994–1000.
- [13] T. Watanabe, H. Kikuchi, A. Kanzawa, Enhancement of charging and discharging rates in a latent heat storage system by use of PCM with different melting temperatures, *Heat Recov. Syst. CHP* 13 (1993) 57–66.
- [14] L. Yang, X. Zhang, G. Xu, Thermal performance of a solar storage packed bed using spherical capsules filled with PCM having different melting points, *Energy Build.* 68 (2014) 639–646.
- [15] F.P. Incropera, D.P. Dewitt, T.L. Bergman, A.S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th ed., Wiley, New York, 1996.
- [16] V.R. Voller, Fast implicit finite-difference method for the analysis of phase change problems, *Numer. Heat Transf.* 17 (1990) 155–169.
- [17] S.V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1980.
- [18] A.A. Al-Abidi, S.B. Mat, K. Sopian, M.Y. Sulaiman, A.Th Mohammed, CFD applications for latent heat thermal energy storage: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 20 (2013) 353–363.

ملخص

الأعمال المنجزة في هذه الأطروحة تتعلق أساسا بفهم و تحليل السلوك الحراري المرتبط بظاهرة تخزين و استرجاع الطاقة الحرارية. الغرض من ذلك هو توفير المعرفة الإضافية و الضرورية لتطوير تكنولوجيا التخزين.

أولا، قمنا بتحليل تأثير العوامل الفيزيائية و الهندسية على عملية تخزين و استرجاع الطاقة الحرارية. ثانيا، من اجل تحسين انتقال الحرارة بين HTF و PCM، قمنا بدراسة وحدة نمطية تحتوي على عدة PCMs. الدراسة تسلط الضوء على تأثير درجة حرارة و سرعة HTF على السلوك الحراري. وأخيرا، قمنا بدراسة تأثير الخصائص الفيزيولوجية لثلاثة أنواع من PCMs على أداء التخزين الحراري.

Résumé

Les travaux menés dans cette thèse concernent principalement la compréhension et l'analyse du comportement thermique associé au phénomène de stockage/déstockage de l'énergie thermique par chaleur latente. Ces travaux a pour but d'apporter des connaissances supplémentaires et nécessaires pour le développement de la technologie de stockage thermique par chaleur latente.

Dans un premier temps, l'effet des différents paramètres physiques et géométrique sur le processus de charge et de décharge est analysé. En second lieu, afin d'améliorer le transfert de chaleur entre le HTF et le PCM, l'utilisation de multiple PCMs, en instaurant un système de PCMs en cascade est étudié. L'étude met en lumière l'effet de la température et la vitesse d'entrée du fluide HTF sur le comportement thermique d'une unité de stockage remplie avec deux types de Paraffine. Enfin, l'effet des propriétés thermo-physiques de trois types de PCMs sur la performance de stockage thermique est étudié.

Abstract

The work carried out in this thesis mainly concerns the understanding and the analysis of the thermal behavior associated with the charging/discharging of latent thermal energy. The purpose of this work is to provide additional and necessary knowledge for the development of the latent thermal energy storage technology.

Firstly, the effect of different operating conditions and geometric parameters on the charging and discharging processes have been analysed. Next, In order to enhance the heat transfer exchange between the HTF and PCM, multiple PCMs with different melting temperatures were employed. The study highlights the effect of the HTF inlet temperature and inlet velocity on the thermal behavior of a unit filled with two different Paraffine. Finally, the effect of thermo-physical properties of three different PCMs on the thermal performance is studied.