

Thèse de Doctorat

Présentée par

Mouna BEN ZOHRA

Pour obtenir le diplôme de Doctorat National

Formation Doctorale : **Physique et Sciences de l'Ingénieur**

Spécialité : **Mécanique, Energétique**

Sous le thème

Modélisation du stockage de la chaleur par les matériaux à changement de phase

Soutenue le 02/04 /2021 devant le jury composé de :

<i>Nom et Prénom</i>	<i>Etablissement</i>	<i>Qualité</i>
Pr. MANDRY Rachid	FST - Settat	Président
Pr. JELLAL Ahmed	FS - El Jadida	Rapporteur
Pr. RAHMOUNE Miloud	EST - Meknès	Rapporteur
Pr. BOUTYOUR El Hassan	FST - Settat	Rapporteur
Pr. MANIANA Mohamed	CRMEF - Settat	Examineur
Pr. MANSOURI Mohamed	ENSA - Berrechid	Examineur
Pr. SENNOUNE Mohamed	FP - Taza	Co-directeur de thèse
Pr. ALHAMANY Abdelilah	FST - Settat	Directeur de thèse

À

Ma mère et Mon père,

À

Mon mari

À

Ma famille

À

Tous ceux qui me sont chers...

REMERCIEMENTS

À l'issue de l'obtention de mon doctorat, je suis convaincue que la thèse est loin d'être un travail solitaire. En effet, je n'aurais jamais pu réaliser ce travail doctoral sans le soutien d'un grand nombre de personnes, dont la générosité, la bonne humeur et l'intérêt manifestés à l'égard de ma recherche, qui m'ont permis de progresser dans cette phase d'apprenti chercheur.

J'exprime ma sincère gratitude à mon directeur de thèse le professeur Abdelilah ALHAMANY, je suis très reconnaissante de son incroyable soutien, de son orientation et de sa grande vision qui seront toujours une source d'inspiration pour moi. Il m'a donné non seulement un aperçu estimable de mes recherches, mais aussi un but clair et le choix de la piste la plus convenable. Je le remercie encore de m'avoir donné l'opportunité de travailler sur un sujet intéressant et pour toute l'aide qu'il m'a apporté pendant la période de ma recherche en tant que doctorante.

Je tiens à remercier encore le professeur Mohamed SENNOUNE, pour son énergie, ses connaissances scientifiques et techniques et son soutien tout au long de ma recherche. Merci également du fond du cœur pour son soutien humain.

Je remercie également Monsieur MANDRY Rachid, professeur à la Faculté des Sciences et Techniques-Settat d'avoir accepté de présider ma soutenance. J'adresse tous mes remerciements à Monsieur JELLAL Ahmed, professeur à la Faculté des Sciences d'El Jadida, ainsi qu'à Monsieur BOUTYOUR EL Hassan, professeur à la Faculté des Sciences et Techniques Settat et à Monsieur RAHMOUNE Miloud, professeur à l'Ecole Supérieure de Technologie de Casablanca, de l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être rapporteurs de cette thèse.

Je remercie également Monsieur MANSOURI Mohamed, professeur à l'école Nationale des Sciences Appliquées Berrechid et Monsieur MANIANA Mohamed, professeur au Centre Régional des Métiers de l'Education et de la Formation-Settat, qui ont bien voulu être examinateurs.

Un remerciement particulier au corps professoral du département physique et tous les membres du laboratoire de Mathématiques, Informatique et Sciences de l'Ingénieur (MISI).

J'exprime également ma gratitude à ma chère mère pour son encouragement, son soutien et son amour. Mes profonds remerciements vont à mon regretté papa à qui je dédie ce travail.

Je remercie chaleureusement mon mari qui m'a soutenu sans conditions, il m'a toujours encouragé à continuer dans les moments de stress, ainsi que mes enfants.

Mouna BEN ZOHRA.

RESUME

L'énergie solaire par sa nature est intermittente (jour /nuit) diluée et décalée par rapport à la demande énergétique, alors le stockage d'énergie réduit ces problèmes inhérents. A ce propos, les matériaux à changement de phase (MCP) sont utilisés pour stocker l'énergie thermique sous forme de chaleur latente. Les MCP sont des substances qui captent et restituent des quantités importantes de chaleur au cours du processus de changement de phase à une certaine température caractéristique de chaque matériau. Lorsque la température augmente, les MCP se liquéfient en absorbant la chaleur et ils la libèrent quand la température décroît. Pour améliorer la performance des systèmes de stockage à base de MCP et pour offrir aux ingénieurs et aux concepteurs un outil fiable, il faut identifier les mécanismes physiques responsables des comportements observés. Dans ce contexte, l'étude du comportement thermomécanique des MCP est primordiale et aide à mieux comprendre le stockage de la chaleur lors des transformations de phase. L'objectif de cette thèse est l'amélioration du stockage de la chaleur par les matériaux à changement de phase en prenant en considération les différents modes de transfert de chaleur. Pour ce faire, nous proposons une modélisation qui décrit le couplage des phénomènes thermiques et de changement de phase. Le modèle proposé permet de décrire les effets supplémentaires comme la géométrie et les modes de transfert de chaleur. Ensuite, le modèle est validé par la simulation numérique via Ansys FLUENT en confrontant les résultats obtenus à celle de la littérature, ainsi les résultats numériques obtenus montrent que le système MCP permet de stocker des grandes quantités d'énergie dans un temps plus réduit par rapport aux autres systèmes proposés précédemment. Enfin, les résultats obtenus permettent de développer des applications thermiques basées sur des matériaux à changement de phase pour améliorer le stockage et la production d'énergie thermique.

Mots-Clés : matériaux à changement de phase, stockage thermique, énergie thermique, couplage thermo-mécanique, couplage thermo-fluidique, simulation numérique, ANSYS FLUENT, COMSOL...

ABSTRACT

Solar energy by its nature is discontinuous (day / night) diluted and out of phase with energy demand, so energy storage reduces these inherent problems. In this regard, phase change materials (PCM) are used to store thermal energy in the form of latent heat. The PCM are materials, which capture and release large amounts of heat during the phase change process at a certain temperature characteristic of each material. As the temperature increases, PCMs liquefy by absorbing heat and they release it when the temperature decreases. To improve the performance of PCM-based storage systems and to offer the engineers and the designers a reliable tool, it is necessary to identify the physical mechanisms responsible for the observed behaviors. In this context, an investigation into the thermo-mechanical influence of PCM was carried out, which delivers essential informations and helps to better understand their behavior during phase transformation. The objective of this thesis is to improve thermal heat storage based on phase change materials by taking into account the different modes of heat transfer. Therefore, a thermo-fluidic modeling describes the interaction between the solid-fluid and thermal field during phase change has been proposed. Next, the proposed model was developed to describe additional effects like geometry and heat transfer modes. After a numerical study validates the model by comparing the results obtained with the literature. In order to support the obtained results, a simulation by the Ansys FLUENT software was carried out. Finally, the results obtained are used to develop thermal applications based on phase change materials to improve storage and production of thermal energy.

Keywords: phase change materials, thermal storage, thermal energy, thermo-mechanical coupling, thermo-fluidic coupling, simulation, ANSYS FLUENT, COMSOL....

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	III
RESUME	IV
ABSTRACT	V
TABLE DES MATIERES	VI
LISTE DES FIGURES	X
LISTE DES TABLEAUX	XII
LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES	XIII
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART DES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE.....	3
1.1. INTRODUCTION	4
1.2. LE STOCKAGE DE L'ENERGIE THERMIQUE	6
1.2.1. STOCKAGE SENSIBLE	6
1.2.1.1. <i>Stockage sensible dans les solides :</i>	7
1.2.1.2. <i>Stockage sensible dans les fluides</i>	8
1.2.1.3. <i>Technologies hybrides du stockage sensible.</i>	8
1.2.2. LE STOCKAGE PAR CHALEUR LATENTE.	9
1.2.3. STOCKAGE THERMOCHIMIQUE.....	10
1.2.4. AUTRES SYSTEMES DU STOCKAGE EXISTANT.	10
1.2.4.1. <i>Le stockage sous forme d'énergie cinétique.</i>	11
1.2.4.2. <i>Le stockage sous forme d'énergie potentielle.</i>	11
1.2.4.3. <i>Le stockage sous forme d'énergie interne.</i>	11
1.2.5. COMPARAISON ENTRE LES DIFFERENTES TECHNIQUES DU STOCKAGE CITE.	12
1.2.6. <i>PRINCIPE DU STOCKAGE PAR CHALEUR LATENTE.</i>	13
1.3. LE STOCKAGE THERMIQUE PAR MCP.	15
1.4. REPERES HISTORIQUES POUR L'UTILISATION DES MCP.	15
1.4.1. LES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE.	16
1.4.2. CRITERE DE SELECTION D'UN BON MCP	16
1.5. LES TYPES DE MCP :	19
1.5.1. LES CORPS INORGANIQUES :	20
1.5.1.1. <i>Sels hydratés</i>	20
1.5.1.2. <i>Matériaux métalliques</i>	21
1.5.2. LES CORPS ORGANIQUES :	21
1.5.2.1. <i>Paraffines</i>	22
1.5.2.2. <i>Acides gras</i>	23
1.5.2.3. <i>Alcools de sucre</i>	23
1.5.3. EUTECTIQUES DES CORPS INORGANIQUES ET/OU ORGANIQUES.	24
1.5.4. <i>PRINCIPALES PROPRIETES PHYSIQUES DU MCP ET A COMPARER AVEC L'EAU</i>	25
1.6. APPLICATIONS	26
1.6.1. CAS D'ETUDE DU STOCKAGE THERMIQUE ASSOCIE AU RECEPTEUR SOLAIRE.....	27
1.6.2. <i>CAS D'ETUDE DES SYSTEMES DU STOCKAGE LATENT PAR CHANGEMENT DE PHASE INTEGRE A UN BATIMENT.</i>	28
1.6.3. <i>CAS D'ETUDE DES SYSTEMES DU STOCKAGE LATENT PAR CHANGEMENT DE PHASE DANS L'ELECTRONIQUE ET DANS LES CENTRALES SOLAIRES A CONCENTRATION.</i>	29
1.7. COMMENT CHOISIT-ON UN MCP ?	30

TABLE DES MATIERES

1.7.1. CARACTERISATIONS EXPERIMENTALES DES MCP SELON LES CRITERES DU CHOIX	32
1.7.2. LES TECHNIQUES UTILISEES POUR DETERMINER LES PROPRIETES THERMIQUES DES MCP	33
1.7.2.1. Présentation générale de l'analyse thermogravimétrique	33
1.7.2.2. Analyse par Calorimétrie différentielle à balayage (DSC).....	34
1.8. L'UTILISATION DE MCP DANS LES PAROIS.....	40
1.8.1. PRINCIPE D'ENCAPSULATION ET STABILITE CHIMIQUE.....	41
1.8.1.1. L'encapsulation.....	41
1.8.1.2. Principe d'encapsulation.....	41
1.8.2. COMPORTEMENT THERMIQUE DES MCP AVEC ET SANS ENCAPSULATION.....	42
1.9. CONCLUSION	43
CHAPITRE 2 : ETAT DE L'ART SUR LA MODELISATION DU CHANGEMENT DE PHASE SOLIDE-LIQUIDE	45
2.1. INTRODUCTION	46
2.2. LISTE EXHAUSTIVE DES MODELES EXISTANTS DANS LA LITERATURE.....	47
2.2.1. MODELE DE KIYAROU DI. [61].....	47
2.2.1.1. Description du système étudié dans ce modèle.....	47
2.2.1.2. Modèle numérique.....	48
2.2.1.3. Les conditions initiales et aux limites :.....	50
2.2.1.4. Résultats et discussion.....	50
2.2.1.5. Synthèse du modèle.....	54
2.2.2. MODELE DE VOGEL [62].....	54
2.2.2.1 Description du système :.....	55
2.2.2.2. Les équations gouvernantes :.....	55
2.2.2.3 Résultats et discussions	56
2.2.2.4 Synthèse du modèle.....	58
2.2.3. MODELE DE KASIBHATLA [64].....	59
2.2.3.1. Description du système.....	59
2.2.3.2. Les conditions initiales et aux limites :.....	59
2.2.3.3. Modèle numérique.....	60
2.2.3.4. Résultats et discussion.....	61
2.2.3.5. Synthèse du modèle.....	62
2.2.4. MODELE DE KUMAR [66]	62
2.2.4.1. Description du système.....	62
2.2.4.2. Le Modèle simplifié.....	63
2.2.4.3. Résultats et discussions	64
2.2.4.4. Synthèse du modèle.....	65
2.3. CONCLUSION	66
CHAPITRE 3 : MODELISATION DU CHANGEMENT DE PHASE SOLIDE-LIQUIDE	67
3.1. INTRODUCTION	68
3.2. DESCRIPTION ET PROBLEMATIQUE DE MODELISATION	69
3.2.1. PROBLEMATIQUE DU MODELE	69
3.2.2. MODELE PHYSIQUE « DESCRIPTION GEOMETRIQUE DU DISPOSITIF »	69
3.2.3. TRANSFERT DE LA CHALEUR DANS LES COUCHES MCP	70
3.3. LES PRINCIPAUX MODES DE TRANSFERT DE CHALEUR.....	71
3.3.1. MODE DE LA CONDUCTION THERMIQUE :	71
3.3.2. MODE DE LA CONVECTION THERMIQUE	73
3.3.3. MODE DE RAYONNEMENT THERMIQUE :.....	74
3.4. MODELISATION DU CHANGEMENT DE PHASE SOLIDE/LIQUIDE.....	75
3.4.1. DESCRIPTION DU MODELE THERMO-FLUIDIQUE COUPLE.....	75
3.4.1.1. Mécanismes physiques en jeu.....	75

TABLE DES MATIERES

3.4.1.2. Conservation de masse	76
3.4.1.3. L'équation de la quantité de mouvement :	78
3.4.1.4. Equation de la conservation d'énergie :	83
3.4.2. COUPLAGE THERMO-FLUIDIQUE	88
3.5. L'EFFET DE DIFFERENTS MODES DE TRANSFERTS DE CHALEUR SUR LA GEOMETRIE CHOISIE POUR UN MCP	89
3.5.1. LE MODELE PHYSIQUE GEOMETRIQUE	89
3.5.2. EFFETS DE LA GEOMETRIE DE LA CAVITE SUR LE TRANSFERT DE LA CHALEUR ET CONDITIONS AUX LIMITES	90
3.6. CONCLUSION	92
CHAPITRE 4 : ETUDE NUMERIQUE ET VALIDATION DU MODELE PROPOSE	93
4.1. INTRODUCTION	94
4.2. PARAMETRES DE MCP	95
4.3. VALIDATION DU MODELE NUMERIQUE	98
4.3.1. INTERPRETATION DU SYSTEME PROPOSE :	98
4.3.2. CONDITIONS AUX LIMITES :	99
4.4. RESULTATS NUMERIQUES	99
4.4.1. RESULTATS DES MESURES PHYSIQUES	99
4.4.2. LE PROCESSUS DE FUSION / SOLIDIFICATION	102
4.4.3. L'IMPACT SUR LA FUSION ET LA SOLIDIFICATION DU MCP	103
4.5. LE PRINCIPE DE LA MODELISATION A PARTIR DES LOIS THERMODYNAMIQUES	104
4.6. VALIDATION DE LA METHODE PROPOSEE	105
4.6.1. STOCKAGE ET DESTOCKAGE DE PARAFFINE RT27	106
4.6.1.1. Paraffine pure RT27	106
4.6.1.2. Composite paraffine RT27 avec résine époxy	107
4.6.2. STOCKAGE ET DESTOCKAGE DE PARAFFINE RT64	110
4.6.2.1. Paraffine RT64 pure	110
4.6.2.2. Paraffine RT64 Composite	111
4.6.3. STOCKAGE ET DESTOCKAGE DE LA PARAFFINE RT35	112
4.6.4. STOCKAGE ET DESTOCKAGE DE LA PARAFFINE RT4	113
4.7. ÉTUDE DES PARAMETRES DE CONDUCTION THERMIQUE	114
4.7.1. CAPACITE CALORIFIQUE	114
4.7.2. CONTROLE DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE	115
4.8. MODELE NUMERIQUE EN 2D	116
4.8.1. MODELE PHYSIQUE	117
4.8.2. GEOMETRIE RECTANGULAIRE	117
4.8.3. MAILLAGE DU SYSTEME	118
4.8.4. GEOMETRIE TRIANGULAIRE	118
4.8.5. RESULTAT DU MODELE NUMERIQUE CFD	119
4.9. EFFET DU RAYONNEMENT SUR LES MCP	122
4.9.1. L'IMPACT DU FLUX DU RAYONNEMENT SUR LA FUSION ET LA SOLIDIFICATION	123
4.9.2. SYNTHESE DU RESULTAT DE LA RADIATION	125
4.10. ÉTUDE NUMERIQUE DU MCP ENCAPSULE EN 3D	125
4.11. CONCLUSION	128
CHAPITRE 5 : APPLICATIONS DES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE DANS LES ENERGIES RENOUVELABLES	129
5.1. INTRODUCTION	130
5.2. LE CHAUFFE-EAU SOLAIRE	130

TABLE DES MATIERES

5.2.1. LE PROTOTYPE DU SYSTEME SOLAIRE PROPOSE	131
5.2.2. LE MODELE PHYSIQUE	132
5.2.3. CONDITIONS INITIALES ET AUX LIMITES	133
5.2.4. RESULTATS ET DISCUSSIONS	134
5.2.5. CONCLUSION	140
5.3. LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES (PV)	141
5.3.1. INTRODUCTION	141
5.3.2. CONFIGURATION DE LA METHODOLOGIE	143
5.3.3. LE MODELE PHYSIQUE	144
5.3.4. CONDITIONS INITIALES ET AUX LIMITES	144
5.3.5. RESULTATS ET DISCUSSIONS	145
5.4. INTEGRATION DU MCP DANS LE BATIMENT	150
5.4.1. INTRODUCTION	150
5.4.2. LE MODELE PHYSIQUE	151
5.4.3. RESULTATS ET DISCUSSIONS	152
5.4.4. SYNTHÈSE	157
5.5. CONCLUSION	157
CONCLUSION GENERALE	158
PERSPECTIVES	160
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	161

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. 1 : LES DIFFERENTES TECHNIQUES DU STOCKAGE DE L'ENERGIE THERMIQUE 6

FIGURE 1. 2 : SYSTEME UTES OU BTES REVERSIBLE (BOREHOLE THERMAL ENERGY STORAGE) ; 7

FIGURE 1. 3 : GRAPHE DE LA TEMPERATURE-ENTHALPIE PRESENTANT LE PROCESSUS DU STOCKAGE DANS UN SYSTEME THERMIQUE. 10

FIGURE 1. 4 : LES TYPES DES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE 20

FIGURE 1. 5 : UN EXEMPLE DE MCP METALLIQUE..... 21

FIGURE 1. 6 : CHALEUR LATENTE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE FUSION DES GRANDES FAMILLES DE MCP 31

FIGURE 1. 7 : CRITERES DE SELECTION D'UN MCP POUR LE STOCKAGE DE LA CHALEUR LATENTE SELON PASUPATHY..... 33

FIGURE 1. 8 : EXEMPLE DE POST TRAITEMENT D'UNE ANALYSE DE THERMOGRAVIMETRIE SUR L'ACETAMIDE 34

FIGURE 1. 9 : EXEMPLES DE THERMOGRAMMES POUR L'ACIDE STEARIQUE..... 35

FIGURE 1. 10 : THERMOGRAMME AU DSC131 DU 2EME CYCLE DE L'ACIDE ARACHIDIQUE 36

FIGURE 1. 11 : COMPARAISON DES CYCLES 2, 38 ET 75 DE L'ACIDE ARACHIDIQUE APRES PASSAGE AU PYRIS DIAMOND DSC 37

FIGURE 1. 12 : ANALYSE THERMOGRAVIMETRIQUE DE L'ACIDE ARACHIDIQUE 38

FIGURE 1. 13 : THERMOGRAMME AU DSC131 DU 2EME CYCLE DE L'ACIDE STEARIQUE 38

FIGURE 1. 14 : COMPARAISON DES CYCLES 2, 38 ET 75 DE L'ACIDE STEARIQUE APRES PASSAGE 39

FIGURE 1. 15 : ANALYSE THERMOGRAVIMETRIQUE DE L'ACIDE STEARIQUE 40

FIGURE 1. 16 : QUELQUES GEOMETRIES DE MACRO-ENCAPSULATION 42

FIGURE 2. 1: A)DESSIN SCHEMATIQUE DE L'UNITE LHTES, B) L'EMPLACEMENT DU THERMOCOUPLE 48

FIGURE 2. 2: (A) CONTOURS DE TEMPERATURE UTILISANT LE MODELE DE CONDUCTION PURE 51

FIGURE 2. 3: (A) CONTOURS DE TEMPERATURE UTILISANT LE MODELE DE CONDUCTION-CONVECTION..... 51

FIGURE 2. 4: (A) CONTOURS DE TEMPERATURE UTILISANT LE MODELE DE CONDUCTION PURE 52

FIGURE 2. 5: (A) CONTOURS DE TEMPERATURE UTILISANT LE MODELE DE CONDUCTION-CONVECTION..... 52

FIGURE 2. 6: COMPARAISON DE LA VARIATION DE TEMPERATURE MCP PENDANT LE PROCESSUS DE CHARGE 53

FIGURE 2. 7: ECHANGEUR DE CHALEUR A PLAQUES PLATES, DANS LAQUELLE LES ENCEINTES MCP SONT SEPARÉES 55

FIGURE 2. 8: DOMAINE DE SIMULATION POUR L'ETUDE DES PARAMETRES[63] 56

FIGURE 2. 9: FRACTIONS DE PHASE LIQUIDE EN FONCTION DU TEMPS. 57

FIGURE 2. 10: FACTEUR DE RENFORCEMENT CONVectif DE TOUS LES CAS DE TEST 58

FIGURE 2. 11: LA GEOMETRIE DE LA CAPSULE MCP 59

FIGURE 2. 12: VALIDATION QUALITATIVE DE LA FUSION MCP APRES 6 MIN AVEC $\mu S = 5 \times 10^3$ PA S, 61

FIGURE 2. 13: VALIDATION QUALITATIVE DE LA FUSION MCP APRES 12 MIN AVEC $\mu S = 5 \times 10^3$ PA S, 61

FIGURE 2. 14: VUE SCHEMATIQUE D'UNE ENCEINTE RECTANGULAIRE 2D 63

FIGURE 2. 15: CONTOURS DE FRACTION POUR A_{MUSH} : 64

FIGURE 2. 16: VARIATION DE LA FRACTION DE FUSION AVEC LE TEMPS POUR DIFFERENTES VALEURS D'AMUSH 65

FIGURE 3. 1: GEOMETRIE DU MODELE ET REPARTITION DES LIMITES DU DOMAINE ETUDIE..... 70

FIGURE 3. 2 : SCHEMA DES PLAQUES MCP SIMPLIFIEES. 70

FIGURE 3. 3 : SCHEMA DU TRANSFERT DE CHALEUR CONDUCTIF..... 72

FIGURE 3. 4 : PHENOMENE DE CONVECTION NATURELLE DANS UN LIQUIDE..... 74

FIGURE 3. 5: SCHEMAS DES FORMES TRIANGULAIRES, RECTANGULAIRES ET PARALLELOGRAMMES 90

FIGURE 3. 6: CONCEPTION DU MODELE PROPOSE PAR MCP 91

FIGURE 4. 1 : SCHEMA DE PRINCIPE ET LES DIMENSIONS DU SYSTEME MCP 99

FIGURE 4. 2 : L'EVOLUTION DE L'ENTHALPIE H EN FONCTION DE LA TEMPERATURE POUR : 100

FIGURE 4. 3 : COURBE DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DU TEMPS EN COMPARANT LE MODELE AVEC LA LITTERATURE, 101

FIGURE 4. 4 : UNE COMPARAISON DE LA FRACTION DE FUSION AVEC LE TEMPS ENTRE LES RESULTATS EXPERIMENTAUX ET NUMERIQUES 102

FIGURE 4. 5 : LA SOLIDIFICATION ET LA FUSION DANS UN SYSTEME MCP POUR LES DIFFERENTS TYPES DE MCP. 103

FIGURE 4. 6 : ÉNERGIE STOCKEE PAR UNITE DE SURFACE EN FONCTION DU TEMPS. 105

FIGURE 4. 7 : LE FLUX DE CHALEUR EN FONCTION DE TEMPERATURE POUR RT27 PURE 106

FIGURE 4. 8 : L'EVOLUTION DE FLUX DE LA CHALEUR EN FONCTION DE LA TEMPERATURE POUR LA PARAFFINE PURE RT27..... 107

FIGURE 4. 9 : L'EVOLUTION DU FLUX DE LA CHALEUR ET DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DU TEMPS..... 108

FIGURE 4. 10 : FLUX DE LA CHALEUR EN FONCTION DE LA TEMPERATURE POUR LA PARAFFINE PURE RT27 ET LA PERLITE EXPANSEE..... 108

FIGURE 4. 11 : VARIATION DU FLUX DE LA CHALEUR EN FONCTION DE LA TEMPERATURE POUR RT27 PURE ET LES COMPOSITES 109

FIGURE 4. 12 : LA VARIATION DU CYCLAGE THERMIQUE DE L'ÉCHANGE THERMIQUE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE 109

FIGURE 4. 13 : LE FLUX DE CHALEUR EN FONCTION DE LA TEMPERATURE 110

FIGURE 4. 14 : L'ÉCHANGE DE LA CHALEUR ENTRE L'EXTERIEUR ET LE MCP 111

FIGURE 4. 15 : LA VARIATION DU FLUX DE LA CHALEUR POUR LE COMPOSITE PE/PA JUSQU'A 300 CYCLES FUSION/SOLIDIFICATION. 112

FIGURE 4. 16 : LE FLUX DE CHALEUR EN FONCTION DE TEMPERATURE RT35 PURE 113

Liste des Figures

FIGURE 4. 17 : FLUX DE CHALEUR DE RT4 EN FONCTION DE LA TEMPERATURE.....	113
FIGURE 4. 18 : L'ÉVOLUTION DE LA CAPACITE THERMIQUE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE	114
FIGURE 4. 19 : ÉVOLUTION DE LA CAPACITE THERMIQUE MASSIQUE DES COMPOSITES PARAFFINE / PERLITE	115
FIGURE 4. 20 : L'ÉVOLUTION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE EN FONCTION DE % MASSE DE PLATRE.....	116
FIGURE 4. 21 : <i>MODELE GEOMETRIQUE DE LA STRUCTURE PROPOSEE</i>	117
FIGURE 4. 22 : <i>MAILLAGE POUR LA GEOMETRIE RECTANGULAIRE</i>	118
FIGURE 4. 23 : <i>MAILLAGE POUR LA GEOMETRIE TRIANGULAIRE</i>	118
FIGURE 4. 24 : <i>ÉVOLUTION TEMPORELLE DE LA FUSION DU MCP RECTANGULAIRE</i>	120
FIGURE 4. 25 : <i>ÉVOLUTION TEMPORELLE DE LA FUSION DU MCP TRIANGULAIRE (10, 20, 30, 50, 70, 90,110, AND 120 MIN)</i>	121
FIGURE 4. 26 : <i>ÉVOLUTION TEMPORELLE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE AU COURS DE LA FUSION DU MCP</i>	122
FIGURE 4. 27 : L'ÉVOLUTION DE LA FRACTION LIQUIDE DURANT LA CHARGE	124
FIGURE 4. 28 : L'ÉVOLUTION DE LA FRACTION LIQUIDE DURANT LA DECHARGE.....	124
FIGURE 4. 29 : L'ÉVOLUTION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DU TEMPS	125
FIGURE 4. 30 : <i>REPARTITION DE LA DENSITE ET EMPLACEMENT DES INTERFACES LIQUIDE / SOLIDE</i>	126
FIGURE 4. 31 : REPARTITION DE LA DENSITE ET EMPLACEMENT DES INTERFACES LIQUIDE / SOLIDE.....	127
FIGURE 5. 1: SCHEMA D'UN CHAUFFE-EAU SOLAIRE EN UTILISANT LE MCP.....	131
FIGURE 5. 2: SCHEMA DES MCP A PLAQUES SIMPLIFIEES	132
FIGURE 5. 3: CONCEPTION DU MODELE PROPOSE PAR MCP	133
FIGURE 5. 4: LES CONDITIONS AUX LIMITES APPLIQUEES AU MCP.....	133
FIGURE 5. 5: ÉVOLUTION DE LA TEMPERATURE DE MCP EN FONCTION DU TEMPS.....	134
FIGURE 5. 6 : L'ÉVOLUTION DE L'ENTHALPIE H EN FONCTION DE LA TEMPERATURE.....	135
FIGURE 5. 7 : ÉVOLUTION DE L'INTERFACE SOLIDE-LIQUIDE DU COLLECTEUR.....	136
FIGURE 5. 8 : GEOMETRIE ET MAILLAGE	136
FIGURE 5. 9 : COURBE DE CONVERGENCE	137
FIGURE 5. 10 : ÉVOLUTION TEMPORELLE DE LA FUSION MCP DANS LE COLLECTEUR	137
FIGURE 5. 11 : COMPARAISON DE LA DIFFERENCE DE TEMPERATURE MESUREE DU SYSTEME SOLAIRE AVEC ET SANS MCP.....	138
FIGURE 5. 12 : STOCKAGE DE L'ÉNERGIE THERMIQUE EN FONCTION DU TEMPS ET DE TEMPERATURE.....	139
FIGURE 5. 13 : ÉVOLUTION DE LA FRACTION LIQUIDE EN FONCTION DU TEMPS POUR DIFFERENTES VALEURS DE Θ	139
FIGURE 5. 14 : TRANSFERT DE CHALEUR DANS LE CAPTEUR SOLAIRE	142
FIGURE 5. 15 : LE SYSTEME HYBRIDE THERMO-PHOTOVOLTAÏQUE.....	143
FIGURE 5. 16 : PRÉSENTATION DU SYSTEME PV / MCP, CONDITIONS AUX LIMITES ET GEOMETRIE.....	144
FIGURE 5. 17 : VARIATION DE TEMPERATURE EN FONCTION DU TEMPS	145
FIGURE 5. 18 : L'ÉVOLUTION DE L'IRRADIATION EN FONCTION	146
FIGURE 5. 19 : A) PERFORMANCES ELECTRIQUES DURANT LA JOURNEE, B) PERFORMANCES THERMIQUES DURANT LA JOURNEE	147
FIGURE 5. 20 : L'ÉVOLUTION THERMIQUE DE LA FUSION MCP EN FONCTION DU TEMPS.....	148
FIGURE 5. 21 : CONDITIONS AUX LIMITES DANS LA PLAQUE MCP	152
FIGURE 5. 22 : L'ÉVOLUTION COMPLETE DE L'ÉNERGIE PRODUITE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE	153
FIGURE 5. 23 : L'ÉVOLUTION INCOMPLETE DE L'ÉNERGIE PRODUITE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE POUR LE SYSTEME PROPOSE	154
FIGURE 5. 24 : L'ÉVOLUTION COMPLETE DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DU TEMPS.	154
FIGURE 5. 25 : L'ÉVOLUTION INCOMPLETE DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DU TEMPS.	155
FIGURE 5. 26 : GEOMETRIE ET MAILLAGE	155
FIGURE 5. 27 : ÉVOLUTION DE LA FUSION EN FONCTION DU TEMPS POUR LE SYSTEME MCP PROPOSE	156

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. 1 : STOCKAGE THERMIQUE : COMPARATIF ET COMPROMIS.....	13
TABLEAU 1. 2 : MATERIAUX POUR LE STOCKAGE THERMIQUE A CHALEUR LATENTE	14
TABLEAU 1. 3 : LES PROPRIETES DE PARAFFINES PURES SOLIDES SOUS FORME DE CIRES.....	22
TABLEAU 1. 4 : TEMPERATURE DE FUSION ET CHALEUR LATENTE POUR QUELQUES ACIDES GRAS.....	23
TABLEAU 1. 5 : LES PRINCIPAUX AVANTAGES ET INCONVENIENTS POUR CHAQUE TYPE DE MATERIAU	25
TABLEAU 1. 6 : LES PRINCIPALES PROPRIETES THERMO-PHYSIQUES DES MCP A COMPARER AVEC DE L'EAU	26
TABLEAU 1. 7 : METHODES ET TECHNIQUES D'ANALYSE DES GRANDEURS PHYSIQUES.....	33
TABLEAU 1. 8 : COMPARAISON DES RESULTATS DE DSC131 SUR L'ACIDE ARACHIDIQUE.....	36
TABLEAU 1. 9 : COMPARAISON DES RESULTATS DES CYCLES 2, 38 ET 75 DE L'ACIDE ARACHIDIQUE	37
TABLEAU 1. 10 : COMPARAISON DES RESULTATS DE DSC131 SUR L'ACIDE STEARIQUE	38
TABLEAU 1. 11 : COMPARAISON DES RESULTATS DES CYCLES 2, 38 ET 75 DE L'ACIDE STEARIQUE.....	39
TABLEAU 4. 1 : LES PROPRIETES THERMO-PHYSIQUES DES PARAFFINES, ALUMINIUM ET L'AIR	97
TABLEAU 5. 1 : SPECIFICATIONS DE L'ALUMINIUM, DE L'AIR ET DE LA PARAFFINE [113].....	145
TABLEAU 5. 2 : LES PROPRIETES DE LA PARAFFINE, DE L'ALUMINIUM, ET DE L'AIR [72], [119], [120]	152

LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES

MCP/ PCM	Matériau à Changement de Phase (Phase Change Material)
ATES	Aquifer Thermal Energy Storage (stockage d'énergie thermique de l'aquifère)
TES	Thermal Energy Storage (stockage d'énergie thermique)
DSC	calorimètre à balayage différentiel
ATG	analyse thermogravimétrique
CFD	C omputational fluid dynamics (la mécanique des fluides numérique)
HTF	fluide de transfert de chaleur
LHTES	stockage d'énergie thermique à chaleur latente
PE	perlite expansée
PV	Photovoltaïques
DIC	Digital Image Correlation (corrélation d'images numériques)
LED	Light-Emitting Diode (diode électroluminescente)
DSC	Differential Scanning Calorimetry (calorimétrie différentielle à balayage)
CSP	centrales solaires à concentration

Nomenclature

T	temps, sec	B	coefficient de dilatation thermique, K^{-1}
P	pression, Pa	ξ	un petit nombre(0.001) pour éviter la division par zéro.
g	accélération gravitationnelle (m/s^2)	μ	viscosité dynamique, $kg/(m \ s)$.
f	fraction liquide	σ	constante de Stefan Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ w}/m^2 \cdot K^4$).
T_{liq}	température du liquide, K ou en $^{\circ}C$	ε	émissivité
T_{sol}	température du solide, K ou en $^{\circ}C$	ν	viscosité cinématique, (m^2/s).
T_p	température de la surface du solide ($^{\circ}C$)	λ	k coefficient de viscosité associé aux changements de volume.
T_{∞}	température du fluide loin de la surface du solide ($^{\circ}C$).	A_{mush}	constante de zone pâteuse. (10^5).
L	chaleur latente absorbée localement	m	la masse, (kg).
K	conductivité thermique $W/(m \ K)$	Cp, s	Chaleur massique du matériau solide [$J/(kg \ K)$].
c_p	chaleur spécifique, $J/(kg \ K)$	Cp, l	Chaleur massique du matériau liquide [$J/(kg \ K)$].
h_s	chaleur sensible		
h_l	chaleur latente		
U	vitesse du fluide (m/s)		
H	enthalpie, J/k		
ρ	masse volumique, (kg/m^3).		

INTRODUCTION GENERALE

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont des matériaux, qui ont la capacité de changer d'état physique dans une plage de température restreinte. Ils ont aujourd'hui une vaste gamme d'emploi de l'industrie énergétique aux applications de stockage thermique, ils sont de plus en plus utilisés dans la climatisation, le refroidissement et la régulation thermique....

L'apparition relativement récente des matériaux à changement de phase a engendré une explosion d'articles scientifiques sur ces nouveaux matériaux dans les domaines de la physique, des matériaux et des énergies renouvelables. Les résultats de ses travaux ont atteint une certaine maturité, ce qui permet maintenant de progresser au niveau applicatif. Cependant, le succès applicatif ne suit que très peu l'explosion des recherches en matériau. En effet, le comportement des MCP peut très difficilement être approximé par un modèle linéaire, comme la plupart de ses concurrents. D'autres règles de commande et de conception sont alors à définir pour que les MCP trouvent leur niche applicative. On peut spécifier plusieurs types de matériaux à changement de phase comme : Les composés minéraux (ou inorganiques), les eutectiques et les composés organiques. Ces derniers ont une position un peu particulière parmi les autres matériaux car ils ont l'avantage d'être thermiquement et chimiquement stables de sorte que lorsqu'ils changent de phase, ils ne provoquent pas de corrosion des matériaux, avec lesquels ils sont en contact et réduisent le risque de fuite. Parmi les MCP organiques, on trouve les paraffines qui sont des cires dérivées du pétrole et les acides gras naturels qui ont connu une avancée importante au niveau de la modélisation et de la caractérisation expérimentale de leurs comportements spécifiques. Cependant, ces matériaux affrontent encore des difficultés par rapport à ses différents besoins qui résident principalement dans le couplage de champ thermique et de champ de fluide. Ce couplage multi-physique entre ces deux mesures permet d'obtenir sur un même point matériel local en même instant des informations, permettant de mieux caractériser l'incompatibilité entre la déformation et le champ des contraintes internes. Ce point directement ou indirectement lié à la microstructure nécessite d'être développé, ceci n'est possible qu'à travers la modélisation du comportement et l'établissement des lois fiables en associant les variables les plus souvent utilisées dans de nombreuses recherches sur ce sujet , ainsi que les méthodes de transfert de chaleur générée lors du chargement.

En combinant toutes ces possibilités, l'évolution de la température, l'enthalpie et la fraction liquide légitime l'étude quantitative des énergies stockées ou libérées lors d'un changement de phase.

Dans ce contexte, le choix d'un modèle de comportement s'offre comme première étape importante qui doit veiller à équilibrer la représentativité physique grâce à la mesure simultanée des champs thermique et fluide, qui délivrent des précieuses informations d'une part, et d'une applicabilité numérique et industrielle d'autre part. On a donc affaire à un couplage thermo-fluide, puisque le changement de phase solide-liquide est provoqué par une variation thermique et la variation de position de liquide (mécaniquement) dans le matériau étudié.

Le travail exposé dans ce manuscrit sera divisé en cinq chapitres.

Le but du premier chapitre de cette thèse consistera à situer les MCP organiques de type paraffine parmi les autres. Une synthèse de l'état de l'art sur les matériaux à changement de phase et leurs utilisations pour le stockage, la production d'énergie thermique dans les secteurs industriels et la production d'électricité. Enfin, on citera quelques domaines d'utilisation des MCP en présentant les fameuses applications faites avec des matériaux à changement de phase.

Le second chapitre sera consacré aux différents modèles thermomécaniques issus de la littérature, à partir duquel nous avons retenu les variables, qui vont constituer le cœur de notre travail.

Après un état de l'art sur les différentes modélisations des MCP, le troisième chapitre présentera la modélisation d'une structure rectangulaire de MCP. Cette modélisation aura pour but de définir les différents modes de transfert de chaleur et ses influences sur le stockage d'énergie thermique dans les MCP. Ainsi la résolution proposée prend en compte les conditions aux limites et la discrétisation spatio-temporelle des équations gouvernantes du modèle thermomécanique proposé.

Le quatrième chapitre sera destiné à la validation du modèle proposé dans le chapitre précédent, afin d'assurer que les résultats issus de la simulation numérique soient concordants avec la réalité. Ensuite, une simulation numérique par le logiciel commercial Ansys Fluent a été effectuée afin d'observer l'effet des différents modes de transfert de chaleur sur le comportement du MCP.

Le cinquième chapitre et le dernier se focalisera sur la conception et l'optimisation des applications de stockage thermique par les matériaux à changement de phase (MCP).

Enfin, nous concluons ce rapport avec une analyse des différents développements réalisés et les futurs travaux à réaliser, en mettant notre part de collaboration dans ce type de matériaux.

Chapitre

CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART DES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE

1.1. INTRODUCTION

Par les temps qui courent, l'énergie solaire représente une partie importante des énergies renouvelables. Pourtant, elle est discontinue, diluée et décalée par rapport à la demande énergétique. Alors pour bien bénéficier de cette source naturelle et inépuisable, il faut développer des dispositifs de stockage d'énergie. Ces dispositifs permettent à l'énergie d'être stockée sous la forme appropriée, qui peut être extraite ultérieurement sous la forme souhaitée en fonction de l'utilisabilité.

En thermodynamique, l'énergie interne (énergie thermique) est l'énergie associée aux formes microscopiques d'énergie [1]. C'est une grandeur importante, cela dépend de la quantité de substance qu'il contient ou de la taille du système. Il s'agit de l'énergie contenue dans le système, à l'exclusion de l'énergie cinétique du mouvement du système dans son ensemble et de l'énergie potentielle du système. Les formes microscopiques d'énergie comprennent celles dues à la rotation, aux vibrations, à la translation et aux interactions parmi les molécules d'une substance. Aucune de ces formes d'énergies ne peut être mesurée ou estimée directement, mais des méthodes ont été développées pour évaluer la variation de la somme totale de toutes ces formes microscopiques d'énergie.

En sus, l'énergie peut être stockée dans les liaisons chimiques entre les atomes qui composent les molécules. Ce stockage d'énergie au niveau atomique comprend l'énergie associée aux états orbitaux des électrons, au spin nucléaire et aux forces de liaison dans le noyau. L'énergie thermique peut également être stockée très efficacement [2].

De nos jours, la situation des marchés de l'énergie est différente. L'augmentation des prix des sources conventionnelles d'énergie et la prise de conscience environnementale ont conduit à augmenter l'utilisation des énergies renouvelables et l'efficacité énergétique.

Le stockage de l'énergie thermique est une technologie qui stocke de l'énergie thermique en chauffant ou en refroidissant un dispositif de stockage, de manière à ce que l'énergie stockée puisse être exploitée plus tard dans divers domaines d'utilisation. Le stockage de l'énergie thermique réduit non seulement l'inadéquation entre l'offre et la demande, mais, il améliore également les performances et la fiabilité des systèmes énergétiques, et il joue un rôle très important dans la conservation de l'énergie.

D'autre part, l'efficacité énergétique permet de rationaliser l'énergie dans les systèmes industriels. En effet, les activités industrielles rejettent de la chaleur «chaleur fatale » perdue par

le procédé. Ces rejets thermiques industriels peuvent récupérer par exemple des fumées de fours dans les industries sidérurgique et verrière, des buées de séchage dans l'industrie papetière ou encore des liquides de refroidissement dans l'industrie chimique. Si les rejets à haute température ($T > 300-400^{\circ}\text{C}$) font souvent l'objet de récupération, via des échangeurs et des circuits de préchauffage, les rejets à basse température inutilisables au moment de leur production sont simplement jetés. Cependant, les rejets thermiques industriels ne peuvent pas être rejetés tels quels dans le milieu extérieur. Par ailleurs, perdre de la chaleur fatale peut en effet coûter doublement plus cher que de la valoriser [3], [4].

Afin de récupérer ce type de chaleur et l'injecter sur d'autres sites, cela demande la collecte de la chaleur, le stockage et le transfert de ce type d'énergie. Ainsi la chaleur peut être utilisée soit sous forme :

- 1) thermique, directement ou indirectement lorsque les niveaux de température sont variés.
- 2) électrique, grâce aux précurseurs thermoélectriques, aux cycles thermodynamiques ou encore thermo-acoustiques.
- 3) mécanique, avec les cycles thermodynamiques.

Enfin, à défaut de pouvoir être utilisée immédiatement au moment de sa production, la chaleur peut aussi être stockée dans des réservoirs de stockage par chaleur sensible, chaleur latente ou thermochimique, en vue d'une valorisation interne ou externe via un transport de cette énergie thermique vers des procédés ou des sites résidentiels et tertiaires. Ce stockage peut avoir lieu au moment de la collecte des rejets thermiques industriels, ou après la variation du niveau de température.

Il existe trois types de stockage thermique : le stockage par chaleur sensible, par chaleur latente et par voie thermochimique. La première méthode permet de stocker la chaleur en élevant la température d'un matériau inerte. La deuxième méthode consiste à utiliser la chaleur latente élevée de la transition de phase d'un matériau, alors que la troisième vise à stocker la chaleur des réactions endothermiques réversibles. Si le stockage par chaleur sensible atteint une maturité assez élevée, notamment lorsque la technologie mise en œuvre est simple, le stockage par la technique thermochimique est continuellement à l'état de recherche et reste encore à un degré de maturité faible. Cependant, le stockage latent a connu un regain d'intérêt avec le développement des centrales solaires [5]. Dans la suite, nous détaillerons chaque type du stockage de chaleur.

1.2. LE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE THERMIQUE

Le stockage d'énergie est capable de fournir une alimentation de secours qui présente un grand intérêt pour les clients résidentiels ainsi que pour les propriétaires d'entreprise. En effet, le choix du type du stockage de l'énergie est en fonction de la durée du stockage et de la température désirée. En outre, la capacité à supporter des très hautes températures et l'inertie thermique présentent des coefficients indispensables pour les matériaux du stockage de l'énergie. Par conséquent, les techniques du stockage de l'énergie thermique sont illustrées sur la figure 1.1.

Figure 1. 1 : Les différentes techniques du stockage de l'énergie thermique

1.2.1. Stockage sensible

Dans le cas des systèmes de stockage par chaleur sensible, l'énergie est stockée ou libérée en chauffant ou en refroidissant un liquide ou un solide sans changement de phase. C'est le moyen le plus commun de réutiliser la chaleur stockée qui accroît avec l'augmentation de la température du moyen de stockage [6]. Ce type de stockage emmagasine une quantité de chaleur proportionnelle à sa masse et à sa capacité calorifique comme a été exprimée par l'équation (1.1) :

$$Q_{sensible} = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (1.1)$$

Q_{sensible} : L'énergie stockée [J]

m : La masse du matériau [kg]

c_p : Chaleur massique du matériau utilisé [J/ (kg.K)]

ΔT : La différence de température [K] entre un état initial et un état final.

Dans cette méthode du stockage, le matériau utilisé se présente soit sous forme liquide, soit sous forme solide, soit les deux.

1.2.1.1. Stockage sensible dans les solides :

Les systèmes de stockage sensible dans les solides nécessitent des matériaux emballés sous forme de lit granulaire ou matriciel fixe. L'échange de chaleur est réalisé via un fluide caloporteur qui transfère sa chaleur via un échangeur de chaleur qui traverse directement le matériau de stockage poreux. Dans ce cas, le réservoir du stockage s'appelle un régénérateur.

Dans les dernières années, différents systèmes du stockage sensible dans les solides à basse température ont été proposés. Par exemple, une méthode qui consiste à stocker l'énergie directement dans le sol, c'est le principe des sondes géothermales ou stockage thermique inter-saisonnier (Figure 1.2).

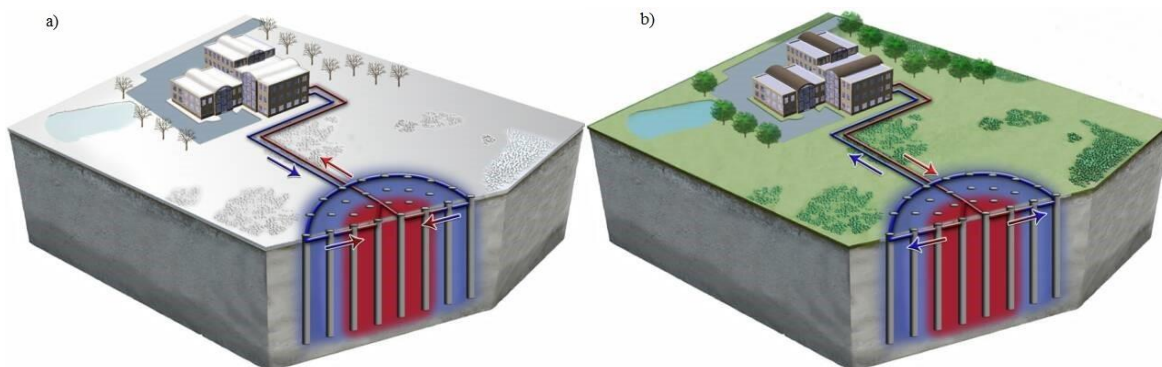


Figure 1. 2 : système UTES ou BTES réversible (borehole thermal energy storage) ;
a) principe de fonctionnement en hiver, b) en été.

Ce type de projets considère un stockage en aquifère (ATES : Aquifer Thermal Energy Storage). Dans ce cas, le stockage et la récupération de l'énergie thermique sont réalisés par extraction et injection des eaux souterraines des aquifères à l'aide de puits souterrains. L'aquifère est un corps de roches perméables comportant une zone saturée suffisamment conductrice d'eau souterraine pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage de quantité d'eau appréciable), comme celui du siège du parlement Allemand à Berlin, ce projet couvre 12 % des besoins annuels en chaleur et 60 % des besoins annuels en froid.

D'autres systèmes privilégient le stockage dans des réservoirs de roche (la cofalit, la plasmalit), ou de déchets vitrifiés. Le principe est le suivant : le fluide caloporteur chaud circule à travers le matériau solide et cède de l'énergie à celui-ci. Pour récupérer l'énergie stockée, il suffit de faire passer le fluide caloporteur froid dans l'autre sens.

Dans le cas des sondes géothermiques, le matériau du stockage est le sol lui-même. L'emplacement du système de stockage est donc choisi en fonction des propriétés géothermiques de son sol. Le solide le plus utilisé est le béton par son faible coût, sa facilité d'usage et sa disponibilité, ses propriétés de résistance mécanique et surtout sa capacité calorifique élevée.

1.2.1.2. Stockage sensible dans les fluides

L'eau présente le fluide le plus utilisé grâce à son faible prix et de sa très bonne capacité thermique massique. Pratiquement, le réservoir est composé d'un piquage haut et d'un piquage bas. En injectant le fluide chaud par le haut, le fluide froid situé en partie basse du réservoir est évacué. A l'inverse, en réinjectant du fluide froid situé en partie basse, le fluide chaud situé en partie haute va être récupéré en sortie.

La complexité de l'installation consiste à ne pas briser en injectant du fluide. Ces systèmes de réservoirs sont appelés « réservoir thermocline ». Le gradient entre la couche chaude et la couche froide dépend des propriétés du matériau du stockage ainsi que des débits du fluide caloporteur circulant dans le système du stockage[7].

Lorsqu'on utilise un régénérateur, c'est-à-dire lorsque le matériau du stockage est une matrice solide dans laquelle circule un fluide caloporteur, il est possible d'obtenir une stratification thermique plus grande sur une plus petite hauteur du réservoir grâce aux propriétés d'inertie thermique de la matrice solide et de réduire ainsi les volumes de stockage.

Il existe par ailleurs des systèmes de stockage thermique liquide où le chaud et le froid sont stockés dans deux réservoirs différents, dans ce cas les volumes de stockage sont multipliés par deux. C'est le cas dans certaines centrales solaires à concentration, comme Solar Two aux Etats-Unis[8].

Dans la catégorie des liquides, on trouve les sels fondus, les huiles minérales ou synthétiques, ou plus communément l'eau utilisée notamment dans les ballons d'eau chaude.

1.2.1.3. Technologies hybrides du stockage sensible.

Des techniques hybrides se développent, elles utilisent à la fois des matériaux solides et liquides comme moyen de stockage. C'est le cas par exemple du stockage en huile et roche pour les

centrales solaires thermodynamiques. L'huile étant coûteuse, le réservoir est rempli de roches qui présentent une même densité volumique de stockage que l'huile. Une fois que les roches sont intégrées dans la cuve, le mode opératoire est le même que celui des TTES : L'huile chaude est injectée en partie haute pendant la charge et l'injection d'huile froide en partie basse pendant la décharge va pousser l'huile chaude en sortie tout en permettant à l'huile froide de se réchauffer au contact des roches chaudes. C'est la technologie mise au point et proposée par Alsolen (Groupe Alcen), dite à contact direct huile/roche et qui repose sur le phénomène physique de la thermocline.

Notons toutefois que l'énergie stockée par chaleur sensible est soumise parfois à des pertes thermiques importantes du fait de la mauvaise implantation, de l'isolation ainsi que de la longue durée des systèmes de stockage. Ce mode de stockage nécessite aussi des systèmes très volumineux. Il est donc nécessaire de bien choisir le système et sa dimension afin d'accroître leurs performances [9].

1.2.2 Le stockage par chaleur latente.

La chaleur latente également appelée enthalpie de fusion (changement de phase solide-liquide) ou enthalpie de vaporisation (changement de phase liquide à vapeur). Ce mode de stockage permet de stocker l'énergie par chaleur latente à une température constante qui correspond à la température du changement de phase ou changement d'état physique. Le changement d'état à température constante permet essentiellement de régler la température dans les applications de chauffage ou de climatisation des bâtiments [10]. L'énergie massique stockée s'écrit de la manière suivante :

$$Q_{latente} = m \cdot L \quad (1.2)$$

Où L : capacité de stockage du matériau utilisé [J/kg].

C_p : Chaleur massique du matériau utilisé [J/(kg K)].

Lorsque le matériau est chauffé, il emmagasine d'abord une quantité de chaleur sensible qui lui permette d'aboutir la température du changement de phase. La chaleur est accumulée de façon isotherme pourvu que le corps soit pur sous forme de chaleur latente. Quand la transformation devient complète, la température accroit de nouveau proportionnellement à l'énergie apportée jusqu'à atteindre la température de la source de l'énergie thermique.

La quantité de chaleur stockée dans un système latent est présentée sur le graphe de température :

Figure 1. 3 : Graphe de la température-enthalpie présentant le processus du stockage dans un système thermique.

La quantité d'énergie stockée (Q) peut être exprimée pour le cas de la transition solide-liquide selon l'équation :

$$Q = \int_{T_{initial}}^{T_{fusion}} m C_{p,s} dT + mL + \int_{T_{fusion}}^{T_{final}} m dT \quad (1. 3)$$

La possibilité d'introduire ce mode de stockage est un verrou fondamental dans la problématique du chauffage et de la climatisation des bâtiments notamment. En effet, le recours à ce type de stockage dans le bâtiment permet de maintenir une température quasi-constante à l'intérieur d'une pièce et en cas de besoin l'énergie stockée sera libérée.

1.2.3. Stockage thermochimique

La troisième façon de stocker l'énergie thermique consiste en l'utilisation de l'énergie endothermique des réactions chimiques réversibles. La chaleur de réaction qui est stockée est souvent associée à la dissociation des réactifs chimiques en deux composants. La récupération d'une partie ou la totalité de l'énergie stockée peut être réalisée par la réaction de synthèse suivante :



Avec A est le réactif solide ou liquide, B et C sont les produits sous forme gaz, liquide ou solide et ΔHr est la chaleur de réaction en J/mol.

Les produits de la réaction peuvent être conservés à température ambiante. S'ils sont isolés, ils ne subiront pas ou peu de détérioration chimique.

Dans le cas du stockage « sensible » et « latent », les pertes thermiques entraînent inévitablement le système dans son état initial déchargé.

Le stockage thermochimique est peu contraint par la durée du stockage, de ce fait, il est particulièrement consacré à du stockage longue durée. Le système du stockage peut se présenter sous la forme d'un réacteur à lit fluidisé dans le cas où la réaction se fait avec un gaz. De plus, dans ce type de stockage, les produits obtenus sont stockés afin d'être utilisés ultérieurement et ce système est favorable au stockage inter-saisonnier.

1.2.4. Autres systèmes du stockage existant.

1.2.4.1. Le stockage sous forme d'énergie cinétique.

Depuis l'antiquité, le principe du volant d'inertie permet de stocker de l'énergie sous forme cinétique. Il était utilisé par les potiers mésopotamiens. Le stockage consiste à entraîner une masse à haute vitesse. L'énergie stockée est par la suite récupérée en freinant la masse en mouvement lors du déstockage. Ce genre de système est historiquement utilisé pour la régulation des moteurs thermiques (de locomotive à vapeur par exemple). Toujours dans le domaine du transport, des volants d'inertie permettent de stocker l'énergie lors du freinage de véhicules pour la redistribuer lors du démarrage, comme c'est le cas en formule 1 depuis 2009. Il est ainsi possible de stocker directement de l'énergie mécanique ou de stocker de l'électricité à l'aide d'un moteur électrique particulier qui est utilisé comme génératrice lors du déstockage. La capacité mondiale installée est estimée à un peu moins de 25 MW pour le stockage électrique [11].

1.2.4.2. Le stockage sous forme d'énergie potentielle.

Les stations de pompage permettent de stocker de l'électricité sous forme d'énergie potentielle de l'eau. Lors du stockage, l'eau est pompée depuis un réservoir inférieur vers un réservoir supérieur augmentant ainsi son énergie potentielle. Elle revient ensuite à son point de départ à travers une turbine pour produire de l'électricité. Ce mode de stockage de l'électricité est le plus répandu qui produit au moins de 127 GW de capacité installée dans le monde, soit environ 99 % de la capacité totale mondiale du stockage électrique [12].

1.2.4.3. Le stockage sous forme d'énergie interne.

Il est aussi possible de stocker de l'électricité sous forme d'énergie interne en comprimant de l'air qui est après stocké dans des cuves ou dans des cavités naturelles (anciennes mines de sel, ancien réservoir de gaz naturel). On récupère ensuite l'énergie par une turbine de décompression. La capacité mondiale installée pour cette méthode du stockage est environ de 440 MW.

Comme nous venons de voir, il existe une multitude de solutions pour stocker de l'énergie. Le choix d'une de ces solutions va dépendre de plusieurs paramètres, notamment la nature de l'énergie qui doit être stockée (mécanique, électrique, thermique) [13].

La suite du travail va se focaliser sur l'intégration des matériaux à changement de phase pour le stockage de l'énergie thermique. Le fluide caloporteur visé est l'eau liquide, la vapeur étant de moins en moins utilisée.

1.2.5. Comparaison entre les différentes techniques du stockage cité.

En première approche, l'ordre de grandeur de la densité énergétique des systèmes par changement de phase est trois fois plus important que les systèmes sensibles. Cependant, la densité énergétique des systèmes thermochimiques est cinq fois plus importante que les systèmes par changement de phase.

Le potentiel des systèmes de stockage thermochimique est intéressant du fait de ses nombreux avantages : une densité de stockage supérieure aux autres technologies présentées, un temps de stockage infini et un transport simplifié. L'inconvénient de ce type de stockage réside dans la réalisation d'un procédé continu pour le stockage ou le déstockage. Par ailleurs, de par sa grande densité énergétique, le stockage thermochimique est prometteur mais n'est pour l'instant envisagé qu'à l'échelle du laboratoire étant donné la complexité de mise en œuvre. De nombreuses recherches sont en cours pour développer de tels systèmes.

Aujourd'hui, seuls les systèmes sensibles sont matures industriellement. Ils prennent leur sens dès lors que la différence entre les températures du travail (chaude/froide) est conséquente. Pour limiter les pertes thermiques, ces systèmes doivent être massifs (faible rapport surface/volume)[14], [15].

Le stockage sensible demande encore un effort de recherche et du développement pour améliorer la tenue des matériaux et les aspects corrosion, ou augmenter la stratification thermique dans les réservoirs.

Le stockage sensible présente une densité énergétique variant de 52 à 76 kWh/m³ pour les matériaux sélectionnés (sable – roche – huile minérale, béton renforcé, eau, huiles minérales, nitrates de sels fondus) leur caractère corrosif limite par ailleurs leur utilisation.

Cependant, le mode de stockage sensible nécessite des grands volumes du stockage. Ces volumes peuvent ainsi être réduits en utilisant les MCP (stockage latent), ce qui implique une diminution des coûts et constitue un premier avantage en comparaison avec le stockage sensible. Un autre avantage réside dans la restitution de la chaleur à température constante. En effet, la quantité d'énergie stockée et restituée dépend uniquement de la masse du matériau et de sa chaleur latente. En simplicité, avec les MCP, la chaleur est restituée à la température de fusion du matériau. Ainsi, les MCP présentent l'avantage de pouvoir aussi être utilisés comme des matériaux du stockage sensible. Une fois qu'ils sont fondus, lorsque leur température de dégradation est suffisamment élevée par rapport au point de fusion, le matériau peut en effet être monté en température en

stockant ainsi une part de chaleur sensible non négligeable. Ainsi, on retiendra que le stockage dans les MCP fait son émergence à l'échelle du démonstrateur et il présente les avantages de réduire les volumes du stockage ainsi que les coûts. De plus, la restitution de la chaleur à température constante permet de simplifier son utilisation et de garantir une qualité d'énergie indépendante du gradient de température entre le fluide caloporteur et le matériau du stockage. Pour toutes ces raisons, c'est le système du stockage qui est sélectionné dans le cadre de cette thèse. Le stockage par chaleur latente est une technique très efficace en raison de la forte densité du stockage thermique des matériaux à changements de phase (MCP). Le tableau 1.1 présente une comparaison et un compromis entre le stockage d'énergie par la chaleur sensible, la chaleur latente et thermochimique.

<i>Chaleur Sensible</i>	<i>Chaleur Latente</i>	<i>Réaction Chimique (stockage physico-chimique)</i>
Solides, Liquides	Solide-Liquide, Solide-Solide (NaOH α - β à 297°C)	Solide-Gaz, Liquide-G, Gaz-Gaz
Faibles capacités H ₂ O de 0 à 100°C : 420 J/g <i>Très simple</i>	Fortes capacités H ₂ O de Liquide à Gaz : 2200 J/g <i>Simple</i>	Très fortes capacités H ₂ O \rightleftharpoons H ₂ + ½ O ₂ : 13000 J/g Séparation des produits : <i>Technologie complexe</i>
Température variable	Température fixe	Température fixe
Pas d'activation	Faible Conduction – Surfusion	Fortes Energies d'activation
Pertes thermiques	Pertes thermiques	Aucune perte thermique
Bon marché	Cher	Très Cher Expérimental
Appliquée Longue durée de vie	Appliquée courte durée	(sera viable si ρ (densité) > 99.99%)

Tableau 1. 1 : Stockage Thermique : Comparatif et Compromis

1.2.6. Principe du stockage par chaleur latente.

L'intérêt de la chaleur sensible est de pouvoir stocker directement le fluide caloporteur dans un grand volume. Pour stocker la chaleur sensible de façon indirecte, un fort gradient de température est nécessaire. Une solution pour gagner de la place et réduire l'intervalle de température du stockage est d'utiliser la chaleur latente. Dans ce mode de stockage, la chaleur est emmagasinée dans une gamme de température autour du point de fusion ou de vaporisation d'un matériau appelé matériau à changement de phase. Plus la gamme de température est petite, plus la part d'énergie stockée par le changement d'état est importante. Le stockage est efficace à la condition que l'ensemble du matériau change d'état.

Dans la littérature, plusieurs chercheurs ont étudié les propriétés thermo physiques des MCP, ils ont proposé différentes classifications qui dépendent du type de matériau, de conductivité et de

chaleur latente. Gil et al. [16] dressent un tableau (Tableau 1.2) regroupant les propriétés thermophysiques moyennes des grandes catégories de matériaux à changement de phase. Il est possible d'utiliser du métal, de la roche, de l'eau, des paraffines ou des matériaux qualifiés d'organiques (fabriqués par les êtres-vivants) ou de non organiques. On retrouve régulièrement le facteur 100 entre la capacité calorifique et la chaleur latente. En regardant la dernière colonne et sans parler de température de fusion, on remarque que les matériaux organiques, non organiques et les paraffines sont des bons candidats en terme de masse nécessaire pour stocker une même quantité d'énergie.

Matériaux	Densité (kg/m ³)	Conductivité thermique (W/(m.K))	Capacité calorifique (J/(kg.K))	Chaleur latente (J/kg)	Masse pour stocker 1 GJ (tonnes)	Masse de stockage relative
Métal	8940	400	385	205 000	173 ($\Delta T = 15K$)	40
(cuivre)	2240	1.5	1000	-	67 ($\Delta T = 15K$)	15
roche	1000	0.6	4200	330000	16 ($\Delta T = 15K$)	4
Eau						
MCP	800	1	2000	190000	5,3	1.25
organique	900	0.2	2000	170000	5	1.15
Paraffine					4,35	
MCP	1600	2	2000	230000		1
inorganique						

Tableau 1. 2 : Matériaux pour le stockage thermique à chaleur latente

Les effets de stockage latent associés au changement de phase et la quantité de chaleur ajoutée ou retirée d'une substance sont importants. Cette énergie décompose les forces d'attraction intermoléculaires, doit également fournir l'énergie nécessaire à l'expansion de la substance. Ainsi lorsque la chaleur latente est ajoutée, aucun changement de température ne se produit.

La suite du travail va se focaliser sur l'intégration des matériaux à changement de phase dans les systèmes du stockage d'énergie thermique. Dans un premier temps, les familles de MCP ainsi que les propriétés qui distinguent un MCP d'un autre sont présentées. Ensuite les différentes technologies d'échangeurs sont décrites. Enfin, les nombreux systèmes qui permettent d'améliorer les performances thermiques de l'ensemble « échangeur + MCP » sont listés.

L'accent sera mis sur les différents MCP, sur les technologies d'échangeurs de chaleur et sur les méthodes d'amélioration des performances thermiques dans le MCP. Car c'est sur ce dernier point que le travail de thèse est focalisé pour développer un modèle qui fera l'objet du troisième chapitre.

1.3. LE STOCKAGE THERMIQUE PAR MCP.

Un système de stockage d'énergie par changement de phase est composé d'un échangeur de chaleur, d'un MCP et d'un fluide caloporteur. Ce sont les trois éléments principaux qui constituent le système.

- les matériaux à changement de phase ou matériaux du stockage, «MCP ».
- l'échangeur de chaleur est un système qui permet de transférer de l'énergie thermique d'un fluide vers un autre sans les mélanger
- Le fluide de travail ou fluide caloporteur peut-être :
 - *Soit de l'eau*, peut être utilisée comme un fluide caloporteur intéressant, car elle est utilisable sur une plage de température étendue et qui dispose d'un avantage de capacité de stockage lors de son changement de phase. Aussi de son faible coût.
 - *Soit du sel fondu*, peut être utilisé en ajoutant alors un étage d'échangeur supplémentaire pour générer de la vapeur.
 - *Soit de l'air chaud pressurisé*, utilisé directement dans un groupe turbo-alternateur à gaz.

Dans le cadre de cette thèse, le choix d'une configuration d'échangeur de chaleur sera présenté ultérieurement selon les applications utilisées et les modes de fonctionnement (chargement et déchargement).

1.4. REPERES HISTORIQUES POUR L'UTILISATION DES MCP.

L'histoire du MCP est très ancienne, où la glace a été utilisée pour stocker l'énergie thermique et pour refroidir les aliments au moyen âge. Toutefois, l'utilisation réelle des MCP est développée dans l'année 1949 par Maria Telkes, ingénieure hongroise qui conçoit une maison solaire à Boston aux Etats Unis, dans laquelle un système de chauffage utilisant les MCP soit intégré [17]. Ce système permettait de stocker l'équivalent de 12 jours de chauffage et il a relativement bien fonctionné durant 2 saisons de chauffage. Ensuite, le fonctionnement a été altéré à cause de la séparation et de la déshydratation du sel. Par conséquent, Maria Telkes ainsi que nombreux chercheurs ont orienté leurs recherches sur l'encapsulation et la stabilisation des MCP.

En parallèle, à partir des années 1940, les industries alimentaires ont commencé à comprendre l'intérêt des MCP pour la conservation de la nourriture pendant le transport et le stockage. Pour cette application, les MCP ont été encapsulés dans du métal. Les héritiers directs de cette technologie sont les accumulateurs du froid que chacun a déjà placés dans sa glacière. Ces

accumulateurs sont composés d'un gel eutectique, c'est-à-dire un mélange de 2 corps purs protégé par une enveloppe rigide en polyéthylène.

Au milieu des années 1950, les MCP ont été utilisés avec succès pour stocker l'électricité, aussi des accumulateurs de froids constitués de sels à basse température de fusion sont utilisés à stocker les produits pharmaceutiques. Au cours des années 1960, la NASA a développé des microbilles encapsulées de MCP pour protéger les astronautes des variations extrêmes de températures de l'espace. Au cours des années 1980, les matériaux à changement de phase ont été pris en compte pour le stockage thermique des bâtiments.

Dernièrement, dans les années plus tard, les MCP ont été intégrés presque dans tous les domaines industriels.

1.4.1. Les matériaux à changement de phase.

A partir de l'étude bibliographique, les matériaux à changement de phase (MCP) sont des substances qui captent et restituent des quantités importantes de chaleur au cours du processus de changement de phase à une certaine température caractéristique de chaque matériau.

On trouve principalement des cires de paraffine, des acides gras et des sels hydratés de chlorure de sodium ou de potassium.

Ce sont des matériaux capables de stocker ou restituer l'énergie sous forme de chaleur latente, lorsque la température augmente ils se liquéfient en absorbant la chaleur et ils la libèrent quand la température décroît. Par conséquent, plus la chaleur latente du MCP par unité du volume est grande plus les caractéristiques du stockage et déstockage de la chaleur seront intéressantes. D'où le principal intérêt de la chaleur latente par rapport à la chaleur sensible est la plus grande quantité d'énergie stockée dans le même volume de matière.

1.4.2. Critère de sélection d'un bon MCP

La sélection d'un bon matériau à changement de phase pour une application donnée dépend de plusieurs propriétés :

➤ *Propriétés thermo-physiques :*

Ces propriétés permettent de tirer profit de ce processus : «La fusion absorbe de l'énergie donc refroidit l'air ambiant. Au contraire, la solidification restitue cette énergie ».

En effet, la chaleur est une mesure de l'activité interne des molécules. Au-dessus du zéro absolu ($-273,15\text{ °C}$) toutes les molécules se déplacent, vibrent et oscillent. Ce que nous appelons « température » est une mesure de ces mouvements. Plus la température augmente, plus les molécules n'ont tendance à se déplacer.

La fusion est un processus qui stocke de l'énergie et pour fondre un matériau doit avoir certaines de ses liaisons moléculaires brisées et cela nécessite un apport d'énergie. Au contraire, lors de la solidification, le matériau relâche un surplus d'énergie, ce qui fait que ses molécules se déplacent moins et peuvent ainsi recréer des liaisons. Durant le changement de phase, la température reste constante. Afin de garder une température constante quel que soit la saison de l'année, nous avons intégré un module prenant en compte le changement de phase, une technique destinée à considérer des propriétés physiques idéales :

- ✓ La densité du MCP est élevée, afin que la densité énergétique soit élevée, ce qui permet de réduire les volumes du stockage.
- ✓ L'expansion volumique lors du changement de phase est faible afin de limiter les surpressions et les risques de fuite dans le réservoir. L'expansion volumique est souvent de l'ordre de 10 % pour les MCP. Cette expansion volumique peut cependant être favorable aux transferts thermiques, notamment à la charge.
- ✓ La pression de vapeur saturante doit être faible pour limiter les risques de vaporisation. En effet, si la pression de vapeur saturante est trop élevée, un ciel gazeux en surpression devra être mis en place dans le réservoir du stockage pour éviter la perte du produit par vaporisation.
- ✓ Le produit présente une fusion/solidification congruente : les différentes phases présentent un équilibre favorable et ne se séparent pas au fur et à mesure des cycles, ce point est sensible pour les hydrates de sels.
- ✓ Une faible variation du volume lors du changement de phase pour le dimensionnement du stockage et sa tenue à la pression.
- ✓ Pendant la congélation, il ne doit y avoir que peu ou pas de surfusion
- ✓ Une faible pression de vapeur
- ✓ Une grande masse volumique pour que le MCP puisse réaliser un stockage suffisant dans le volume le plus faible possible.

➤ **Propriétés thermiques :**

Il est également important de mentionner les propriétés thermiques, il s'agit de choisir un équilibre thermique pour un système de stockage efficace et pour une méthode d'amélioration des performances thermiques dans les MCP.

Parmi les propriétés thermiques idéales :

- ✓ Le point de fusion/solidification se situe dans la plage de fonctionnement du procédé.
- ✓ Le MCP a une grande chaleur latente de fusion afin qu'une petite quantité du matériau stocke une grande quantité d'énergie. Cette valeur est essentielle pour obtenir une grande densité énergétique du stockage exprimée en J/m^3 (kWh/m^3) ou J/kg (kWh/kg).
- ✓ Une capacité calorifique élevée fournit un effet supplémentaire du stockage de chaleur sensible.
- ✓ Le MCP présente une grande conductivité thermique, de sorte que le gradient de température entre le fluide caloporteur et la température de fusion est faible. Cette valeur est déterminante quant à la puissance échangée dans le système de stockage aussi bien en charge qu'en décharge. Pour la majorité des MCP, la valeur de la conductivité thermique ne dépasse pas $0.5 W/(m.K)$.

➤ *Propriétés chimiques :*

La problématique consiste à analyser les propriétés cinétiques, en effet le matériau ne présente pas de surfusion pour que la chaleur stockée puisse être restituée à la même température que la température de stockage. La surfusion est la capacité du MCP à descendre sous le point de cristallisation tout en restant sous forme liquide. Il s'agit d'un état métastable qui est rompu soit par une perturbation extérieure (choc, impureté), soit par abaissement de la température jusqu'au point de nucléation, c'est-à-dire lorsque le premier germe de solide apparaît. Ainsi, si cette surfusion est assez importante, la chaleur est restituée à une température plus faible que la température du stockage. Il est remarqué dans la littérature qu'un degré de surfusion de $5-10\text{ }^\circ\text{C}$ peut aller jusqu'à empêcher la décharge du système de stockage [18]. Par ailleurs, la vitesse de cristallisation est déterminante pour la puissance du système de stockage. Si le produit est long à cristalliser, il rendra sa chaleur très lentement et limitera la puissance échangée avec le fluide caloporteur. Les propriétés cinétiques idéales recherchées sont donc :

- ✓ Non inflammable, non explosif et non toxique.

- ✓ Stabilité chimique avec le temps.
- ✓ Compatibilité avec les conteneurs des matériaux.
- ✓ Aucune décomposition chimique.
- ✓ pas d'effet de surfusion.
- ✓ un taux de cristallisation suffisant.

➤ **Propriétés économiques :**

Le MCP peut présenter en plus des caractéristiques thermo-physiques et chimiques idéales, il présente aussi des caractéristiques économiques intéressantes pour rivaliser avec le stockage sensible dans l'industrie [19]. Les caractéristiques économiques sont regroupées comme suit :

- ✓ Le coût du MCP est faible.
- ✓ Il est disponible et abondant.
- ✓ Son coût de fabrication est moindre et n'impacte pas l'environnement. Idéalement, le MCP provient d'un procédé bio-sourcé et est un co-produit d'une unité de production encore non valorisé.

Cependant, l'utilisation des MCP ne se limite pas uniquement aux propriétés citées, mais aussi à leurs types. Il convient de détailler les catégories de MCP existants et de mettre en évidence les avantages et les inconvénients de chacune.

1.5. LES TYPES DE MCP :

Les MCP peuvent être classés en trois groupes principaux : organiques, inorganiques et eutectiques. Les MCP organiques comprennent les paraffines, les acides gras et les alcools. Les matériaux inorganiques comprennent les hydrates de sels, les sels et les métaux. Certains de ces matériaux peuvent également être combinés pour former des compositions eutectiques. (Voir la figure 1.4 ci-dessous)

Figure 1. 4 : les types des matériaux à changement de phase

1.5.1. Les corps inorganiques :

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

1.5.1.1. Sels hydratés

Les sels hydratés font partie des MCP du stockage de chaleur les plus anciens et les plus étudiés [20]. Ils se composent d'un sel et d'eau, qui se combinent dans une matrice cristalline lorsque le matériau se solidifie. Ils peuvent être utilisés seuls ou en mélanges eutectiques. Les sels hydratés constituent le groupe le plus important de MCP, ils ont été largement étudiés pour leur utilisation dans les systèmes du stockage d'énergie thermique à chaleur latente.

Le faible coût et la disponibilité facile des hydrates de sel rendent le commerce attractif pour les applications de stockage de chaleur. Les sels hydratés les moins chers et les plus disponibles sont $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ et $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ [20]. Ils ont un point de fusion précis, ce qui optimise l'efficacité d'un système du stockage de chaleur. Ils ont une conductivité thermique élevée par rapport aux autres MCP à accumulation de chaleur. Ils ont une capacité importante du stockage d'énergie thermique ce qui permet de diminuer les dimensions des systèmes du stockage. Par conséquent,

plusieurs chercheurs ont étudié les propriétés de ce type de MCP ainsi que ses avantages et ses inconvénients. Abhat [21] a montré que la diminution de la chaleur de fusion des hydrates de sel est apparue après des centaines de cycle de fusion/solidification, ses recherches ont montré aussi la surfusion dans ces types de matériaux parce qu'ils ne peuvent pas commencer la cristallisation au point de solidification du MCP. Alors, il est nécessaire de concevoir des conteneurs pour contenir le matériau sans laisser sortir l'eau. Un autre problème des hydrates de sel est leur tendance à provoquer de la corrosion dans les conteneurs métalliques les plus couramment utilisés dans les systèmes de stockage thermique. La compatibilité du MCP et du conteneur doit toujours être vérifiée avant utilisation.

1.5.1.2. Matériaux métalliques

Les MCP métalliques sont des matériaux inorganiques, ils se caractérisent par une conductivité thermique extrêmement élevée et des comportements de transition de phase nets et bien définis qui répondent aux exigences cruciales des systèmes du codage à barres et du stockage de données optiques à très haute capacité [22]. Cependant, la forte densité de métaux héritée peut toujours présenter des restrictions sur les MCP métalliques dans les applications sensibles au poids. Leur chaleur latente est très élevée, mais ils sont plus coûteux que les autres MCP, de plus, ils présentent aussi des problèmes de corrosion. Les quelques MCP envisagés sont le gallium ou encore le plomb-bismuth.



Figure 1. 5 : un exemple de MCP métallique.

Le gallium fond sous l'effet de la chaleur de la main, il a un point de fusion moins de 29,7 degrés celsius, ce qui contribue de manière significative à son application à des températures voisines de la température ambiante.

Les métaux qui n'étaient pas auparavant considérés comme faisant partie des MCP en raison de leurs points de fusion relativement élevés, ont récemment bénéficié de la nanotechnologie, ce qui les a rendu beaucoup plus viables.

1.5.2. Les corps organiques :

Les matériaux ou les substances organiques ont une plage de températures comprise entre 0° C et 150°C. Les plus exploitées sont principalement à base de paraffine, des acides gras et des alcools de sucre [22].

1.5.2.1. Paraffines

Les paraffines sont des substances organiques dont la formule générale est C_nH_{2n+2} , elles sont une famille d'hydrocarbures saturés aux propriétés très similaires. Les paraffines situées entre C_5H_{12} et $C_{15}H_{32}$ sont des liquides, au-delà de $C_{15}H_{32}$ elles sont solides sous formes de cires. La cire de paraffine est le MCP organique le plus utilisé dans le commerce. Il est composé principalement d'hydrocarbures à chaîne droite avec des températures de fusion peuvent atteindre jusqu'à 100°C. La cire de paraffine de qualité commerciale est obtenue par distillation du pétrole et n'est pas une substance pure, mais une combinaison de différents hydrocarbures. Elles sont également chimiquement stables et elles ne montrent aucune tendance à la ségrégation. Sharma [18] a montré que les propriétés de la paraffine de qualité commerciale restent stables après 1500 cycles. Les paraffines présentent des chaleurs de fusion élevées, elles sont compatibles avec tous les conteneurs en métal et s'intègrent facilement dans les systèmes du stockage de chaleur. Des précautions doivent toutefois être prises lors de l'utilisation des contenants en plastique, car la paraffine a tendance à s'infiltrer et à ramollir certains plastiques.

Les paraffines ont un grand volume du changement entre les phases solides et liquides. Cela pose de nombreux problèmes dans la conception des conteneurs. Lane [23] signale également que les paraffines peuvent se contracter suffisamment pour se détacher des parois du conteneur de stockage, ce qui réduit considérablement la capacité du stockage de chaleur. Contrairement aux hydrates du sel, les paraffines commerciales n'ont généralement pas de points de fusion nets et bien définis. Le Tableau 1.3 ci-dessous indique les propriétés de paraffines pures solides sous forme de cires [24]:

NOM	POINT DE FUSION (°C)	DENSITE (kg/m3)	CHALEUR LATENTE (J/g)
$C_{16}H_{34}$	18,2	774	238
$C_{17}H_{36}$	22	778	215
$C_{18}H_{38}$	28,2	814^S-775^L	245
$C_{19}H_{40}$	31,9	912^S-769^L	222
$C_{20}H_{42}$	37	nd.	247
$C_{21}H_{44}$	41	nd.	215
$C_{22}H_{46}$	44	nd.	249

Tableau 1. 3 : les propriétés des paraffines pures solides sous forme de cires

1.5.2.2. Acides gras

Les acides gras sont des MCP organiques, ils sont caractérisés par la formule chimique $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$, ils ont à peu près les mêmes caractéristiques que les paraffines.

Nom	Température de fusion (°C)	Chaleur latente (J/g)
Acide oléique	13,5-16,3	n.a.
Isopropyle stéarate	14-19	140-142
Butyle stéarate	19	140
Diméthyle sabacate	21	120-135
Vinyle stéarate	27-29	122
Méthyle palmitate	29	205
Acide caprique	32	152,7

Tableau 1. 4 : Température de fusion et chaleur latente pour quelques acides gras

Leurs avantages de transformations de phase sont compensés par l'inconvénient d'environ trois fois le coût des paraffines. Ils sont également légèrement corrosifs. Quelques acides gras d'intérêt à basse température [25]. Le tableau 1.4 ci-dessous indique la chaleur latente et la température de fusion pour quelques acides gras.

1.5.2.3. Alcools de sucre

Le MCP doit être disponible à faible coût et en grande quantité pour permettre une utilisation économique dans les applications du stockage. Les hydrates de sel et les alcools de sucre ont des densités comparativement élevées et par conséquent, des densités du stockage volumétriques élevées. La surfusion et la séparation de phases peuvent être un inconvénient. Les alcools de sucre, le xylitol et l'érythritol indiquent une température de fusion dans la plage de température souhaitée, tandis que le chlorure de magnésium hexahydraté (MCHH) est un potentiel hydrate de sel. Dans la plage de température souhaitée, il existe plus de MCP potentiels, par exemple $(\text{NH}_4)\text{Al}(\text{SO}_4)\cdot 12\text{H}_2\text{O}$; $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; 33% LiNO_3 + 67% KNO_3 et quelques-uns paraffines), mais étant donné qu'ils sont par exemple inflammables, toxiques ou très corrosives, ils seraient défavorables aux conteneurs du stockage mobiles sur la route.

Il existe plusieurs études concernant les propriétés de l'érythritol. price et al. [26] ont établi une très faible hygroscopicité pour la manipulation du MCP dans des conditions ambiantes. Kaizawa et al. [27] ont déterminé une température de décomposition de 160 ° C, qui est la température limite pour l'utilisation de l'érythritol comme matériau du stockage de l'énergie thermique. Ismail et al. [28] ont étudié le comportement général de fusion et de cristallisation et ont signalé la

présence de deux formes cristallines différentes de l'érythritol solidifié présentant des points de fusion différents. Pour les phénomènes de surfusion, Sharma et al. [29] ont rapporté une surfusion de 14 K maximum pour des échantillons de 200 g. Sari et al. [30] ont mesuré une surfusion plus élevée jusqu'à 82 K et Ona et al. [31] jusqu'à 54 K avec des mesures au calorimètre à balayage différentiel (DSC) pour des échantillons significativement plus petits, de quelques mg seulement. Ces résultats reflètent la dépendance en volume des phénomènes de surfusion. La même tendance a été observée par Rathgeber et al. [32] qui ont comparé les mesures DSC et T-history, Wei et Ohsasa[33]. Des expériences de cycles visant à tester la stabilité thermique de l'érythritol lors de la fusion et de la cristallisation répétées ont été menées par Shukla et al.[34] et Agyenim et al [35]. Tous les deux groupes ont signalé une diminution de la chaleur latente et des variations de la température de changement de phase au cours du cycle. L'érythritol est utilisé comme un matériau de stockage pour une variété d'applications. Agyenim a étudié la combinaison d'un système de stockage d'anneaux concentriques avec de l'érythritol en combinaison avec un système de refroidissement par absorption, tandis que Sharma et al. [36] ainsi ont utilisé le MCP pour une cuisson solaire. Kaizawa et al. [27] ont étudié la faisabilité technique d'un système de transport de la chaleur perdue avec de l'érythritol. Wang [37] a étudié un système avec contact direct entre un fluide caloporteur et MCP.

Pour l'alcool de sucre (xylitol), il n'existe que quelques publications concernant son utilisation en tant que MCP. Kaizawa et al. [27] ont déterminé une température de décomposition de 200 ° C, qui est la température limite pour son utilisation en tant que matériau de stockage d'énergie thermique. Seppälä et al. [38] ont testé divers additifs pour augmenter la vitesse de cristallisation et de libération de chaleur latente. Le méthanol conduit à une cristallisation 33 à 170 fois plus rapide que le xylitol pur en surfusion à 22 ° C.

1.5.3. Eutectiques des corps inorganiques et/ou organiques.

Les eutectiques sont des matériaux constitués de nombreux MCP purs qui peuvent être une combinaison des MCP inorganiques et organiques.

	Paraffine	Acide gras	Hydrate de sels
	-Aucune tendance à la ségrégation -Non corrosif -Pas de surfusion	-Non corrosif -Pas ou peu de surfusion -Bonne stabilité dans le temps	-Prix plus faible -chaleur latente plus élevée que les MCP organiques (250 à 400 K.J /m ³)

Avantages	-Bonne stabilité chimique dans le temps -la chaleur latente de fusion/solidification est élevée. -Les paraffines ne sont pas toxiques et 100% recyclables.	-une grande chaleur latente -Matériau naturel	-Meilleure conductivité thermique (0.5 à 0.7 W/m.K) -chaleur spécifique Massique plus élevée (1.3 à 2 Kg/m ³)
Inconvénients	- Chaleur spécifique massique faible -Faible conductivité thermique à l'état solide -Masse plus faible (0.7 à 1.2 Kg/m ³) -Elles sont inflammables	-Chaleur spécifique massique faible -Faible conductivité thermique (=0.15 W/m.K) -prix plus élevé que celui des paraffines et des hydrates de sel	-corrosif -vieillessement rapide -phénomène de surfusion (15 à 30 K)

Tableau 1. 5 : les principaux avantages et inconvénients pour chaque type du matériau

Les MCP eutectiques sont des mélanges de deux ou plusieurs substances qui se comportent comme un corps pur, c'est-à-dire que leur température du changement d'état est unique. On peut citer notamment les eutectiques de nitrates tel que $\text{LiNO}_3\text{-NH}_4\text{NO}_3\text{-NaNO}_3$ avec une composition massique de 25%-65%-10% ($T_{\text{fusion}} = 80.5 \text{ }^\circ\text{C}$) ou encore les eutectiques d'organiques tel que $\text{CH}_3\text{CONH}_2\text{-C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$ avec une composition massique de 50%-50% ($T_{\text{fusion}} = 65 \text{ }^\circ\text{C}$), les eutectiques d'hydrates de sels comme le mélange isomassique $\text{Mg}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}\text{-MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ($T_{\text{fusion}} = 59.1 \text{ }^\circ\text{C}$) et enfin les eutectiques de polyols comme le mélange à 25 % molaire d'érythritol et 75% de xylitol, ($T_{\text{fusion}} = 85 \text{ }^\circ\text{C}$). Sari et al. [30] ont déterminé les propriétés thermiques des différents eutectiques d'acides gras par DSC.

Les résultats montrent que les eutectiques d'acide laurique – acide stéarique, acide myristique-acide palmitique et acide palmitique-acide stéarique sont très attractifs pour le stockage de la chaleur dans les systèmes du chauffage solaire passif. Le tableau 1.5 résume les principaux avantages et inconvénients pour chaque type du matériau.

1.5.4. Principales propriétés physiques du MCP et à comparer avec l'eau

Le tableau suivant résume les principales propriétés thermo-physiques des matériaux à changement de phases à comparer avec de l'eau. Cette propriété du matériau est liée à son importante énergie de fusion par unité du volume, plus celle-ci sera grande, plus les propriétés du stockage/restitution de la chaleur seront intéressantes.

Matériaux	Température de fusion (°C)	Enthalpie de fusion (kJ /kg)	Chaleur spécifique solide/liquide kJ/(kg.°C)	Masse volumique Solide/liquide kg/m ³
Eau	0	333 .6	2.05 /4.18	999 /1000
MCP organiques	41.43	211.6	1.76/2.27	1007/862
Acide dodécanoïque	29.8	218.0	2.75/3.58	1120/1090
Trimethyloethane (63wt%)+eau (37wt%)				
MCP inorganiques	15-25	125 .9	2.34/2.78	1795/1728
Mn(NO ₃) ₂ *H ₂ O+MnCl ₂ *H ₂ O(4wt%)Na ₂ S ₂ O ₃ *5 H ₂ O	48	267.0	3.83/4.57	1450/1280
MCP eutectiques Capric acid (65mol%) +Lauric acid (35 mol%)	18-19.5	140.8	1.97/2.24	- /-

Tableau 1. 6 : les principales propriétés thermo-physiques des MCP à comparer avec de l'eau

Plusieurs études ont été dédiées à la présentation des types de MCP et à l'étude de leurs caractéristiques et leurs domaines d'applications. Le lecteur peut alors consulter à titre d'exemple les travaux de Zalba et al [39], Pasupathy et al [40] pour plus d'informations.

1.6. APPLICATIONS

Dans les dernières années, les applications de MCP sont plus en plus apparues ce qui permet d'améliorer la recherche et la conception. Cependant, il y a des applications qui ont attiré plus d'attention comme les récepteurs solaires à base de MCP, la climatisation et les échangeurs solaires.

1.6.1. Cas d'étude du stockage thermique associé au récepteur solaire

Les récepteurs solaires sont les systèmes qui sont placés au sommet de la centrale solaire à tour composé de l'absorbeur et de la tuyauterie pour le passage du fluide caloporteur. Le terme absorbeur désigne l'élément où se réalise la conversion du rayonnement solaire en chaleur.

En effet, le récepteur subit d'intenses chocs thermiques qui peuvent nuire à sa durée de vie. La problématique de protection thermique du récepteur est par conséquent abordée. La protection thermique consiste à stocker une partie de la chaleur produite par le récepteur pour la lui restituer plus tard. L'unité de stockage se place sur la face arrière du récepteur. Comment l'énergie thermique est-elle stockée, quelle technologie est la mieux adaptée au stockage de protection du récepteur ?

La réponse tient dans l'utilisation de la chaleur latente. La solution retenue est celle d'un matériau à changement de phase : le carbonate de lithium (Li_2CO_3) dont les propriétés répondent aux consignes de notre application. Le problème de l'intensification des transferts de chaleur à partir d'un matériau qui change d'état est traité. L'intensification est essentielle pour satisfaire les conditions de puissance de charge et de décharge demandées au stockage de protection contre le vieillissement par exemple.

Le vieillissement des récepteurs solaires est un phénomène avéré et néfaste pour la durée de vie des centrales solaires, par exemple pour les concentrateurs solaires, Boubault et al. [41] ont par exemple étudié une approche numérique du vieillissement accéléré des absorbeurs solaires, basé sur des résultats expérimentaux. Ils identifient les deux facteurs principaux du vieillissement qui sont le flux incident et la température. Boubault montre aussi qu'il existe d'autres mécanismes et facteurs liés au vieillissement à savoir :

- ✓ Mécanismes physiques (Les contraintes internes, propagation des fissures, l'état de surface, endommagement).
- ✓ Mécanismes chimiques (La corrosion et l'oxydation, l'humidité, les aérosols).
- ✓ Les Facteurs de vieillissement (les températures élevées et les forts gradients thermiques, le rayonnement solaire concentré et les polluants naturels et artificiels dans l'environnement).

➤ *Plan d'action pour répondre à ces problématiques*

Pour parvenir au développement du stockage thermique de protection du récepteur, plusieurs actions ont été développées par les chercheurs :

- ✓ Choisir le matériau principal du stockage de la chaleur.
- ✓ Améliorer les transferts de chaleur dans le matériau du stockage en assurant la capacité de stockage ainsi la rapidité de charge ou de décharge de l'énergie thermique.
- ✓ Développer un modèle numérique valide qui servira d'outil pour la conception d'un dispositif expérimental du stockage thermique. Tel dispositif construit pour appréhender d'éventuels problèmes techniques liés à l'utilisation des matériaux à changement de phase à basse et à haute température.
- ✓ Adapter le matériau du stockage à chaque module qui compose le récepteur en fonction de sa température du fonctionnement et de déterminer la température de l'air à la sortie du récepteur durant les 15 minutes après l'interruption du flux solaire. Cette technique permet de répartir et d'homogénéiser le flux solaire concentré pour éviter la formation de points chauds. C'est une option pour réduire l'impact des gradients thermiques.

D'autres chercheurs ont développés des techniques afin de prolonger la durée de vie d'un récepteur, le flux incident peut être modifié au fil de la journée en appliquant des stratégies de pointage. C'est une option pour réduire l'impact des gradients thermiques.

D'autres chercheurs, pour répondre à la problématique des chocs thermiques dus aux passages nuageux ont adopté une solution consiste à étudier la mise en place d'un dispositif de stockage de la chaleur de courte durée, placé directement sur la face arrière du récepteur. Le stockage de chaleur donne de l'inertie thermique au récepteur. Il peut alors absorber de façon autonome les variations du flux solaire concentré.

Ces travaux de recherche ont été poussés jusqu'à la simulation des performances thermiques du couplage récepteur solaire – stockage thermique. Des recommandations techniques dans l'objectif de fabriquer un prototype de taille préindustrielle sont données.

1.6.2. Cas d'étude des systèmes du stockage latent par changement de phase intégré à un bâtiment.

De nombreuses publications paraissent régulièrement dans la littérature en rapport avec l'optimisation énergétique des bâtiments. Qu'il s'agisse de résidentiel ou de tertiaire, il est avéré depuis des années déjà que nos constructions souffrent d'une mauvaise isolation thermique. Celle-

ci est la principale raison de l'augmentation de nos consommations énergétiques. Des chercheurs comme Kozak et al.[42], Lai et Hokoi. [43] étudient donc comment optimiser la gestion de la température pour le confort des individus en s'appuyant sur le stockage de la chaleur dans les murs ou à l'intérieur de la ventilation à l'aide de matériaux MCP tels que les paraffines (T_{fusion} entre 20 et 40°C).

Les MCP les plus utilisés dans les bâtiments sont à base de paraffine et de sels hydratés. Généralement utilisés sous forme des plaques légères ou sous forme encapsulés dans les matériaux de construction comme le plâtre et le béton, les MCP permettent d'augmenter l'inertie thermique des bâtiments et de les doter d'une capacité d'auto-régulation thermique capable d'améliorer les conditions du confort thermique chez les usagers. En effet, l'utilisation des MCP dans les bâtiments permet d'amortir et de lisser les fluctuations thermiques à l'intérieur des pièces et de maintenir une température moyenne acceptable. Elle a par ailleurs un effet de « déphasage thermique » en retardant l'onde de chaleur à une période moins chaude de la journée. Cela a pour avantage de limiter l'élévation de la température pendant un certain nombre d'heures et donc de réduire les besoins en climatisation. Cette application a prouvé que la température dans une pièce peut être réduite jusqu'à 4°C et la consommation d'énergie liée à la climatisation peut ainsi chuter de 30%. Pour améliorer l'efficacité du déstockage des MCP, il est recommandé de lui associer un système de ventilation nocturne.

1.6.3. Cas d'étude des systèmes du stockage latent par changement de phase dans l'électronique et dans les centrales solaires à concentration.

L'électronique est un secteur très innovant. Dans la littérature, on recense de nombreuses publications concernant la protection des composants électroniques. Les travaux de Mahmoud [44], Levin et al. [45], et Leland et Recktenwald [46] illustrent parfaitement cette catégorie. Même si la température de fonctionnement des composants électroniques fonctionne entre 50 et 80°C, le principe de protection est très proche de ce qu'il a été développé pour le récepteur solaire. L'idée est de placer un dispositif du stockage thermique en chaleur latente pour les mêmes raisons d'avoir un volume et une masse minimum dans le but de protéger le composant. Ce dispositif nécessite une architecture métallique pour dissiper la chaleur du composant vers le MCP. Le système opère dans les deux sens. En fonctionnement, l'unité du stockage se charge évitant au composant de trop chauffer. Au repos ou hors tension, l'unité du stockage se décharge lentement en limitant un brusque de choc thermique pour le composant.

Dans les centrales solaires à concentration (CSP), l'objectif principal est la compétitivité économique de la production d'électricité. C'est la raison pour laquelle on parle souvent de stockage thermique « de production ». C'est effectivement pour réguler la production électrique par rapport au cycle jour/nuit que les stockages thermiques trouvent leur première utilité. Le stockage met alors en œuvre une grande quantité du matériau, souvent des sels fondus, dans deux cuves immenses de plusieurs dizaines de mètres de haut et de diamètre. Le stockage thermique à chaleur latente pour des températures supérieures à 300°C est un sujet neuf dans le CSP.

Les MCP ont été également utilisés pour préchauffer les moteurs à combustion interne comme par exemple le moteur diesel. En effet, les trois quart de l'énergie produite par un moteur automobile sont dissipés dans la nature. Cette énergie sera alors stockée par les MCP connectés au radiateur. Le stockage par chaleur latente permet alors d'éviter les problèmes liés au démarrage à froid du moteur [47].

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

1.7. COMMENT CHOISIT-ON UN MCP ?

Le choix du matériau à changement de phase est une étape importante dans la conception du module du stockage, la quantité d'énergie récupérable étant directement liée à la nature du matériau.

Selon Farid et al. [48] la sélection d'un MCP se fait principalement en fonction de sa température de fusion. Kenisarin [49] passe en revue une liste très complète des principaux caractéristiques accompagnants le choix d'un MCP.

Selon les auteurs, il faut :

- ✓ Une température de fusion dans la gamme de température de fonctionnement du système.
- ✓ Une capacité calorifique, chaleur latente et masse volumique élevées afin de réduire au minimum les dimensions du stockage.
- ✓ Une fusion qui n'implique pas du changement de proportions stœchiométriques du matériau entre la phase solide et la phase liquide (valables pour les eutectiques).
- ✓ Une bonne répétabilité et reproductibilité du changement d'état (cycles et vieillissement).

- ✓ Une conductivité thermique élevée afin d'avoir un minimum de gradient dans le MCP et assurer une puissance élevée de charge et décharge du stockage.
- ✓ Le minimum d'expansion volumique lors du changement d'état afin d'utiliser des structures géométriques simples contenant le MCP, cela limitera les dégâts dus aux contraintes mécaniques sur la structure du contenant.
- ✓ Un phénomène de surfusion négligeable.
- ✓ Une bonne stabilité chimique du matériau face au vieillissement.
- ✓ Une bonne compatibilité chimique et une résistance à l'oxydation avec le contenant.
- ✓ Une toxicité et inflammabilité aussi faible que possible.
- ✓ De la disponibilité et un coût de revient bon marché.

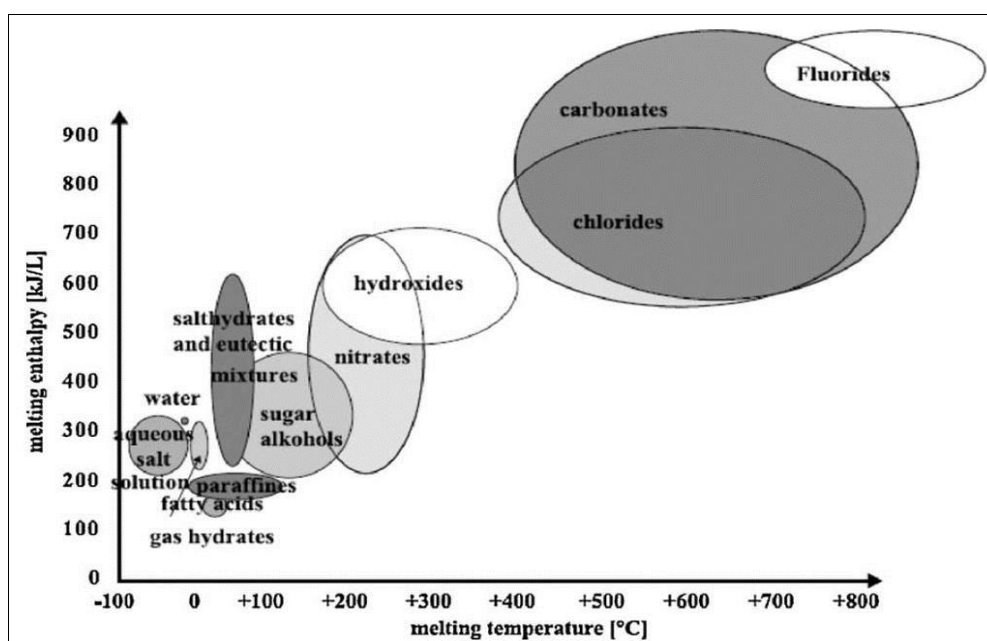


Figure 1. 6 : Chaleur latente en fonction de la température de fusion des grandes familles de MCP

La température du changement de fusion des grandes familles de MCP est illustrée par la Figure 1.6. D'après ce diagramme, les MCP ayant une température de fusion au-dessus de 600°C sont les composés chlorés, fluorés et les carbonates. La chaleur latente de ces MCP est comprise entre 500 et 1500 kJ/kg. Les paraffines constituent une autre grande famille de MCP largement utilisée dans la recherche du stockage thermique pour l'optimisation énergétique des bâtiments. La température de fusion d'une paraffine varie de 0 à 150°C avec une chaleur latente de fusion de l'ordre de 200 kJ/kg. Il n'est pas question d'utiliser la paraffine pour protéger le récepteur solaire mais elle est intéressante pour appréhender le comportement thermique et les transferts de chaleur

dans un TES (Thermal Energy Storage) grâce à l'observation par photographie. Cela est possible puisque la paraffine solide est opaque tandis qu'elle est transparente.

1.7.1. Caractérisations expérimentales des MCP selon les critères du choix.

Le retour aux classifications et aux critères de sélection d'un MCP nous semble important, en effet, de nombreux MCP solide-liquide existent. Ils sont classés suivant leur température de fusion, leur chaleur latente du changement de phase ainsi que leurs caractéristiques thermophysiques. Les sels hydratés (MCP inorganique) ne sont pas tous utilisés dans l'enveloppe du bâtiment en raison de : la corrosion engendrée par leurs présences, la tenue mécanique des matériaux qui les contiennent, le vieillissement propre, l'inflammabilité ainsi que la plage de température en inadéquation avec le confort requis à l'intérieur du bâtiment par exemple.

Ainsi selon les critères de sélection d'un MCP, la température et la plage de fusion sont considérées comme les plus importants dans le choix du type de MCP. La plage de fusion est déterminée en fonction de l'application souhaitée (bâtiment, transport, alimentaire, textile). Ces matériaux doivent avoir une chaleur latente de fusion importante. Afin de faciliter et accélérer les cycles de charge et de décharge, il est intéressant de choisir une bonne conductivité thermique. Le matériau doit avoir une capacité de stockage intéressante et être chimiquement stable dans le temps, il doit par ailleurs être non-toxique et non inflammable. La compatibilité avec les autres matériaux doit être respectée pour éviter toute réaction chimique entre le MCP et les composantes d'une paroi.

Les travaux d'Agyenim et al. [50] révèlent que le chauffage et le refroidissement domestique pour les MCP se situent entre 0 et 65 °C. De nombreuses études ont été effectuées sur différents types et caractéristiques de MCP, ainsi que sur leurs domaines d'applications.

Pasupathy et al. [40] ont résumé les critères de sélection d'un MCP intégré dans le bâtiment dans la figure 1. 7.

Toute technique de mesure où le changement d'une propriété d'un échantillon est lié à une variation de la température. En pratique, on enregistre une grandeur suite à une évolution imposée de la température au cours du temps, on combine plusieurs étapes de chauffage/refroidissement et ou chauffage, on modifie le profil de la température sur la base du comportement de l'échantillon puis on ajoute l'évolution de la température imposée sur la matière.

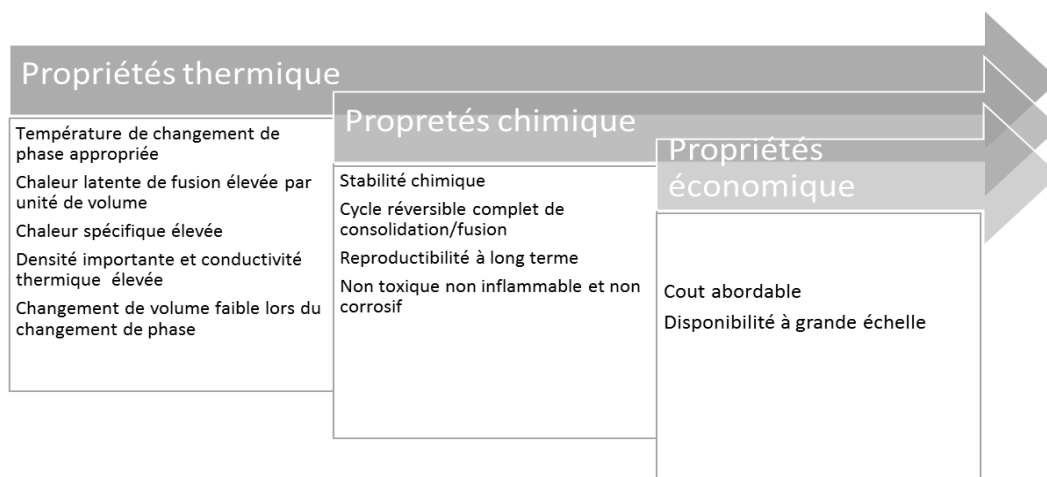


Figure 1. 7 : Critères de sélection d'un MCP pour le stockage de la chaleur latente selon Pasupathy

1.7.2. Les techniques utilisées pour déterminer les propriétés thermiques des MCP

Plusieurs techniques disponibles résumées sur le tableau suivant :

propriétés mesurées	techniques d'analyse	abréviations
Masse	analyse thermogravimétrique	TG, ATG
Différence de température	analyse thermique différentielle	ATD
Chaleur	analyse Differential Scanning Calorimetry	DSC
Dimension	Analyse	ATM

Tableau 1. 7 : méthodes et techniques d'analyse des grandeurs physiques

Le couplage entre les méthodes d'analyse entre elles peut fournir plus d'information sur les matériaux à analyser :

- ✓ constantes thermiques d'un matériau (point de fusion, chaleur latente, chaleur spécifique...).
- ✓ Transition de phase.
- ✓ Changement de structures.
- ✓ Stabilité thermique.
- ✓ Propriétés d'adsorption.

1.7.2.1. Présentation générale de l'analyse thermogravimétrique

Cette technique repose sur la variation de masse d'un échantillon soumis, soit à une température de chauffe définie par des paliers de température en fonction du temps, soit à une loi déterminée par élévation constante de la vitesse de chauffe. La variation de la masse de l'échantillon peut être

attribuée à des conditions d'environnement évolutives, à des réactions chimiques liées à la température, l'atmosphère, la pression, le champ magnétique ou encore à l'irradiation [51].

Son utilisation permet de compléter sur une plus large plage de températures la stabilité thermique et les caractéristiques de dégradation du MCP. Souvent, les ATG sont coupées à une mesure DSC. Un thermocouple est alors situé en dessous du creuset de référence et de mesure. Ce couplage permet de savoir si les pertes de masses sont associées à des phénomènes exothermiques, endothermiques.

A la fin de l'expérience, il sera possible de tracer sur un graphe l'évolution de la masse et de la température de l'échantillon en fonction du temps (Figure 1. 8).

Figure 1. 8 : Exemple de post traitement d'une analyse de thermogravimétrie sur l'acétamide

La masse de l'échantillon sera toujours tracée en trait plein vert et sera exprimée en pourcentage de la masse initiale. La température de l'échantillon quant à elle sera représentée par des traits pointillés rouges et sera exprimée en degré Celsius.

Par ailleurs, sur le graphique, deux températures qui paraissent importantes : la température de fusion du matériau obtenue en DSC notée T_{fus} , et la température à partir de laquelle le matériau perd 1 % de sa masse initiale mesurée à l'ATG notée $T_{1\%}$. Cette température correspond à la température à partir de laquelle la dégradation est supposée irréversible. Il faudra par conséquent que la différence de température entre T_{fus} et $T_{1\%}$ soit suffisamment grande pour que le matériau puisse être utilisé à l'échelle industrielle sans risque de dégradation.

1.7.2.2. Analyse par Calorimétrie différentielle à balayage (DSC)

La calorimétrie différentielle à balayage, plus connue sous le nom de DSC acronyme de Differential Scanning Calorimetry, est une technique d'analyse thermique particulièrement utilisée pour la caractérisation des MCP. Elle permet de mesurer entre autres les températures et les enthalpies de transition de phase des MCP. Le principe repose sur la mesure de la différence d'énergie entre un échantillon contenant le MCP et une référence vide, tous les deux sont soumis aux mêmes conditions de contrainte et de température. La différence d'énergie entre l'échantillon et la référence permet donc de caractériser le comportement thermique du matériau et de quantifier ses transformations endothermiques lors de la fusion et exothermiques lors de la cristallisation. Cette différence d'énergie représentant l'écart de flux thermique entre l'échantillon et la référence, est tracée en fonction du temps ou de la température sur un graphique nommé thermogramme (Figure 1.9 : (a) et Figure 1.9 : (b)).

Figure 1. 9 : Exemples de thermogrammes pour l'acide stéarique.

(a) : Flux thermique et température en fonction du temps ; (b) : Flux thermique en fonction de la température

Le sens endothermique sera toujours orienté vers le bas et le sens exothermique toujours vers le haut. Ainsi, la fusion est la phase où le MCP absorbe l'énergie (transition endothermique) qui sera détectée par un pic de signal négatif, tandis que la cristallisation est la phase où le MCP restitue l'énergie (transition exothermique) qui sera détectée par un pic de signal positif. De plus sur les thermogrammes représentant l'évolution du flux de chaleur et de la température en fonction du temps, le signal de température sera tracé en traits pointillés rouges tandis que le signal du flux de chaleur sera tracé en trait continu vert.

➤ *Exemple d'analyse technique : Couplage entre l'analyse DSC (mesure de la chaleur) et analyse thermogravimétrique (mesure de perte de masse)*

Sur cet exemple on vise à présenter brièvement les résultats de caractérisation propres de :

- l'acide arachidique ($\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_{18}\text{-COOH}$), un MCP organique de la gamme de température 70-85 °C référencé par Sharma et al. [18] ayant une température de fusion de 76,5 °C et une enthalpie de changement d'état de 227 J.g⁻¹.
- et un MCP d'acide stéarique.

La caractérisation de MCP faite au laboratoire « Thermique Énergétique et Procédés » a été réalisée à l'aide de deux techniques successives. La première, la calorimétrie différentielle à balayage qui a permis de valider les paramètres de base des MCP, à savoir leur température de fusion et leur variation d'enthalpie lors du changement de phase. Cette étape a été opérée par le DSC131, une phase de calorimétrie a été complétée par un cyclage thermique du matériau qui a été soumis à 75 cycles de fusion/cristallisation grâce au Pyris Diamond DSC de Perkin-Elmer afin d'analyser une éventuelle dégradation thermique [52].

Enfin, la deuxième technique a consisté en une analyse thermogravimétrique des MCP afin d'observer leurs variations de masse dès lors qu'ils sont soumis à un cycle thermique programmé sous une atmosphère contrôlée.

➤ *Résultats de l'acide arachidique*

Les résultats présentés sur la Figure 1. 10 ont été obtenus avec un échantillon d'une masse de 30,602 mg de l'acide arachidique.

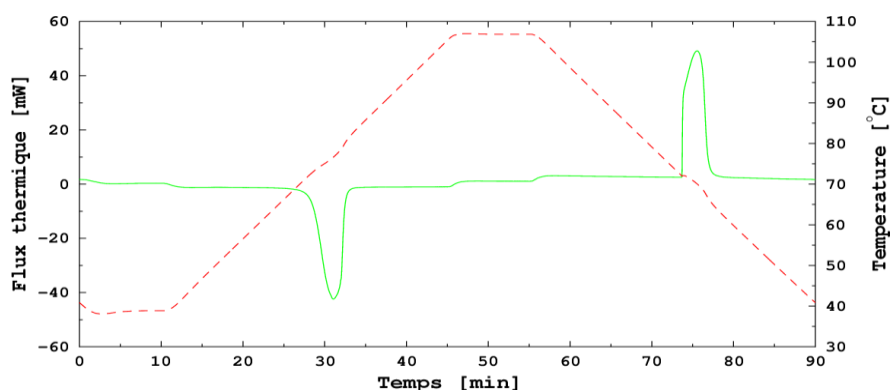


Figure 1. 10 : Thermogramme au DSC131 du 2eme cycle de l'acide arachidique

Le thermogramme présenté sur la Figure 1. 10 montre un premier pic qui correspond à la fusion du matériau à une température de 72,3°C avec une enthalpie de changement de phase de 230J.g⁻¹. Le second pic exothermique correspond quant à lui à la température de cristallisation de l'échantillon mesurée à 72,0 °C.

Les résultats de l'analyse sous DSC montrent une bonne concordance avec les résultats trouvés dans la littérature. De plus la température de cristallisation mesurée à 72,0 °C montre un degré de surfusion quasi inexistant compte tenu de la précision des mesures, ($\Delta T = 0,3$ °C) pour l'acide arachidique.

Littérature :	$T_{\text{fus}} = 76,5$ °C	$\Delta H_{\text{fus}} = 227$ J.g ⁻¹
DSC131 :	masse de l'échantillon = 30,602 ± 0,004 mg	
2 ^{ème} cycle :	$T_{\text{fus}} = 72,3 \pm 0,2$ °C	$\Delta H_{\text{fus}} = 230 \pm 10$ J.g ⁻¹ $T_{\text{cris}} = 72,0 \pm 0,2$ °C

Tableau 1. 8 : Comparaison des résultats de DSC131 sur l'acide arachidique

Ce matériau a subi des analyses plus poussées concernant sa stabilité aux cyclages thermiques. Le MCP a été soumis à 75 cycles de fusion/cristallisation dans une cellule hermétique. Une comparaison des cycles est réalisée où les cycles 2 (en trait plein rouge), 38 (alternance de traits et de points en vert) et 75 (traits pointillés bleus) ont été superposés.

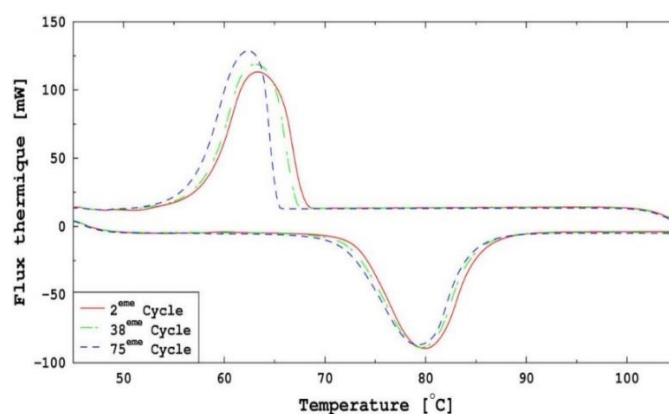


Figure 1. 11 : Comparaison des cycles 2, 38 et 75 de l'acide arachidique après passage au Pyris Diamond DSC

La comparaison des thermogrammes du 2^{ème}, du 38^{ème} et du 75^{ème} cycle montre une légère diminution de la température de cristallisation de l'acide arachidique (Tableau 1. 9). Cette tendance devra être confirmée en réalisant plus de cycles afin de vérifier s'il ne s'agit tout simplement pas du phénomène aléatoire de la rupture de surfusion. La température de fusion et la chaleur latente restent relativement stables et ne semblent pas traduire de dégradation du matériau au cours des cycles thermiques successifs.

Littérature :	$T_{\text{fus}} = 76,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\Delta H_{\text{fus}} = 227 \text{ J.g}^{-1}$	
Pyris Diamond DSC :	masse de l'échantillon = $9,478 \pm 0,004 \text{ mg}$		
2 ^{ème} cycle :	$T_{\text{fus}} = 73,2 \pm 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\Delta H_{\text{fus}} = 221 \pm 3 \text{ J.g}^{-1}$	$T_{\text{cris}} = 67,8 \pm 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$
38 ^{ème} cycle :	$T_{\text{fus}} = 72,6 \pm 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\Delta H_{\text{fus}} = 220 \pm 3 \text{ J.g}^{-1}$	$T_{\text{cris}} = 67,1 \pm 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$
75 ^{ème} cycle :	$T_{\text{fus}} = 72,1 \pm 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\Delta H_{\text{fus}} = 216 \pm 3 \text{ J.g}^{-1}$	$T_{\text{cris}} = 65,2 \pm 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$

Tableau 1. 9 : Comparaison des résultats des cycles 2, 38 et 75 de l'acide arachidique

L'analyse thermogravimétrique de l'acide arachidique (Figure 1. 12) montre une excellente stabilité thermique du matériau. En effet, la masse de ce MCP n'a pas évolué au cours de l'expérience ce qui prouve l'absence de dégradation thermique à $100 \text{ } ^\circ\text{C}$ au-delà de sa température de fusion.

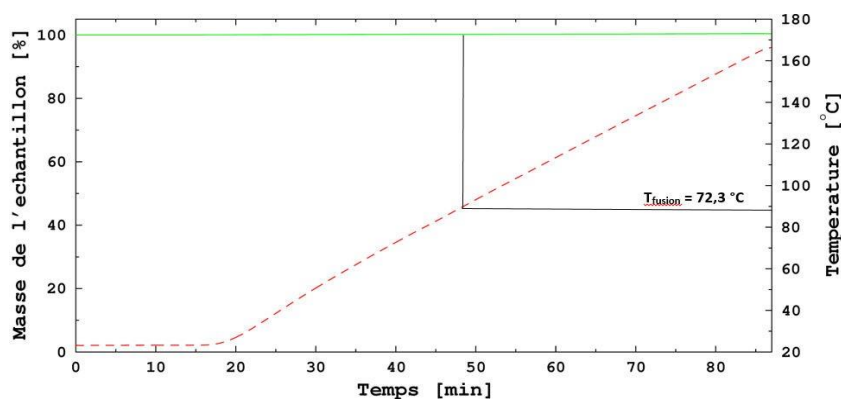


Figure 1. 12 : Analyse thermogravimétrique de l'acide arachidique

➤ Résultats obtenus sur l'acide stéarique

La figure 1. 12. présente les résultats du 2ème cycle de DSC131 réalisé avec 29,624 mg d'acide stéarique.

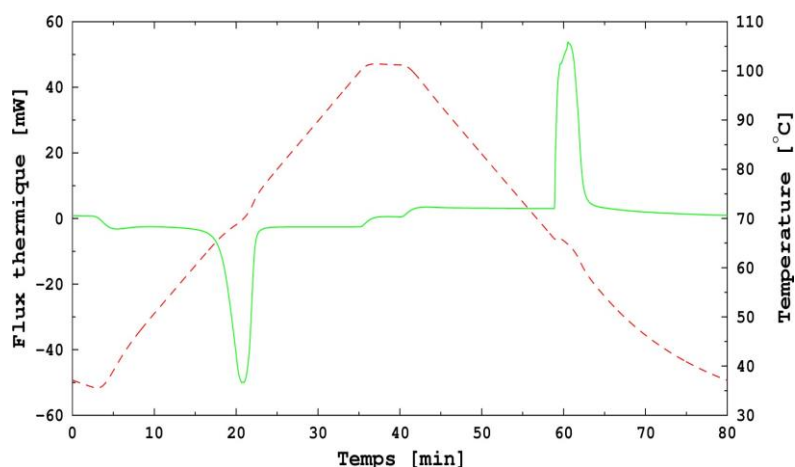


Figure 1. 13 : Thermogramme au DSC131 du 2ème cycle de l'acide stéarique

Sur ce thermogramme, lors de la phase de chauffe, le pic endothermique présente une température de fusion à 66,4 °C et une enthalpie de fusion de 210 J.g⁻¹. Le pic de cristallisation est quant à lui mesuré à une température de 65,8 °C. La surfusion est donc égale à 0,6 °C.

Les résultats synthétisés dans le *Tableau (1. 10)* sont en accord avec ceux qui ont été décrits dans la littérature. En prenant la masse volumique annoncée par Sari et al.[30] de 940 kg.m⁻³, l'enthalpie volumique est de l'ordre de 54,8 kWh.m⁻³.

Littérature :	$T_{fus} = 65-69 \text{ °C}$	$\Delta H_{fus} = 199-257 \text{ J.g}^{-1}$	
DSC131 :	masse de l'échantillon = 29,624 ± 0,004 mg		
2 ^{ème} cycle :	$T_{fus} = 66,4 \pm 0,2 \text{ °C}$	$\Delta H_{fus} = 210 \pm 10 \text{ J.g}^{-1}$	$T_{cris} = 65,8 \pm 0,2 \text{ °C}$

Tableau 1. 10 : Comparaison des résultats de DSC131 sur l'acide stéarique

Ce matériau a été retenu pour réaliser les essais de vieillissement. Ces essais sont synthétisés dans la figure 1.14, sur laquelle sont superposés le 2ème, le 38ème et le 75ème cycle de l'acide stéarique après passage au Pyris Diamond DSC, cycles identiques à l'acide arachidique.

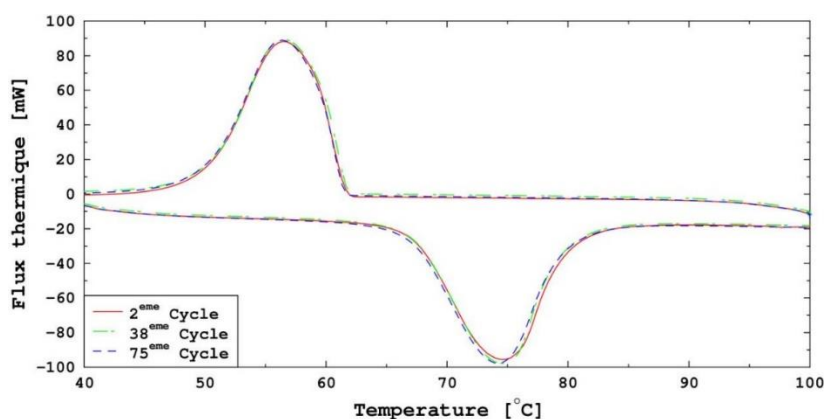


Figure 1. 14 : Comparaison des cycles 2, 38 et 75 de l'acide stéarique après passage au pyris diamond DSC

➤ La comparaison avec la littérature est résumée dans le tableau 1.11 :

Littérature	$T_{\text{fus}} = 65\text{-}69\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Delta H_{\text{fus}} = 199\text{-}257\text{ J.g}^{-1}$	
Pyris Diamond DSC:	masse de l'échantillon = $9,866 \pm 0,004\text{ mg}$		
2 ^{ème} cycle :	$T_{\text{fus}} = 67,2 \pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Delta H_{\text{fus}} = 206 \pm 2\text{ J.g}^{-1}$	$T_{\text{cris}} = 61,6 \pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$
38 ^{ème} cycle :	$T_{\text{fus}} = 67,1 \pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Delta H_{\text{fus}} = 206 \pm 2\text{ J.g}^{-1}$	$T_{\text{cris}} = 61,5 \pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$
75 ^{ème} cycle	$T_{\text{fus}} = 67,0 \pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Delta H_{\text{fus}} = 205 \pm 2\text{ J.g}^{-1}$	$T_{\text{cris}} = 61,4 \pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tableau 1. 11 : Comparaison des résultats des cycles 2, 38 et 75 de l'acide stéarique

Les résultats du test de cyclage sont convaincants avec l'acide stéarique. En effet, aux incertitudes de mesures près, aucune modification des températures de fusion, de cristallisation et de la variation d'enthalpie de transformation n'est notée. Les propriétés thermophysiques de ce corps semblent s'être conservées et répondre aux attentes d'un matériau du stockage thermique. Notons qu'une surfusion de $5,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ est mesurée alors qu'elle était très faible lors des essais avec le DSC131. Cette différence peut être due au caractère aléatoire de la cristallisation mais aussi à l'influence du volume qui est plus faible avec les cellules du Pyris Diamond.

L'analyse thermogravimétrique de l'acide stéarique visible sur la figure 1.15 montre une excellente tenue thermique de ce matériau face aux contraintes de température. En effet, $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ au-delà de sa température de fusion, le matériau n'a perdu que $0,07\%$ de sa masse initiale et laisse donc prévoir un potentiel de conservation des propriétés thermo-physiques très intéressant dans le cadre d'une utilisation industrielle.

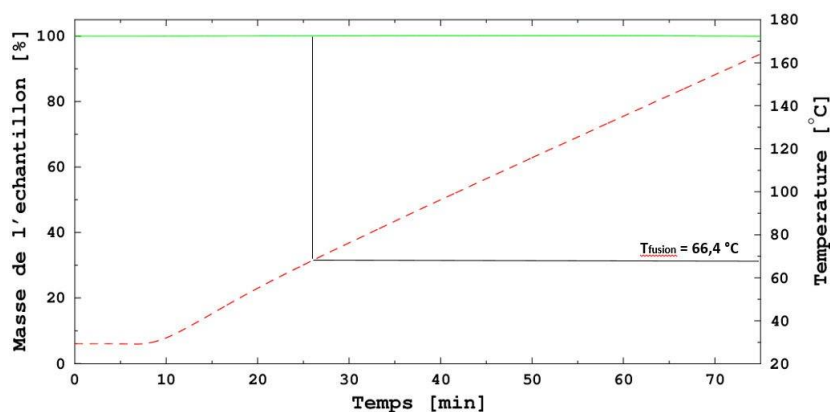


Figure 1. 15 : analyse thermogravimétrique de l'acide stéarique

➤ *Comparaisons entre les deux corps :*

L'acide arachidique possède d'excellentes propriétés thermo-physiques puisqu'il n'affiche aucune dégradation thermique jusqu'à 100 °C au-delà de sa température de fusion. Son point faible réside dans son prix (5 €.kg⁻¹). L'acide stéarique quant à lui présente un prix attractif (2,2 €.kg⁻¹) et une tenue thermique tout aussi remarquable que l'acide arachidique avec l'absence de dégradation jusqu'à 100 °C au-delà de sa température de fusion. Ce dernier présente aussi un inconvénient : sa température de fusion (66,4 °C) se situe légèrement en dessous du seuil de 70 °C défini par l'auteur. Pour des performances énergétiques du stockage les deux corps leurs performances sensiblement équivalentes.

1.8. L'UTILISATION DE MCP DANS LES PAROIS

Les matériaux à changement de phase sont employés pour maintenir un niveau de confort par le biais du contrôle de la température. Ils permettent de réduire les besoins énergétiques mais également de faire des économies. Ainsi en réduisant la consommation énergétique cela a pour conséquence directe à la diminution des émissions de CO₂. Généralement, ces matériaux sont présents sous forme de microbilles de cire de paraffine qui sont encapsulées dans des polymères pouvant être intégrés dans tous les matériaux de construction. La plus grande efficacité des MCP est essentiellement mise en avant lorsqu'ils sont employés dans les structures légères afin d'améliorer l'inertie thermique des bâtiments.

Lors du changement de phase du MCP, l'échange thermique a lieu à l'interface solide/liquide. Quand le front de solidification ou de fusion se déplace, il laisse derrière lui une nouvelle phase (solide ou liquide) que le flux thermique doit traverser avant d'attendre le front en question. Plus l'épaisseur de cette phase est importante et plus la résistance thermique qu'elle génère est grande. Si on souhaite limiter ce phénomène de résistance dû au déplacement de flux thermique faire en

sorte que l'épaisseur à traverser soit la plus petite envisageable. C'est pour cela qu'il est conseillé d'utiliser fréquemment des microcapsules sphériques qui changent aisément de phase sur la totalité de leur volume. Le couplage avec un super-isolant permet d'augmenter encore l'inertie thermique en limitant considérablement les pertes thermiques. L'encapsulation semble être une bonne solution au confinement des MCP. En effet, quand ce dernier est à l'état liquide, il n'a plus de tenue physique et nécessite alors un contenant.

1.8.1. Principe d'encapsulation et stabilité chimique

1.8.1.1. L'encapsulation

L'encapsulation consiste à tenir une matière dans une capsule dans le but de protéger la substance contre les interactions avec le milieu extérieur ou de la transporter jusqu'à l'endroit où elle sera libérée pour agir.

1.8.1.2. Principe d'encapsulation

Dans un système de stockage thermique, le MCP est en contact avec le matériau constituant l'enceinte de confinement. Les MCP peuvent être conditionnés dans des billes microscopiques en plastique mélangées au plâtre ou au béton ou incorporés dans les pores d'un matériau porteur par imprégnation (figure 1. 21. a.). La macro encapsulation est une méthode dans laquelle le MCP est emballé dans des contenants aux dimensions variant du décimètre au mètre (figure 1. 21. b.). L'étude des performances d'un MCP solide-liquide au sein d'un banc expérimental passe par une étape d'encapsulation qui est primordiale.

Dans les systèmes par encapsulation, le MCP est introduit dans un récipient de petite taille autour duquel circule le fluide caloporteur permettant le transfert d'énergie thermique, l'ensemble est contenu dans une cuve. Cette technique peut être utilisée en macro et micro-encapsulation. La macro-encapsulation consiste à insérer une quantité significative de MCP à l'intérieur de capsules sphériques, tubulaires ou encore rectangulaires (Figure 1. 21.c).

La micro-encapsulation fait référence à une technique d'encapsulation dans laquelle le MCP est introduit dans un contenant présentant une dimension de l'ordre du micromètre. Cette technique est plus complexe à mettre en œuvre que la macro-encapsulation, mais elle tend à se développer. L'intégration des MCP sous forme de capsules dans les surfaces peut améliorer le stockage énergétique dans l'enveloppe du bâtiment [53].

Figure 1. 16 : quelques géométries de macro-encapsulation

Elle peut se faire suivant différentes géométries qui ont chacune leurs avantages et leurs inconvénients, mais elle doit répondre à plusieurs critères qui sont résumés comme suit :

- ✓ atteindre les attentes en termes de résistance à la corrosion, stabilité thermique et résistance mécanique.
- ✓ agir en tant que barrière protectrice pour le MCP contre les interactions nocives avec l'environnement.
- ✓ fournir une surface suffisante pour le transfert de chaleur.
- ✓ présenter une certaine facilité de mise en œuvre.

1.8.2. Comportement thermique des MCP avec et sans encapsulation.

L'intérêt de cette partie est d'étudier une solution de stockage d'énergie thermique qui utilise un principe naturel mais complexe, c'est le phénomène de changement de phase.

Hasnain [54] précise que les MCP encapsulés ont d'excellentes propriétés de fusion et de solidification, mais qu'ils sont environ trois fois plus chers que les paraffines, ce qui limite leur utilisation.

L'enjeu actuel se situe donc dans l'évaluation du gain par chaleur latente des paraffines. Il s'agit d'évaluer leur viabilité via leurs performances pour parvenir à des systèmes efficaces du stockage d'énergie thermique.

La méthode la plus simple consiste à imprégner directement le MCP dans du plâtre, béton ou autres matériaux poreux pour former une enveloppe qui contient un mélange de matériaux.

Hawes et Al [55], ont effectué des travaux sur des panneaux muraux intégrant différentes combinaisons de MCP (stéarate de butyle, dodécanol, propyl palmitate et acides gras). Les

panneaux furent immergés dans un liquide de MCP pendant plusieurs minutes pour permettre l'absorption d'un pourcentage déterminé de MCP. La recherche a conclu que les panneaux imbibés étaient comparables à des panneaux standards en termes de durabilité, de résistance et de stabilité. Cependant, cette expérience a montré que les panneaux imbibés de MCP sont capables de stocker jusqu'à 12 fois la quantité de chaleur d'un panneau standard.

Plus tard, Nepper [56] a examiné le comportement dynamique des panneaux muraux imprégnés d'acides gras et de paraffines. Les températures de fusion ont été ajustées en fonction du mélange intégré au panneau. Trois paramètres importants qui influencent les quantités d'énergie absorbée ou restituée ont été décelés : la température de fusion du MCP, le domaine de température où le changement de phase apparaît et la chaleur latente par unité de surface du panneau. L'étude visera donc à considérer ces paramètres afin d'établir leurs influences sur les performances d'un matériau contenant des MCP. Cependant, contrairement aux travaux de Hawes [55], des fuites importantes ont été constatées avec l'imprégnation directe. En particulier, les travaux de Xiao [57] rapportent que le MCP peut entrer en interaction avec le contenant poreux et détériorer les propriétés mécaniques de l'enveloppe.

Par ailleurs, l'interprétation des résultats n'est pas évidente pour l'échantillon encapsulé, en raison de la complexité des matériaux utilisés pour l'encapsulation.

Au regard de ces travaux énoncés, il apparaît important de pouvoir étudier une comparaison entre une étude expérimentale et une étude numérique, cela permet de mettre en avant l'influence des propriétés thermophysiques sur les prédictions d'un système contenant des sphères de MCP.

- *Les objectifs de ce travail peuvent donc être énoncés comme tels :*
 - ✓ Évaluer les propriétés thermophysiques d'un banc expérimental contenant des MCP.
 - ✓ Comparer les résultats avec les procédures classiques de caractérisation thermophysiques des MCP.
 - ✓ Formuler des recommandations sur la conception de ce dispositif expérimental et sur la procédure de caractérisation dynamique à suivre.

1.9. CONCLUSION

Les matériaux à changement de phase sont employés pour maintenir un niveau du confort par le biais du contrôle de la température. Ils permettent de réduire les besoins énergétiques mais

également de faire des économies. Ainsi en réduisant la consommation énergétique cela a pour conséquence directe la diminution d'émissions de CO₂.

Sur ce chapitre, nous avons développé les différentes techniques du stockage d'énergie thermique. En effet, le stockage thermique par chaleur latente a été un sujet d'étude depuis au moins trois décennies et la littérature sur le sujet est riche. L'intérêt du stockage par chaleur latente ne fait plus de doute pour le secteur du bâtiment et le grand nombre de publications récentes sur le sujet va dans ce sens. Ce chapitre est un état de l'art sur le stockage thermique par voie latente. Une introduction à la thématique du stockage de chaleur amène à présenter et comparer les différents types du stockage thermique. La mise en exergue du niveau de maturité des trois technologies de la cohérence avec l'application envisagée mais, aussi des niveaux de densités énergétiques nous permet de choisir la technologie du stockage latent. Ensuite, les critères de sélection d'un MCP ainsi que les caractéristiques thermo-physiques majeures des catégories de matériaux sont énumérés.

Chapitre

**CHAPITRE 2 : ETAT DE L'ART SUR LA
MODELISATION DU CHANGEMENT DE
PHASE SOLIDE-LIQUIDE**

Les composants de stockage d'énergie via les matériaux à changement de phase améliorent l'efficacité énergétique des systèmes en réduisant le décalage entre l'offre et la demande. Néanmoins, l'incorporation des matériaux à changement de phase dans une application particulière nécessite une analyse qui permettra au chercheur d'optimiser les performances des systèmes. En raison de la nature non linéaire du problème, une analyse numérique est généralement requise pour obtenir des solutions appropriées pour le comportement thermique des systèmes. Par conséquent, de nombreuses recherches ont été menées sur la modélisation du comportement des MCP.

Le présent chapitre a un caractère bibliographique permettant de présenter les modèles développés afin de décrire le comportement des matériaux à changement de phase et les différentes approches utilisées dans la littérature au cours de ces dernières années. Le but de cette partie n'est donc pas de présenter en détails les différents comportements, mais d'en rappeler les principes fondamentaux du phénomène de changement de phase via les équations de Navier-stokes.

2.1. INTRODUCTION

Les matériaux à changement de phase (MCP) ont été largement utilisés dans différentes applications. Le MCP est reconnu comme l'un des matériaux les plus prometteurs pour stocker l'énergie solaire thermique sous forme de chaleur latente. L'utilisation de MCP pour le stockage de l'énergie solaire compense la caractéristique intermittente de cette source d'énergie. La modélisation mathématique et la simulation numérique des systèmes de stockage d'énergie solaire fournissent aux chercheurs des informations utiles pour concevoir et réaliser des expériences avec un gain de temps et d'investissement considérable. En fait, les études expérimentales n'ont été menées qu'à petite échelle pour résoudre les problèmes de matériaux et l'amélioration des propriétés thermo-physiques. D'un autre côté, une modélisation numérique est nécessaire pour déterminer les performances thermiques du système de stockage d'énergie thermique à changement de phase à haute température, ce qui est essentiel dans leur conception et leur optimisation. Des études théoriques et numériques approfondies ont été faites pour résoudre le problème de transfert de chaleur à changement de phase (également appelé problème de Stefan) pour le MCP pur à différentes complexités [58]. La modélisation du comportement MCP nécessite la mise en œuvre des équations de bilan énergétique. Afin de décrire processus de fusion ou de refroidissement, plusieurs auteurs ont proposé différentes formulations mathématiques. La plupart d'entre eux négligent l'effet de certains modes de transfert de chaleur [59], [60] pour simplifier la modélisation. Cependant, ces modes agissent fortement sur le comportement de changement de phase des MCP. De nombreuses méthodes de calcul des propriétés des MCP ont été proposées.

2.2. LISTE EXHAUSTIVE DES MODELES EXISTANTS DANS LA LITERATURE.

Afin d'économiser l'énergie et de limiter les rejets de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, des nouvelles solutions écologiques permettent d'intégrer les MCP dans les différents systèmes de constructions. La liste suivante sélectionne cinq modèles de la littérature qui nous semble mettre en évidence les différents modes de transfert de chaleur. Pour chaque modèle, les points d'intérêts majeurs sont indiqués.

2.2.1. Modèle de KIYAROUDI. [61]

Dans cette section, afin de décrire le comportement thermique et les caractéristiques de transfert de chaleur d'une coque cylindrique verticale et d'un tube de stockage d'énergie thermique à chaleur latente (LHTES), un modèle thermique qui considère la conduction thermique pure d'une part et la conduction-convection d'autre part a été établie .

Les résultats de la simulation numérique sont validés avec des données expérimentales, qui indiquent que le modèle de Kiyaroudi [61] combiné de convection et de conduction peut mieux décrire le transfert d'énergie dans les matériaux à changement de phase (MCP) pendant le processus de fusion. En revanche, le transfert de chaleur par conduction est plus important pendant le processus de solidification.

Dans cette étude, la méthode d'enthalpie est appliquée en raison de ses avantages, la formulation enthalpique implique la solution dans une zone pâteuse impliquant à la fois des matériaux solides et liquides, entre les deux phases standard le problème de changement de phase peut être résolu plus facilement. Dans le modèle à conduction pure et à conduction-convection, les hypothèses suivantes sont faites :

- Les propriétés thermophysiques des matériaux sont constantes avec la température.
- L'écoulement du MCP liquide est laminaire, instable et incompressible.
- La dissipation visqueuse est négligeable.

2.2.1.1. Description du système étudié dans ce modèle.

Le dessin schématique du système étudié est composé de deux tubes concentriques verticaux avec le MCP dans l'espace annulaire et le fluide caloporteur dans le tube. La surface extérieure du système est bien isolée. Les emplacements du moniteur de température sont sélectionnés en

fonction des points de mesure expérimentaux dans l'espace annulaire. L'eau est utilisée comme fluide de transfert de chaleur (HTF) qui circule à travers le tube intérieur, et l'espace annulaire est rempli de cire de paraffine (Figure 2.1)

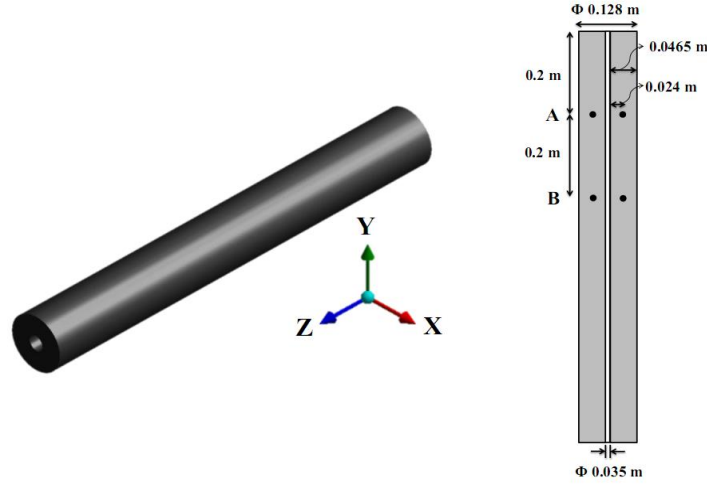


Figure 2. 1: a)Dessin schématique de l'unité LHTES, b) l'emplacement du thermocouple (Les marques représentent le point de température).

2.2.1.2. Modèle numérique

Dans la méthode d'enthalpie, la conservation de l'énergie est exprimée en termes d'enthalpie volumétrique totale et de température pour des propriétés thermophysiques constantes par :

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v H) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (2.1)$$

Où H est l'enthalpie volumétrique totale qui est la somme de chaleur sensible et chaleur latente (Eq. 2.2 et 2.3):

$$H = h_s + fL \quad (2.2)$$

$$h_s = \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (2.3)$$

Où f est la fraction liquide qui indique la fraction d'un volume cellulaire sous forme liquide et elle est associée à chaque cellule dans le domaine donné par l'équation (2.4). La zone pâteuse est une région où la fraction liquide se situe entre 0 et 1.

$$f \begin{cases} 0 & (T < T_{solidus}) \\ \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} & (T_{solidus} \leq T \leq T_{liquidus}) \\ 1 & (T > T_{liquidus}) \end{cases} \quad (2.4)$$

L'équation de conservation de l'énergie (2.1) devient :

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v h) = \nabla \cdot (k \nabla T) - \frac{\partial \rho f L}{\partial t} - \nabla \cdot (\rho v f L) \quad (2. 5)$$

Afin de tenir compte de l'effet de la fusion par convection naturelle sur le changement de densité,

L'équation de conservation de la quantité de mouvement se réécrit comme :

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v v) = - \nabla P + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + \rho g + \frac{(1-f)^2}{f^3 + \varepsilon} v A_{mush} \quad (2. 6)$$

Où \mathbf{v} est la vitesse, le terme A_{mush} est une constante de la zone pâteuse, qui décrit comment fortement la vitesse est réduite à zéro lorsque le matériau se solidifie. La constante ε est un petit nombre pour éviter la division par zéro.

L'approximation de Boussinesq a été utilisée et elle est valable si la variation de densité est faible, car elle fournit une convergence plus rapide que les autres modèles dépendants de la température. Le modèle suppose que la densité du fluide soit constante dans tous les termes de l'équation du quantité de mouvement sauf le terme de force de flottabilité, il est modélisé sur la base de la densité de référence (ρ_0) de la température (T_0) et de coefficient de dilatation volumétrique (β). Ensuite, l'équation de bilan est écrite comme :

$$\frac{\partial \rho_0 v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_0 v v) = - \nabla P + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + (\rho - \rho_0) g + \frac{(1-f)^2}{f^3 + \varepsilon} v A_{mush} \quad (2. 7)$$

avec :

$$(\rho - \rho_0) g = - \rho_0 \beta (T - T_0) \quad (2. 8)$$

et :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (2. 9)$$

Dans le modèle, les équations. (2.5) et (2.9) sont résolues uniquement dans le cas du transfert de chaleur par conduction, tandis que les équations (2.7) à (2.9) sont résolues pour considérer le mécanisme combiné de transfert de chaleur par conduction / convection. La fraction liquide est calculée lors de chaque itération dans chaque cellule du domaine en fonction de l'équilibre enthalpique. La zone pâteuse est modélisée comme un milieu poreux dans lequel la porosité diminue de 1 à 0 à mesure que le matériau se solidifie. Lorsque le matériau est complètement solidifié dans une cellule, la porosité devient nulle et la vitesse tombe à zéro.

2.2.1.3. Les conditions initiales et aux limites :

Dans les deux cas du modèle (conduction pure et conduction-convection), les conditions aux limites sur la surface du mur extérieur et les capuchons supérieur et inférieur sont bien isolés. La condition aux limites utilisée pour la surface intérieure du tuyau (paroi HTF) est le transfert de chaleur par convection qui correspond au cas de l'étude expérimentale.

$$h = Nu \frac{k}{D} \quad (2.10)$$

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re_d - 1000)Pr}{1 + 12.7\left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}}(Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad (2.11)$$

Nu : Nombre de Nusselt

K : Conductivité thermique

D : Diamètre hydraulique

Pr est le nombre de Prandtl, la corrélation est valable pour $5 \leq Pr \leq 2000$ et $3000 \leq Re \leq 5 \times 10^6$, Re c'est le nombre de Reynolds et f est le facteur de friction .

Au début, le MCP est à l'état solide, sa température ne dépasse pas 303 K. Après l'augmentation de la température, le processus de fusion commence ; lorsque le matériau atteint la température de fusion (353 K), il devient totalement liquide et lorsque la température baisse, le MCP cède l'énergie et par conséquent, il devient solide .

La température à l'intérieur du tube (HTF) est de 358 K pour la charge et 301 K pour la décharge. D'après les données expérimentales et l'analyse énergétique initiale, la variation de la température HTF dans le tube pendant le chargement et le déchargement est inférieure à 0,5°C. Afin de simplifier le problème, ce changement de température HTF n'est pas pris en compte dans la simulation.

2.2.1.4. Résultats et discussion

Les paramètres suivants ont été utilisés dans la simulation :

$$A_{mush} = 10^5, \varepsilon = 0.001, \beta = 0.002 \frac{1}{K} \text{ et } T_{ref} = 298.15 \text{ K}$$

La simulation numérique est réalisée par le logiciel ANSYS Fluent. Les modèles de solidification et de fusion sont résolus pour l'écoulement laminaire avec les équations de Navier-Stokes en

utilisant la technique de l'enthalpie-porosité. Les résultats obtenus à partir du modèle permettent de décrire l'évolution de la température et de la fraction liquide dans le système MCP, comme les montre les figures ci-dessous :

Processus de charge

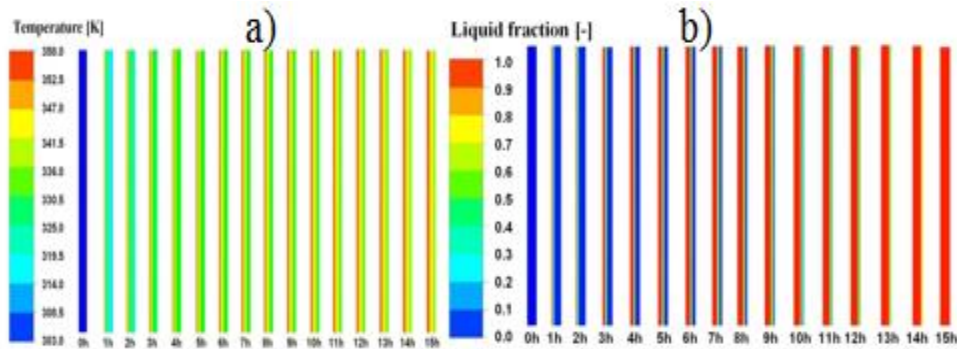


Figure 2. 2: (a) Contours de température utilisant le modèle de conduction pure Pendant un processus de charge (b) Contours de la fraction liquide utilisant le modèle de conduction pure pendant un processus de charge.

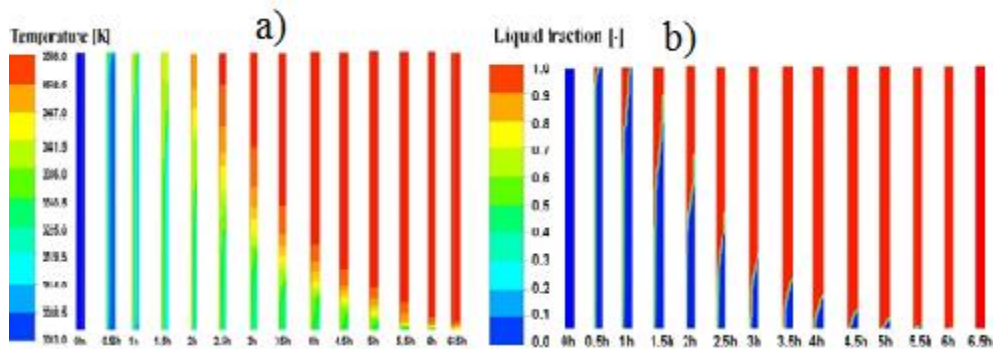


Figure 2. 3: (a) Contours de température utilisant le modèle de conduction-convection Pendant un processus de charge (b) Contours de la fraction liquide utilisant le modèle de conduction-convection pendant un processus de charge.

Les figures (2. 2 et 2. 3) montrent les contours de la température et de la fraction liquide dans le MCP pour un processus de charge.

Les résultats obtenus à partir du modèle combiné de conduction et de convection sont très différents du modèle de conduction pure.

Dans le modèle de conduction pure, le taux de transfert de chaleur total est presque le même dans la direction verticale de la surface du tube intérieur à l'interface MCP en raison de la conduction. Par conséquent, le front de fusion le long de la direction axiale se déplace à la même vitesse de la surface du tube intérieur vers la surface intérieure du cylindre.

Cependant, dans le modèle combiné, le transfert de chaleur de la paroi du tube intérieur vers le MCP se fait initialement par conduction avant que le MCP ne commence à fondre. Au fur et à mesure que le MCP fond, une fine couche de liquide se forme entre la paroi externe du tube intérieur et le matériau en phase solide et la convection naturelle commence à avoir lieu. À mesure que la zone fondue devient plus grande, la convection devient plus forte et le front d'interface se déplace plus rapidement.

- **Processus de décharge**

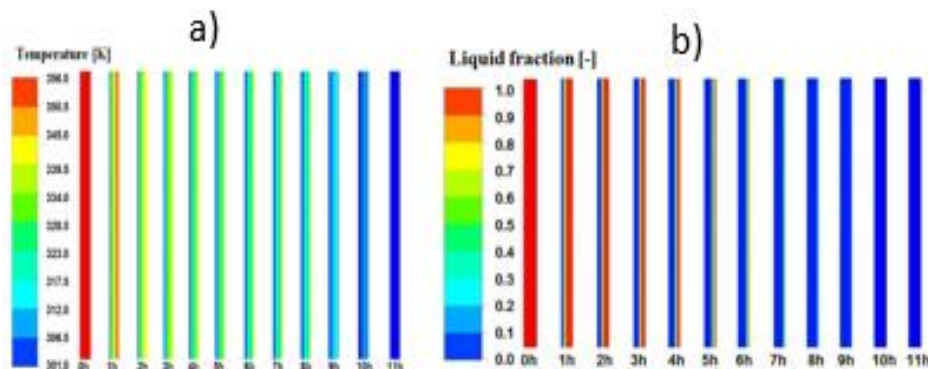


Figure 2. 4: (a) Contours de température utilisant le modèle de conduction pure pendant un processus de décharge (b) Contours de la fraction liquide utilisant le modèle de conduction pure pendant un processus de décharge.

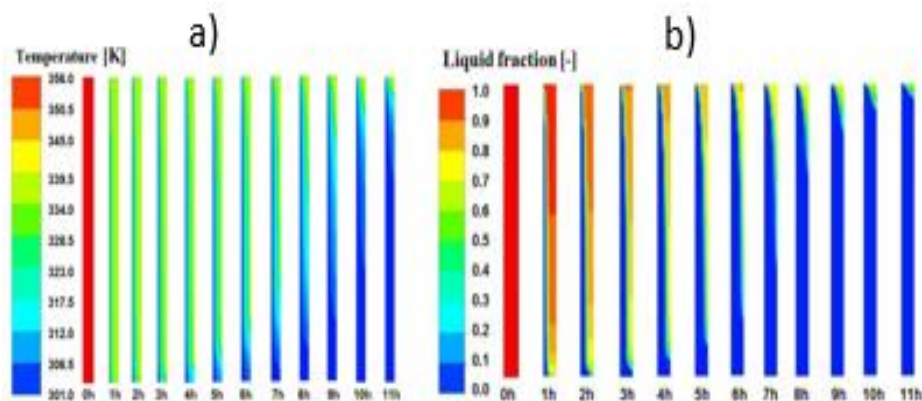


Figure 2. 5: (a) Contours de température utilisant le modèle de conduction-convection pendant un processus de décharge (b) Contours de la fraction liquide utilisant le modèle de conduction-convection pendant un processus de décharge.

Les figures 2.4 et 2.5 montrent les contours de la température et de la fraction liquide pendant un processus de décharge. La Figure 2.5 par rapport au modèle à conduction pure (figure 2.4) montre que la température du MCP décroît plus rapidement de la température initiale au point de refroidissement en raison de la convection dans le MCP liquide. En raison de la flottabilité, le MCP liquide augmente et la température du MCP varie légèrement le long de la direction axiale. Cependant, cette variation de température dans la direction axiale pendant le processus de

solidification (décharge) n'est pas aussi assez importante que celle observée dans le processus de charge, ce qui implique que le front de solidification se déplace principalement dans la direction radiale (figure 2.6).

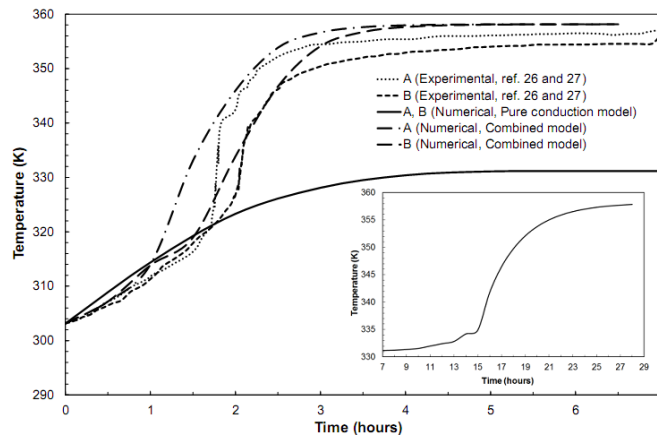


Figure 2. 6: Comparaison de la variation de température MCP pendant le processus de charge (Courbe montre la température MCP après 7 heures obtenue à partir du modèle de conduction pure).

La figure 2.6 donne une comparaison entre la température MCP expérimentale et simulée pendant un processus de charge. Elle montre que les températures MCP obtenues à partir du modèle combiné de conduction-convection correspondent mieux aux données expérimentales que celles obtenues à partir du modèle de conduction pure. On peut voir que la différence de température est très faible au début du processus de charge avant la température de MCP qui atteint le point de fusion. Cela confirme que la conduction domine le transfert de chaleur pendant cette période de charge initiale et qu'il n'y a pas de différence significative entre les deux modèles. Une fois que la température du MCP atteint le point de fusion, le modèle combiné de conduction-convection peut toujours prédire la température du MCP avec précision, contrairement au modèle de conduction pure. Ce changement est principalement causé par la convection naturelle. Dès que le MCP fond, une fine couche de MCP liquide se forme près de la paroi HTF. Le transfert de chaleur est dominé par la convection naturelle, ce qui accélère la fusion du MCP. Le MCP liquide monte et la convection naturelle est plus forte dans la partie supérieure que dans la partie inférieure. Par conséquent, la température MCP dans la partie supérieure est plus élevée à celle dans la partie inférieure comme en témoignent les températures MCP aux points A et B de la figure 2.6. Les résultats expérimentaux montrent que le temps nécessaire à tous les MCP pour atteindre 358 K est de 6,5 heures. Ce temps est presque le même que le temps de charge total simulé en utilisant le modèle combiné conduction-convection, en revanche cela prend environ 28 heures en utilisant le modèle de conduction pure.

2.2.1.5. Synthèse du modèle

Le modèle thermique développé permet de comparer deux modes de transfert de chaleur, la conduction thermique pure et la conduction-convection. Cette étude permet de décrire le comportement thermique et les caractéristiques de transfert de chaleur d'un MCP. La modélisation proposée permet de comparer la conduction pure et la conduction-convection au cours de processus de charge et de décharge. Les résultats de comparaison indiquent que le processus de charge est principalement contrôlé par la convection naturelle et que la conduction devient presque négligeable. Par conséquent, le modèle combiné de conduction - convection peut mieux décrire le transfert de chaleur dans les MCP par rapport au modèle à conduction pure. La chaleur est transférée au MCP solide initialement par conduction, puis par convection naturelle lorsque le MCP solide fond. Étant donné que la chaleur sensible est beaucoup plus petite que la chaleur latente, la conduction est moins importante et la convection naturelle est le principal mécanisme de transfert de chaleur pendant le processus de charge.

2.2.2. Modèle de VOGEL [62]

L'impact de la convection naturelle sur la fusion dans les systèmes de stockage d'énergie thermique à chaleur latente à plaques plates est étudié avec un modèle [62] numérique validé expérimentalement dans une étude de paramètres avec différentes dimensions (largeurs et hauteurs d'enceinte). Le matériel de stockage est le mélange eutectique de nitrate de sodium et de nitrate de potassium ($\text{KNO}_3\text{-NaNO}_3$).

La présente étude présente l'importance de la convection naturelle dans le processus de changement de phase des systèmes de stockage d'énergie thermique à chaleur latente pour une plaque plate à haute température. Pour évaluer l'influence de la convection naturelle sur l'amélioration du transfert de chaleur, le facteur d'amélioration de la convection est introduit. Ce nombre non dimensionnel est défini comme le rapport du flux de chaleur réel par convection naturelle à un flux de chaleur par conduction uniquement. Les résultats montrent que la combinaison convection-conduction joue un rôle très important pendant le processus de changement de phase d'un MCP.

L'objectif global de cette approche est la corrélation entre le facteur moyen d'amélioration du transfert de chaleur due à la convection, la fraction de phase liquide critique au début de convection naturelle pour une large plage de paramètres avec différentes dimensions largeurs et hauteurs d'enceinte.

2.2.2.1 Description du système :

Le modèle développé permet la résolution des équations de conservation pour un fluide incompressible, en présence d'un changement de phase solide-liquide dominé par la convection naturelle aux abords des parois verticales. Le modèle est réalisé avec ANSYS Fluent qui utilise une discrétisation en volume fini dans l'espace, une intégration temporelle implicite et la méthode SIMPLE pour le couplage pression-vitesse. Pour le processus de changement de phase, l'approche de Voller et Prakash [63] est utilisée et la constante de la zone pâteuse dans le terme Darcy est définie à 10^5 .

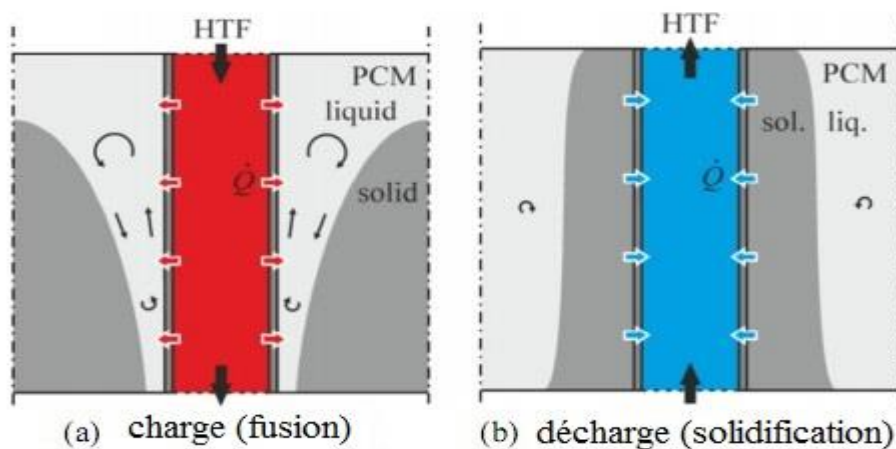


Figure 2. 7: échangeur de chaleur à plaques plates, dans laquelle les enceintes MCP sont séparées par des plaques plates creuses qui contiennent le fluide caloporteur (HTF).

Pour contribuer à la demande de recherche déclarée, un système de stockage de chaleur d'énergie thermique (LHTES) spécifique du type échangeur de chaleur à plaques plates a été analysé ; les enceintes MCP sont séparées par des plaques plates creuses. Ceux-ci contiennent le HTF. Le transfert de chaleur de chargement et de déchargement est illustré sur la figure 2.7 ci-dessus.

2.2.2.2. Les équations gouvernantes :

Les équations de Navier-Stokes qui régissent la résolution d'un écoulement incompressible, compte tenu de l'approximation de Boussinesq sont données ci-dessous :

L'équation de la conservation de masse :

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (2.12)$$

Conservation de la quantité de mouvement :

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(v \cdot)v = \mu \Delta v - \nabla p + b + S_u \quad (2.13)$$

Avec b : terme de flottabilité

S_u : source de chaleur

L'équation de la conservation d'énergie :

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} + \rho \nabla(vH) = k \Delta T \quad (2.14)$$

L'enthalpie totale H est la somme de la chaleur sensible et de la chaleur latente, elle est donnée par l'équation ci-dessous :

$$H = hs + fL \quad (2.15)$$

La chaleur sensible est exprimée par :

$$hs(T) = \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (2.16)$$

La chaleur latente est le produit de la chaleur latente de fusion L et la fraction liquide f :

$$f \begin{cases} 0 & \text{si } (T < T_m) \\ 0 \dots 1 & \text{si } (T = T_m) \\ 1 & \text{si } (T > T_m) \end{cases} \quad (2.17)$$

2.2.2.3 Résultats et discussions

Pour étudier l'impact des dimensions de l'enceinte sur la fusion par convection naturelle, une étude des paramètres avec différentes largeurs et hauteurs est réalisée. À cet effet un modèle de stockage légèrement simplifié est dimensionné, comme le montre la figure 2.8 ci-dessous.

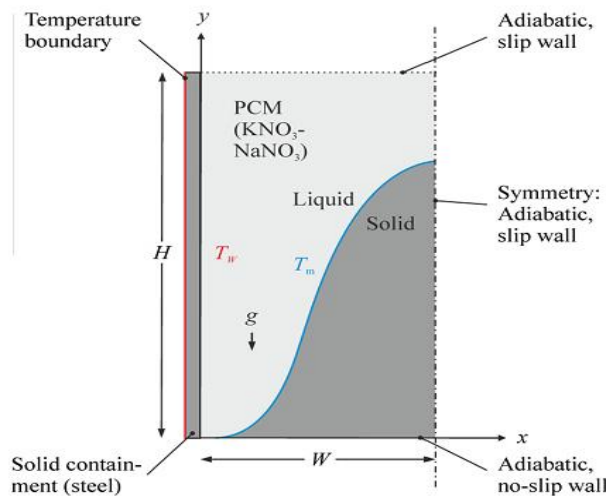


Figure 2. 8: Domaine de simulation pour l'étude des paramètres[63]

Ce domaine est simplifié à une condition aux limites de température au niveau de la paroi de confinement et une paroi adiabatique sans glissement au fond du MCP. La géométrie est définie paramétriquement afin de faire varier la hauteur et la largeur de l'enceinte.

L'évolution des fractions de phase liquide dans le temps pour toutes les variations des paramètres est illustrée à la figure.2.9. Le processus de fusion est plus lent avec des largeurs et des hauteurs plus importantes. L'augmentation de la largeur augmente la résistance au transfert de chaleur par diffusion. Cependant, la convection naturelle devient pertinente à une largeur minimale et dominante à des grandes largeurs. Mais, l'amélioration du transfert de chaleur par convection naturelle ne compense pas la résistance à la chaleur diffusive plus élevée, ce qui conduit à une fusion plus lente avec des largeurs plus importantes. La variation de la hauteur conduit à des résultats similaires. Alors que les vitesses d'écoulement dues à la convection naturelle augmentent avec la hauteur, le transfert de chaleur diminue en raison des trajets de transfert de chaleur plus longs de la source de chaleur (paroi chauffée) au dissipateur de chaleur (front de phase).

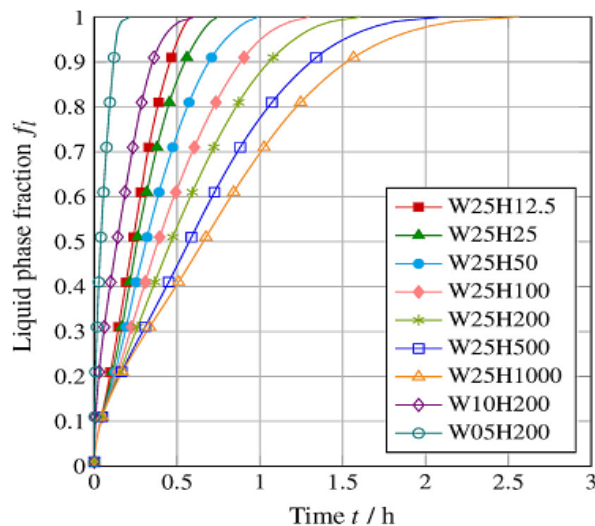


Figure 2. 9: Fractions de phase liquide en fonction du temps. A Différents paramètres de dimensionnement (largeur W/ hauteur H).

Pour analyser l'impact de la convection naturelle, un facteur de renforcement convectif est défini comme le rapport entre le flux thermique réel par convection naturelle et un flux thermique hypothétique par conduction thermique uniquement.

Les résultats sur les facteurs d'amélioration convectifs sont présentés sur la figure 2.10 pour toutes les variations de paramètres.

Pour le cas avec la plus petite largeur de 5 mm et la hauteur de 200 mm, une petite valeur proche de l'unité est trouvée, ce qui signifie que le transfert de chaleur se produit principalement par

conduction. Avec une largeur croissante mais une hauteur constante, l'amélioration du transfert de chaleur par convection augmente de manière significative jusqu'à une valeur maximale de quatre pour une largeur de 25 mm. Avec une hauteur croissante à largeur constante, l'amélioration du transfert de chaleur diminue légèrement jusqu'à un facteur de trois pour une hauteur de 1000 mm. Avec une hauteur décroissante, elle augmente jusqu'à une valeur maximale de 11 pour la plus petite hauteur de 12,5 mm. Cependant, cette tendance devrait s'inverser à des hauteurs encore plus faibles. Lorsque la hauteur est réduite à une taille de l'ordre de l'épaisseur de la couche limite au niveau de la paroi, le flux de fluide reste stable et le facteur de renforcement convectif revient à l'unité.

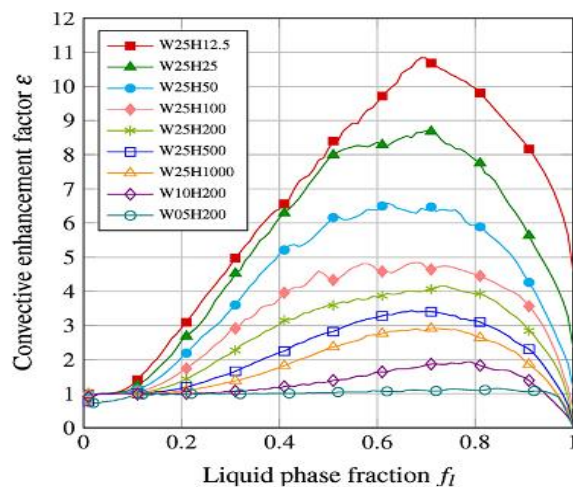


Figure 2. 10: Facteur de renforcement convectif de tous les cas de test Pendant la fusion tracée sur la fraction en phase liquide.

2.2.2.4 Synthèse du modèle

Le modèle envisagé montre l'influence de la convection naturelle, il a été montré en définissant un facteur de renforcement convectif qui donne l'amélioration du transfert de chaleur obtenu par convection naturelle par rapport à un cas hypothétique de conduction uniquement. Ce paramètre indique clairement l'impact des dimensions de l'enceinte et de la fraction de phase liquide sur la convection naturelle. Les données présentées peuvent être utilisées pour l'optimisation de la conception des plaques plates LHTES et des systèmes similaires, compte tenu de l'effet de la convection naturelle pendant la fusion.

Les résultats indiquent que l'amélioration du transfert de chaleur due à la convection naturelle augmente avec des largeurs plus grandes et des hauteurs plus petites des enceintes de stockage. Par conséquent, la segmentation verticale des enceintes hautes doit être envisagée pour améliorer le transfert de chaleur pendant la charge.

2.2.3. Modèle de KASIBHATLA [64]

La modélisation numérique proposée dans cette partie se concentre sur le processus de fusion d'un MCP macro-encapsulé. La prise en compte de la relation enthalpie-température non linéaire et le ralentissement de la vitesse en phase solide sont donc fondamentales. Les résultats numériques pour différentes viscosités solides sont comparés par des expériences. L'influence de la viscosité solide sur le processus de fusion et la convergence pression-vitesse sont étudiées.

2.2.3.1. Description du système

La géométrie choisie pour simuler le modèle développé est une cavité cubique 40 mm × 40 mm × 40 mm (Figure 2.11). Dans les simulations, les limites avant et arrière de la cavité cubique sont considérées symétriques. En raison des frontières avant et arrière symétriques, la structure est d'une géométrie 2D virtuelle contribuant à une cellule dans la direction z. Le MCP utilisé pour la simulation est RT35HC de Rubitherm.

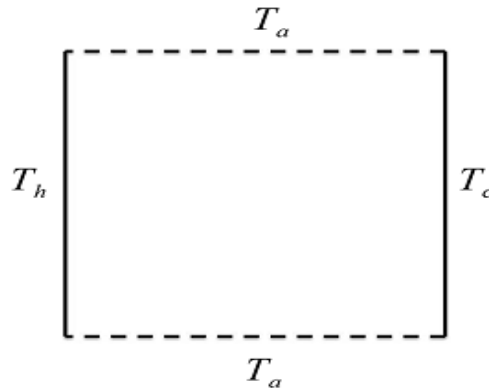


Figure 2. 11: la géométrie de la capsule MCP

2.2.3.2. Les conditions initiales et aux limites :

Le taux de fusion du MCP dépend de la chaleur faible dans le matériau. Par conséquent, une condition aux limites de transfert de chaleur plus exacte ou une condition aux limites de Dirichlet-Neumann est mise en œuvre, c'est-à-dire le transfert de chaleur autour de la frontière en utilisant :

$$\frac{dT}{dn} = \frac{\alpha}{k} (T_i - T_{\infty}) \quad (2. 18)$$

Où n est la direction normale du transfert de chaleur, α est le coefficient de transfert de chaleur qui est égal à 2500 W / (m² K), il représente le transfert de chaleur à travers les plaques de cuivre dans les expériences. T_i la température initiale de MCP, T_{∞} la température ambiante à la limite et k la conductivité thermique du MCP.

Le côté gauche de la géométrie est chauffé à une température $T_h = 315,15$ K et le côté droit est chauffé à une température $T_c = 303,15$ K. Les parois supérieure et inférieure de l'enceinte sont soumises à des conditions adiabatiques T_a .

2.2.3.3. Modèle numérique

Les équations de Navier – Stokes régissant la résolution d'un écoulement incompressible compte tenu de l'approximation de Boussinesq sont :

L'équation de la conservation de masse :

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (2.19)$$

L'équation de la conservation de quantité de mouvement :

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(v \cdot \nabla)v = \mu \Delta v - \nabla p + S_B + S_i \quad (2.20)$$

Avec S_B c'est le terme de flottabilité

S_i un terme source

L'équation de la conservation d'énergie :

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} + \rho \nabla(vH) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (2.21)$$

Le terme source S_B qui est égal à $\rho g \beta (T - T_{ref})$ représente la convection naturelle provoquée par le changement de densité ρ qui est implémenté par l'approximation de Boussinesq [65]. Alors que u est la vitesse, p est la pression, t est le temps, S_i : est un terme source supplémentaire utilisé pour représenter toute force ajoutée dans un phénomène physique et β est le coefficient de dilatation du liquide correspondant à une température de référence T_{ref} . Dans l'équation de la conservation d'énergie, T est la température, κ la conductivité thermique et H l'enthalpie totale.

L'enthalpie totale H dans l'équation (2.22) est la somme de la chaleur sensible et de la chaleur latente, elle est donnée par l'équation ci-dessous :

$$H = h_s + fL \quad (2.22)$$

Alors l'équation (2.21) ci-dessus devient :

$$\rho \left[\frac{\partial C_p T}{\partial t} + \nabla \cdot (v C_p T) \right] = \nabla \cdot (k \nabla T) - \left[\frac{\partial \rho f L}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v f L) \right] \quad (2.23)$$

2.2.3.4. Résultats et discussion

La grille de calcul est générée pour simuler les phénomènes de fusion avec le modèle numérique développé. Il a été montré que le front de fusion et la vitesse de fusion du MCP sont largement influencés par la viscosité solide comparés aux résultats expérimentaux. C'est ce qui va évaluer la quantité de substance fondue (MCP) à chaque instant.

Les résultats de simulation par le logiciel ANSYS fluent permettent de décrire l'évolution de la fraction liquide en fonction du temps avec viscosité solide $\mu_s = 10^5$ Pa.s.

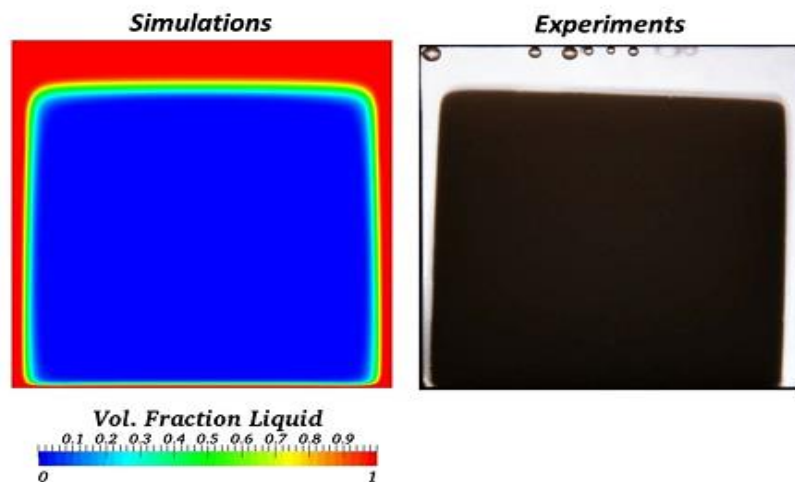


Figure 2. 12: Validation qualitative de la fusion MCP après 6 min avec $\mu_s = 5 \times 10^3$ Pa.s,

Les résultats du modèle numérique utilisant une faible valeur de viscosité montrent une bonne acceptation avec les résultats expérimentaux qualitatifs jusqu'à $t = 6$ min. Il a été observé à partir des simulations que le MCP solide se dépose au bas de la géométrie de la capsule. Ensuite, le MCP solide subit une déformation en raison de son propre poids et de la mise en œuvre de la faible valeur de viscosité solide.

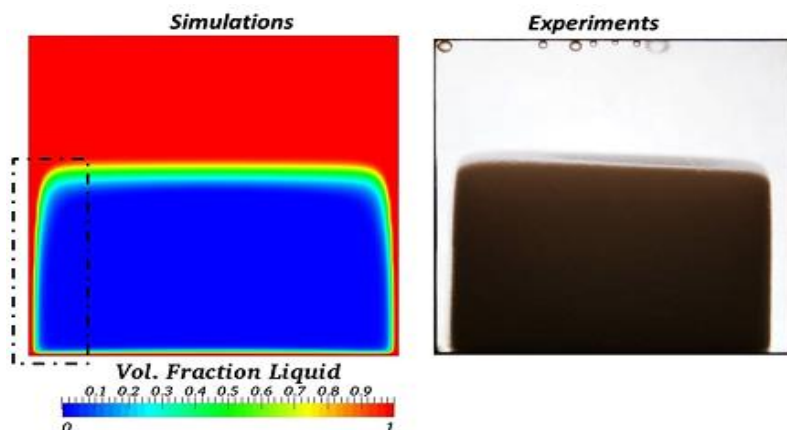


Figure 2. 13: Validation qualitative de la fusion MCP après 12 min avec $\mu_s = 5 \times 10^3$ Pa.s,

Dans cette étude, la viscosité effective est définie comme linéaire par morceaux. Dans ce cas, la réduction de la valeur de viscosité dans la phase solide diminue proportionnellement la valeur de viscosité dans la zone pâteuse. En raison de cela, le matériau dans la zone pâteuse proche de la température de fusion a tendance à être faible, ce qui entraîne la déformation observée sur la figure 2.13.

2.2.3.5. Synthèse du modèle

Cette étude se concentre sur la modélisation numérique du processus de fusion d'un MCP macro-encapsulé. La relation enthalpie-température non linéaire et le ralentissement de la vitesse en phase solide sont développés pour la solution numérique des problèmes de changement de phase de la région pâteuse. Pour valider le modèle numérique et également pour étudier l'influence de la valeur de viscosité solide sur le processus de fusion, différents cas de tests ont été simulés. Dans le modèle développé, un compromis entre le temps de calcul et la précision des résultats est fait, car la grande valeur de viscosité exige un temps de calcul important pour la détermination du modèle. Alors que la faible valeur de viscosité nécessite un temps de calcul faible, mais le solide MCP se déforme en raison de la faible viscosité influençant la sortie du solide.

2.2.4. Modèle de KUMAR [66]

La présente étude vise à aborder l'influence de la constante de zone pâteuse sur les caractéristiques de fusion d'un MCP, en effectuant des simulations numériques transitoires en 2D dans une cavité rectangulaire [66]. Le MCP considéré pour l'étude est le gallium. La simulation numérique a été réalisée par le logiciel ANSYS Fluent.

2.2.4.1. Description du système

Une vue schématique du modèle physique bidimensionnel est représentée sur la Figure 2. 14. La dimension de base de la cavité rectangulaire contenant un métal pur, le gallium est de 8,89 cm × 6,35 cm. Le côté gauche de l'enceinte rectangulaire est chaud $T_h = 311$ K et le côté droit de l'enceinte est froid $T_c = 301,3$ K. Les parois supérieure et inférieure de l'enceinte sont soumises à des conditions adiabatiques. La température initiale de l'enceinte est fixée à 301,3 K.

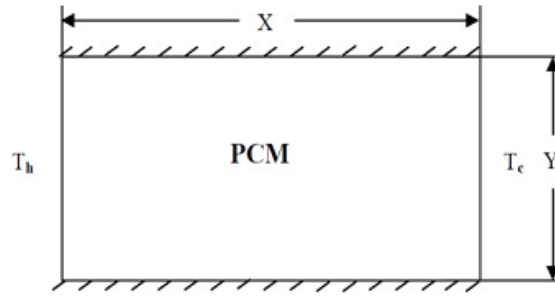


Figure 2. 14: Vue schématique d'une enceinte rectangulaire 2D

Les hypothèses suivantes ont été faites lors de la résolution du problème mentionné ci-dessus :

- Le gallium (MCP) est homogène et isotrope.
- L'approximation de Boussinesq est prise en compte pour l'effet de convection naturelle.
- La différence de température entre le solidus et le liquidus est prise à 0,001 K.

2.2.4.2. Le Modèle simplifié

Les équations régissant la présente étude sont présentées ci-dessous :

L'équation de la continuité :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2. 24)$$

L'équation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + A_c u_i + S_i \quad (2. 25)$$

Avec A_c c'est le terme de porosité

S_i source de quantité de mouvement

L'équation de la conservation d'énergie ;

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i H)}{\partial x_i} = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (2. 26)$$

L'enthalpie du matériau est écrite comme la somme de l'enthalpie sensible h_s et de la chaleur latente h_l .

$$H = h_s + h_l \quad (2. 27)$$

$$\text{Avec :} \quad h_s = \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (2. 28)$$

La fraction liquide f est donnée par :

$$f \begin{cases} 0 & (T < T_{solidus}) \\ \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} & (T_{solidus} \leq T \leq T_{liquidus}) \\ 1 & (T > T_{liquidus}) \end{cases} \quad (2. 29)$$

La chaleur latente h_l dans l'équation peut être écrite en termes de chaleur latente du matériau L.

$$h_l = fL \quad (2. 30)$$

Le terme A_c dans l'équation de quantité de mouvement est défini comme suit :

$$A_c = - \frac{A_{mush}(1-f)^2}{f^3 + \varepsilon} \quad (2. 31)$$

Où ε est une faible constante de calcul (0,0001) pour éviter la division par zéro.

2.2.4.3. Résultats et discussions

Le problème mentionné ci-dessus est résolu dans ANSYS Fluent. La géométrie de calcul est également divisée en 42×32 cellules et après un raffinement supplémentaire de la géométrie à 60×50 cellules. Une taille de pas de temps de 0,01 seconde est choisie avec un critère de convergence pour la continuité, les composantes de vitesse dans les directions x et y et l'énergie à 10^{-3} , 10^{-4} et 10^{-6} respectivement. Pour le couplage pression-vitesse, le schéma SIMPLE est utilisé.

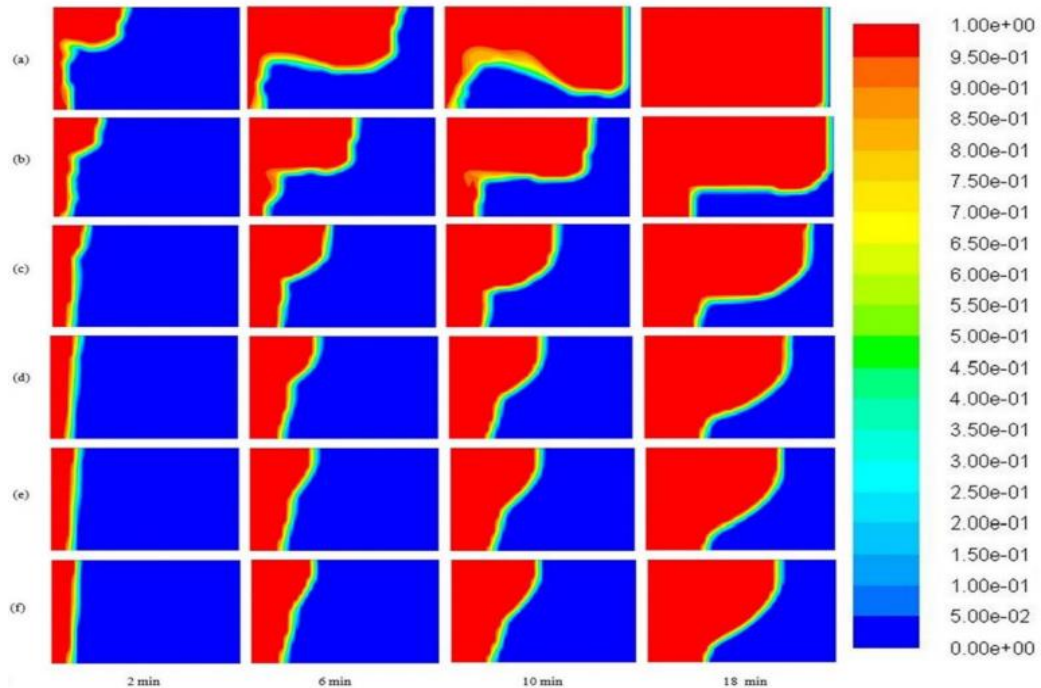


Figure 2. 15: contours de fraction pour A_{mush} :
 (a) 10^3 ; (b) 10^4 ; (c) 10^5 ; (d) 10^6 ; (e) 10^7 ; (f) 10^8

La Figure 2.15 montre les contours de la fraction de fusion pour les intervalles de temps considérés et la plage de la constante de zone pâteuse.

La forme du contour devient plus asymétrique pour toutes les valeurs de la constante de la zone pâteuse (A_{mush}) lorsque la durée augmente, cela est dû à l'augmentation de l'effet de flottabilité qui montre la dominance des courants convectifs dans la partie supérieure par rapport à la partie inférieure de la région fondue. Mathématiquement dans l'équation 2.27, si la valeur A_{mush} augmente, le terme de diffusion augmente également. De même avec l'augmentation de la valeur A_{mush} , une diminution du taux de transfert de chaleur peut être observée. Cette diminution du taux de transfert de chaleur est due à la diminution de la force de convection.

La figure 2.16 montre la variation de la fraction de fusion avec le temps pour des valeurs A_{mush} allant de 10^3 à 10^8 . On peut noter que pour $A_{mush} = 10^3$, le taux d'augmentation de la fraction de fusion est élevé et il est observé qu'il diminue avec l'augmentation d' A_{mush} c'est-à-dire de 10^4 à 10^8 .

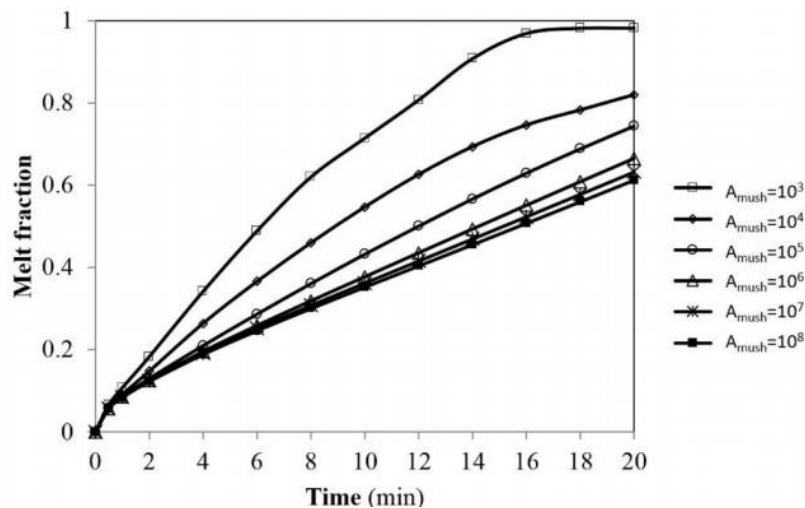


Figure 2. 16: Variation de la fraction de fusion avec le temps pour différentes valeurs d' A_{mush} (Constante de la zone pâteuse).

La principale raison de la diminution de la fraction de fusion avec l'augmentation de l' A_{mush} est due à la diminution de la force de convection qui peut être déduite des contours de la fraction de fusion comme l'illustre à la figure 2.15.

2.2.4.4. Synthèse du modèle

Dans la présente étude, une étude numérique transitoire 2D des caractéristiques de fusion du gallium pur dans une enceinte rectangulaire a été réalisée pour différentes constantes de zone pâteuse allant de 10^3 à 10^8 . Les simulations ont été effectuées dans ANSYS Fluent. Un algorithme SIMPLE a été utilisé pour le couplage pression-vitesse.

Sur la base de l'étude, on peut noter que la thermohydraulique d'un MCP est significativement influencée par A_{mush} . L'étude pourrait révéler qu'avec l'augmentation d' A_{mush} la force de convection diminue, ce qui conduit en outre à une diminution du taux de transfert de chaleur. Par conséquent, une sélection appropriée de la constante de zone pâteuse est très nécessaire pour la prédiction précise des caractéristiques de transfert de chaleur d'un MCP.

2.3. CONCLUSION

Ce chapitre a mis en exergue un ensemble de modèles qui ont été développés sur l'étude des comportements des MCP dans le but de déceler le comportement thermomécanique de manière simple. Toutes ces variations des modèles poussent à exprimer un ensemble des lois mathématiques et d'examiner les caractères communs aux différents modèles. Nous avons souligné dans chaque cas les spécifiées mathématiques dans les différentes synthèses.

Comme nous l'avons distingué, la variété des approches concernant la transformation de phase est basée sur des modèles énergétiques, qui demeurent plus au moins simples par rapport aux modèles couplés de la transformation martensitique le long du parcours de la déformation ou de l'essai. Ce chapitre se focalise sur l'étude numérique, la modélisation et la simulation des systèmes MCP, qui est adoptée dans différentes applications de stockage d'énergie solaire. L'étude est effectuée pour étudier et comparer les résultats et la précision de différents modèles mathématiques, méthodes numériques et analyse thermodynamique de l'utilisation des MCP dans différents systèmes qui les intègrent.

Les modèles pris dans la globalité permettant d'évaluer les effets de la température et l'effet de changement de phase avec les conditions aux limites prises en considération.

Le travail de la présente thèse cherche à établir une méthodologie de modélisation systématique pour la charge d'un module, une méthodologie systématique capable de contrôler à la fois pour la charge et la décharge, un modèle système qui sera apte de modéliser l'ensemble des phases (charge et décharge) et des conditions de fonctionnement d'un module de stockage, de manière précise et tout en maintenant des temps de calcul raisonnables. L'approche constituera alors une méthode de modélisation complète et autosuffisante d'un module de stockage adaptée à l'usage dans un contexte d'ingénierie. Le chapitre suivant insistera de manière générale sur les raisons pour lesquelles le recours aux mathématiques est devenu inévitable dans la modélisation de phénomène de stockage d'énergie.

Chapitre

**CHAPITRE 3 : MODELISATION DU
CHANGEMENT DE PHASE SOLIDE-
LIQUIDE**

3.1. INTRODUCTION

Les technologies du stockage de la chaleur sont d'ores et déjà adoptées comme moyen efficace de gestion de la disponibilité d'énergie et de réduction des fluctuations de température dans diverses applications pratiques telles que : l'industrie électronique, l'industrie automobile et le chauffage d'eau sanitaire [3]. Le stockage de chaleur latente par rapport au stockage de chaleur sensible [4] présente une aubaine significative, car il utilise moins de volume de stockage pour atteindre une quantité spécifiée de charge thermique. De surcroît, le processus du stockage de la chaleur latente est un processus à température constante.

L'un des phénomènes physiques les plus importants du stockage de la chaleur latente est le changement de phase solide-liquide, qui est également un processus très critique pour de nombreuses applications. Pour mieux appréhender le changement de phase solide-liquide nous avons besoin de connaître : la distribution de la température dans les phases solides et liquides, les caractéristiques d'écoulement dans la phase liquide et les caractéristiques du transfert de chaleur.

Pour mieux analyser le comportement d'une unité du stockage thermique à changement de phase solide-liquide couplé avec les modes du transfert de chaleur, on dépeint un modèle mathématique. L'étude présente en premier lieu une description générale de l'ensemble du processus de développement du modèle à partir des équations de Navier-Stokes en mettant en évidence les hypothèses prises en compte pour les simplifier, en se servant des méthodes de vérification et de validation classiques mentionnées dans la littérature. En deuxième lieu, l'impact de chaque paramètre d'importance sur le fonctionnement de l'unité du stockage thermique est analysé. Cette analyse octroie la vérification et la validation du modèle qui seront effectuées en dynamique des fluides numériques (CFD : Computational Fluid Dynamics). Ceci consiste à intégrer ces codes de calcul CFD dans une démarche détaillée, qui permet de les valider afin qu'ils puissent être utilisés avec une grande précision pour simuler des scénarios des modes de transfert réagissant sur les systèmes solaires.

La simulation numérique du changement de phase solide-liquide sera développée au chapitre suivant, elle sera basée sur la résolution des équations de Navier-Stokes en prenant en compte les conditions aux limites. Il est à noter que la méthode a été uniquement effectuée dans un cadre de simulation numérique, aucun test expérimental n'a été effectué.

3.2. DESCRIPTION DU PROBLEME

3.2.1. Problématique du modèle

Cette section présente l'interaction des différents modes du transfert de chaleur notamment le transfert d'énergie par rayonnement solaire à l'intérieur d'un MCP. Le modèle est développé sous l'approximation de Boussinesq, il permet de résoudre des équations du transfert dans un système constitué d'une cavité rectangulaire. Les équations théoriques couvrant cette physique intègrent les différents modes du transfert thermique (convection, conduction, rayonnement) pour décrire le comportement thermique de MCP. Les effets de l'angle d'inclinaison et l'orientation de la cavité sur le phénomène de la fusion sont examinés.

L'étude vise aussi à améliorer la performance d'une unité de stockage thermique ou d'un lit de stockage sous l'effet de plusieurs paramètres physiques tels que la vitesse, la température d'entrée du fluide caloporteur, le taux du stockage thermique et la fraction de fusion du MCP. Le modèle envisagé doit être capable de résoudre les équations avec une assez grande précision et une assez bonne vitesse, car plusieurs simulations numériques doivent être réalisées. L'impact de chaque paramètre sur le fonctionnement du système thermique et le comportement du matériau est analysé. Il est à noter que la méthode a été effectuée pour décrire comment la vitesse, la pression, la température et la densité d'un fluide en mouvement sont liées.

3.2.2. Modèle physique « description géométrique du dispositif »

Le modèle numérique représente un élément de stockage d'énergie sous forme d'une cavité rectangulaire, l'espace interne de ce dispositif est rempli d'un MCP.

Pour étudier l'interaction des différents modes du transfert de chaleur à l'intérieur d'une cavité rectangulaire MCP en régime laminaire. Au cours du processus de fusion, le stade précoce est régi par la conduction et le rayonnement. Au fur et à mesure que la fraction liquide augmente, la convection se développe et domine ensuite le transfert de chaleur. Dans la phase solide non encore fondue, la conduction reste la principale forme du transfert de chaleur. La convection naturelle dans la phase liquide provoque une fusion plus rapide de la partie supérieure du MCP que celle de la partie inférieure, ce qui finit par modifier la forme de l'interface solide-liquide. (Figure 3.1)

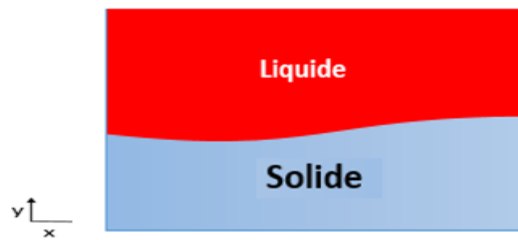


Figure 3. 1: Géométrie du modèle et répartition des limites du domaine étudié.

Le transfert de la chaleur dans la couche du MCP est réalisé avec changement de phase. Le système de la figure 3.2 ci-dessous décrit le stockage d'énergie thermique dans les couches de MCP dont l'épaisseur E et la hauteur L par la circulation d'eau chaude. Inversement, la circulation de l'eau froide entraîne le déstockage de l'énergie thermique.

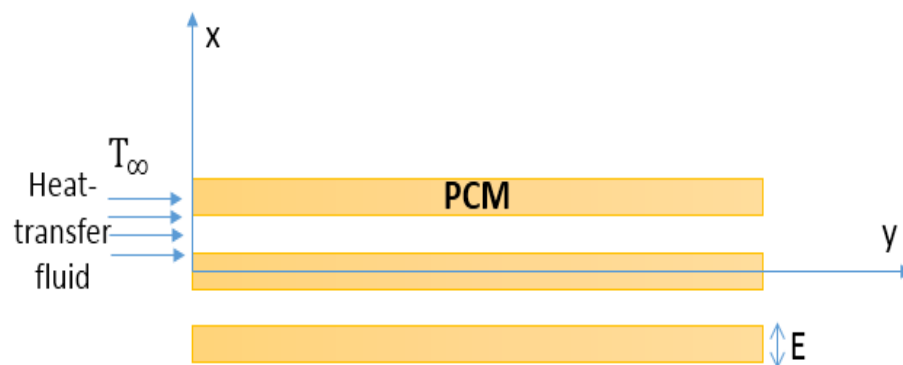


Figure 3. 2 : Schéma des plaques MCP simplifiées.

3.2.3. Transfert de la chaleur dans les couches MCP

Un transfert thermique est un transit d'énergie sous forme microscopique désordonné, c'est un mode d'échange d'énergie thermique entre deux systèmes.

Au cours des 20 dernières années, le transfert de chaleur dans la couche MCP est réalisé par un changement de phase. En fait, le changement de phase solide-liquide a été étudié en utilisant des méthodes numériques ou expérimentales. En effet, le phénomène de changement de phase est un problème non linéaire très complexe qui associe trois phénomènes fondamentaux : le transfert de chaleur par convection naturelle dans la phase liquide, la conduction de la chaleur dans la phase solide et le rayonnement.

Dans le cas où l'un de ces trois modes est prépondérant, les effets des autres sont faibles, et ils peuvent être négligés, ce qui simplifie considérablement l'analyse du problème [5-7].

L'amélioration de la conductivité thermique des MCP constitue la voie apparemment la plus directe vers l'amélioration du transfert de chaleur. Cependant, de nombreuses études ont démontré

que la négligence des autres modes de transfert de chaleur par rapport à la conduction influe négativement sur le processus de fusion/solidification, le meilleur exemple de ceci est vu dans l'importance du transfert de chaleur par convection dans le processus de fusion des MCP.

Il est donc clair que la conduction seule n'est pas déterminante, car il faut prendre en considération les autres modes de transfert de chaleur (le rayonnement et la convection) dans les processus de changement de phase des systèmes de stockage de chaleur. Les stratégies visent à améliorer les autres modes de transfert de chaleur à savoir la convection et le rayonnement.

Dans cette partie, on va développer les différents modes de transfert de la chaleur qui influent sur la couche MCP.

- ✓ La conduction thermique
- ✓ La convection thermique
- ✓ Le rayonnement

3.3. LES PRINCIPAUX MODES DE TRANSFERT DE CHALEUR

Le mécanisme d'apparition de chacun de ces modes [67] est présenté brièvement ci-dessous :

3.3.1. Mode de la conduction thermique :

C'est le transfert de chaleur dans la matière se réalisant sans mouvement macroscopique de la matière sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon trois mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des molécules (dans les gaz et les liquides), une transmission par les vibrations des réseaux cristallins (dans les solides non-conducteurs) et une transmission par déplacement d'électrons libres (dans les métaux conducteurs) [68].

Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) propose en 1822 la loi de la conduction connue maintenant sous le nom de loi de Fourier. Cette relation indique que le flux de chaleur est proportionnel au gradient de la température et se fait dans la direction des températures décroissantes. La loi de Fourier s'écrit par l'équation suivante :

$$\vec{\varphi} = -K S \overrightarrow{\text{grad}} T \quad (3.32)$$

Avec :

Φ : Flux de chaleur transmis par conduction (W).

K : Conductivité thermique du milieu ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$).

S : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m^2).

T : température du fluide en ($^{\circ}C$).

Le signe moins indique que le transfert de chaleur se fait dans la direction des températures décroissantes.

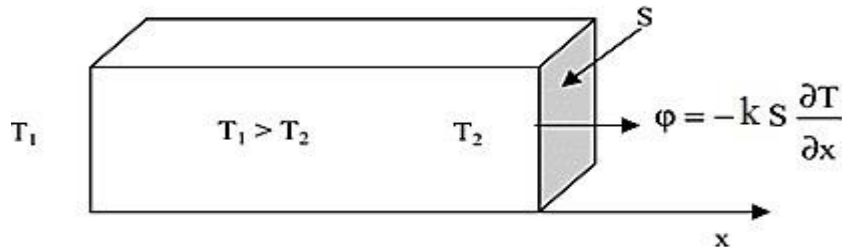


Figure 3. 3 : schéma du transfert de chaleur conductif.

Ces propriétés ne sont pas constantes et varient avec la température. Dans le cas général et afin de réduire la complexité des équations à résoudre, les modèles analytiques supposent le plus souvent que les propriétés thermophysiques sont constantes dans la plage de température utilisée. La méthode analytique d'étude de la conduction considère les corps comme des milieux continus en négligeant leur structure moléculaire. Cette hypothèse n'est pas gênante du fait que dans la majorité des cas, les dimensions des corps observés sont beaucoup plus grandes que celles de leurs particules élémentaires ainsi que les distances qui les séparent. Il faut mentionner que le plus souvent les applications techniques de la conduction thermique sont relatives à des corps solides (figure 3.3). Dans les liquides et les gaz, elle ne se manifeste que si le transfert par convection est totalement exclu.

La littérature sur les processus de fusion et de solidification du MCP montre que la conduction thermique est le principal mécanisme de transfert de chaleur au cours du processus de solidification, alors que la convection naturelle joue un rôle essentiel au cours du processus de fusion. La plupart des modèles de processus de fusion ne prenaient en compte que la conduction thermique due à la complexité de la description de la convection naturelle au cours du processus de fusion.

En conclusion, la conduction représente le processus de propagation de la chaleur par contact direct entre les particules d'un corps ou entre des corps ayant des niveaux d'énergie, donc des températures différentes en raison du mouvement de ces particules élémentaires. Dans n'importe quel milieu ce mode de transfert thermique tend à uniformiser la répartition d'énergie cinétique des particules qui constituent le corps.

3.3.2. Mode de la convection thermique

C'est le transfert de chaleur dans la matière avec un déplacement macroscopique de la matière, dû aux différences de densités engendrées par des différences trop importantes de températures. La transmission de chaleur se fait entre un solide et un fluide.

Le transfert d'énergie par convection s'exprime d'une façon pratique par la loi de refroidissement de Newton :

$$\varphi = h S(T_p - T_\infty) \quad (3.33)$$

Avec :

φ : Flux de chaleur transmis par convection (W) ; h : Coefficient de transfert de chaleur par convection ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$) ; T_p : Température de la surface du solide ($^\circ\text{C}$) ; T_∞ : Température du fluide loin de la surface du solide ($^\circ\text{C}$) ; S : Aire de la surface de contact solide/fluide (m^2).

On distingue deux types de convection : la convection naturelle et la convection forcée.

En convection naturelle les mouvements du fluide sont provoqués par des gradients de densité dus à la non-uniformité de la température. Les couches chaudes donc de poids spécifique plus faible sont soumises à des forces dirigées vers le haut suivant un mécanisme analogue à celui de la poussée d'Archimède. Dans les régions à température élevée, le fluide prend donc un mouvement ascendant. Le phénomène inverse des courants descendants se produit pour les parties du fluide dont la température est inférieure à celle du fluide chaud. Les courants de convection naturelle sont alors dus à des différences de poids spécifique et par conséquent le phénomène se produit en raison de l'existence du champ de pesanteur terrestre. L'intervention du poids a pour effet de donner à la verticale un rôle privilégié. La définition de la géométrie d'un système convectif doit donc faire intervenir la forme et les dimensions ainsi que la disposition par rapport à la verticale. Pour formaliser la convection naturelle, il faut décrire le couplage des champs de température, de pression et de vitesse à partir des équations de conservation de quantité de mouvement, de la masse et de l'énergie.

La convection forcée : si le mouvement du fluide est provoqué par une action externe, telle qu'une pompe ou un ventilateur, le processus est appelé convection forcée. La circulation d'un fluide est provoqué par le dispositif (pompe, compresseur, turbine) dans ce cas le transfert de chaleur est plus rapide que celui de la convection naturelle.

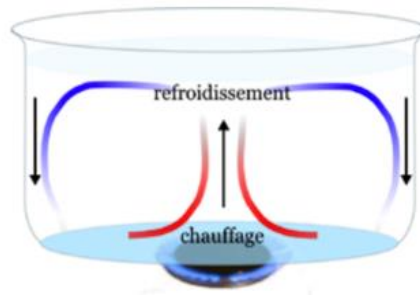


Figure 3. 4 : Phénomène de convection naturelle dans un liquide

La convection naturelle est en fait un mouvement du fluide (à savoir gaz ou liquide) induit par des forces pesantes ou forces de poussée d'Archimède. Ces dernières sont dues à des différences de masse volumique. Ces différences de masse volumique peuvent être causées par exemple par des différences de température ou par des différences de la concentration des espèces chimiques. En général, ce qui est dans notre cas, c'est un gradient thermique qui est la cause de cet écoulement de convection naturelle. En effet, du fait de l'agitation thermique, la masse volumique du fluide diminue quand la température augmente.

Tan et al. [69] ont étudié de manière expérimentale les phénomènes de flottabilité et de convection naturelle au cours du processus de fusion d'un MCP dans une capsule sphérique. Ces résultats ont été validés avec une solution numérique obtenue à l'aide du logiciel CFD FLUENT. La découverte montre que le transfert de chaleur par conduction dominait au début, tandis que la convection induite par la flottabilité devenait plus importante à mesure que le volume de la fraction liquide augmentait. Cependant, le MCP fondu est monté vers le haut dans les régions supérieures de la sphère en raison de la convection naturelle. En conséquence, les régions supérieures de la sphère sont fondues en premier suivies des autres régions. Une autre conclusion intéressante des résultats de calcul est que la distribution de la température a fluctué de façon chaotique à certains points de la sphère, en raison de la présence de la couche de fluide instable à ces points. Les résultats de cette étude sont en concordance avec les observations d'une précédente recherche du même auteur [70].

3.3.3. Mode de rayonnement thermique :

Le phénomène de rayonnement thermique [37- 41] constitue une forme particulière du transfert thermique dans laquelle le porteur d'énergie n'est plus constitué par des particules, mais par des ondes électromagnétiques ayant à l'origine l'agitation atomique à la surface d'un corps.

La chaleur passe d'un corps à haute température vers un corps à basse température sous forme d'un rayonnement électromagnétique (photons), les deux corps devant être dans un milieu transparent (comme l'air ou le vide).

Dans les problèmes de conduction, si on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant, le flux de chaleur transmis s'exprime par la relation :

$$\varphi = \sigma \varepsilon_p S (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (3.34)$$

Avec : Φ : Flux de chaleur transmis par rayonnement (W) ; σ : Constante de Stefan ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$) ; ε_p : Facteur d'émission de la surface ; T_p : Température de la surface (K) ; T_∞ : Température du milieu environnant la surface (K) ; S : Aire de la surface (m^2).

L'amélioration du transfert de chaleur par rayonnement mérite cependant une attention supplémentaire bien que sa nouveauté dans ce domaine. En tant que tel, peu d'attention a été accordée au rayonnement thermique en tant que mode de transfert de chaleur dans la fusion / solidification de ces matériaux [71].

3.4. MODELISATION DU CHANGEMENT DE PHASE SOLIDE/LIQUIDE

3.4.1. Description du modèle thermo-fluidique couplé

Cette partie s'attachera à écrire des équations mathématiques à partir du principe de conservation pour un système fermé. Mathématiquement, cela se traduit par des équations de conservation. Cet objectif sera considéré atteint lorsque nous parviendrons à extraire les phénomènes physiques sur lesquels le fonctionnement thermo-fluidique est basé. Les physiques mises en jeu font intervenir plusieurs domaines tels que la thermique, la mécanique des fluides ainsi que la thermodynamique [72]. Nous tentons dans une première approche théorique à découpler ces domaines et ainsi de faire ressortir certaines caractéristiques importantes du comportement de notre machine thermique.

3.4.1.1. Mécanismes physiques en jeu

Commençons par établir quels sont les phénomènes physiques observés lors du transfert thermique de notre dispositif thermique.

Dans cette étude, nous avons choisi de décrire la dépendance en température de la densité en utilisant l'approximation de Boussinesq. Celle-ci suppose que la densité est considérée constante partout dans le domaine sauf dans le terme de gravité de l'équation de quantité de mouvement de

Navier-Stokes, dans le but de simuler la convection naturelle qui est due à une différence de la température qui induit une différence de densité dans le fluide, la variation de la masse volumique induit une force volumique donnée par :

$$f = \rho_0 g dv \quad (3.35)$$

Cette force est la poussée d'Archimède aussi appelée force de flottabilité.

Avec g : gravité

ρ_0 : Masse volumique de référence

La résultante des forces s'exerçant verticalement sur la particule est donnée par :

$$G = (\rho - \rho_0) g dv$$

$\rho g dv$ c'est le poids.

Finalement, l'approximation de Boussinesq est une relation linéaire qui relie la variation de masse volumique par la variation de température :

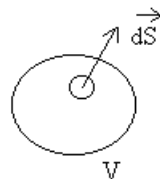
$$\rho_0 - \rho = \rho\beta(T - T_0) \quad (3.36)$$

Avec β : Coefficient de dilatation thermique.

Notre système d'équation qui gouverne l'écoulement d'un fluide bidimensionnel, newtonien, incompressible en écoulement laminaire comprend les équations de Navier-Stokes (équation de conservation de masse, équation de conservation de la quantité de mouvement et équation de conservation d'énergie) couplées avec les équations de transfert de chaleur (conduction, convection, rayonnement).

3.4.1.2. Conservation de masse

Soit une partie d'un fluide de masse volumique ρ délimitée par une surface fermée S_f de volume V . \vec{ds} est un vecteur de la surface S_f orienté vers l'extérieur à la surface fermée.



Cette partie du fluide a une masse m donnée par l'équation :

$$m = \iiint_V \rho \, dV \quad (3.37)$$

Avec

dV : un élément de volume.

Le débit massique sortant de la surface S_f est égal à :

$$\oint_{S_f} \rho \vec{U} \vec{ds} \quad (3.38)$$

Avec

\vec{U} : Le vecteur de vitesse d'une particule de fluide.

La conservation de la masse s'écrit :

$$\frac{dm}{dt} - \oint_{S_f} \rho \vec{U} \vec{ds} = \iiint_V \frac{\partial \rho}{\partial t} \, dV \quad (3.39)$$

$$\frac{dm}{dt} = \iiint_V \frac{\partial \rho}{\partial t} \, dV + \oint_{S_f} \rho \vec{U} \vec{ds} \quad (3.40)$$

La masse d'un système matériel étant conservative alors :

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad (3.41)$$

D'où :

$$\iiint_V \frac{\partial \rho}{\partial t} \, dV + \oint_{S_f} \rho \vec{U} \vec{ds} = 0 \quad (3.42)$$

En utilisant le théorème de la divergence de Green Ostrogradski. L'équation (3.42) devient :

$$\iiint_V \frac{\partial \rho}{\partial t} \, dV + \iiint_V \text{div}(\rho \vec{U}) \, dV = 0 \quad (3.43)$$

$$\iiint_V \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{U}) \right] \, dV = 0 \quad (3.44)$$

D'où :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{U}) = 0 \quad (3.45)$$

On peut interpréter cette équation comme ceci : le changement de masse dans un certain volume est égal au flux de masse entrant ou sortant de ce volume. Cette équation permet d'assurer qu'il n'y a pas création ni destruction de la masse dans le domaine étudié.

L'écoulement du fluide est incompressible ($\rho = \text{constante}$) donc :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (3.46)$$

L'équation (3.47) devient :

$$\text{div}(\rho \vec{U}) = 0 \quad (3.47)$$

D'où

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{U} = 0 \quad (3.48)$$

Finalement :

$$\frac{\partial U_x}{\partial X} + \frac{\partial U_y}{\partial Y} = 0 \quad (3.49)$$

Avec U_x et U_y sont les composantes de la vitesse U du fluide dans les directions X et Y .

3.4.1.3. L'équation de la quantité de mouvement :

La vitesse moyenne à partir d'une moyenne de la quantité de mouvement s'écrit sous la forme :

$$U(x, y, t) = \frac{\sum_i m_i U_i}{\sum_i m_i} \quad (3.50)$$

$$\frac{\sum_i m_i U_i}{\sum_i m_i} = \frac{dq_m}{\rho dV} \quad (3.51)$$

Alors la quantité de mouvement globale d'un volume V s'écrit :

$$\vec{q}_m = \iiint_V \vec{U} \, dm = \iiint_V \vec{U} \, \rho \, dV \quad (3.52)$$

En mécanique des fluides, l'équation du bilan de la quantité du mouvement découle du principe fondamental de la dynamique appliqué à un fluide :

$$\sum \vec{F} \text{ ext} = \frac{d\vec{q}_m}{dt} \quad (3.53)$$

En exprimant la dérivée particulaire du vecteur de quantité du mouvement :

$$\frac{d\vec{q}_m}{dt} = \iiint_V \rho \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} \, dV + \oint_S \vec{U} (\rho \vec{U} \, ds) \cdot \vec{N} \quad (3.54)$$

La somme des efforts extérieurs peut s'exprimer par :

$$\sum \vec{F} \text{ ext} = \iiint_V \vec{G} \, dV + \oint_S \vec{T} \, dS \quad (3.55)$$

Avec \vec{G} : Densité massique des forces de volume et T : contrainte surfacique.

En introduisant le tenseur de contrainte défini par :

$$\vec{T} = \bar{\sigma} \cdot \vec{n} \quad (3.56)$$

Avec

$\bar{\sigma}$: Tenseur des contraintes et \vec{n} : Vecteur normal

$$\Sigma \vec{F} \text{ ext} = \iiint_V \vec{G} \, dV + \oint_S \bar{\sigma} \cdot \vec{n} \, dS \quad (3.57)$$

Appliquons le théorème de Green-Ostrogradski au deuxième terme de l'équation (3.57) :

$$\oint_S \bar{\sigma} \cdot \vec{n} \, dS = \iiint_V \vec{\nabla} \cdot \bar{\sigma} \, dV \quad (3.58)$$

En combinant l'équation (3.56), (3.59) et (3.60), on obtient la forme explicite suivante :

$$\iiint_V \rho \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} \, dV + \oint_S \vec{U} (\rho \vec{U} \, ds) \cdot \vec{N} = \iiint_V \vec{G} \, dV + \iiint_V \vec{\nabla} \cdot \bar{\sigma} \, dV \quad (3.59)$$

Appliquons le théorème de Green-Ostrogradski au premier terme de l'équation (3.59) ci-dessus :

$$\iiint_V \rho \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} \, dV + \iiint_V \vec{U} \text{div}(\rho \vec{U}) \, dV = \iiint_V \vec{G} \, dV + \iiint_V \vec{\nabla} \cdot \bar{\sigma} \, dV \quad (3.60)$$

$$\iiint_V \rho \frac{d\vec{U}}{dt} \, dV = \iiint_V \vec{G} \, dV + \iiint_V \vec{\nabla} \cdot \bar{\sigma} \, dV \quad (3.61)$$

D'où :

$$\iiint_V \rho \frac{d\vec{U}}{dt} \, dV = \iiint_V [\vec{G} + \vec{\nabla} \cdot \bar{\sigma}] \, dV \quad (3.62)$$

Cette équation peut être interprétée comme la deuxième loi du mouvement de Newton. L'accélération d'une particule dépend du gradient de pression autour de cette particule, des contraintes qu'exercent les particules voisines sur celle-ci et de force volumétrique qui s'applique sur chaque particule telle la gravité. Cette équation assure que la quantité de mouvement dans le domaine est conservée.

Le tenseur des contraintes $\bar{\sigma}$ pour un fluide newtonien s'écrit sous la forme suivante :

$$\bar{\sigma} = -P\bar{I} + \bar{\tau} \quad (3.63)$$

Avec

P : est la pression statique.

$\bar{\tau}$: Tenseur des contraintes visqueuses pour un fluide newtonien.

La loi de comportement du fluide newtonien est :

$$\bar{\tau} = 2\mu \bar{D} + \lambda \text{tr}(\bar{D})\bar{I} \quad (3.64)$$

$$\bar{\tau} = 2\mu \bar{D} + \lambda \text{tr} \overline{\text{grad}}(\bar{U})\bar{I} \quad (3.65)$$

$$\bar{\tau} = 2\mu \bar{D} + \lambda \text{div}(\bar{U})\bar{I} \quad (3.66)$$

Avec μ et λ : sont les coefficients de viscosité (appelés aussi coefficients de lamé). μ : viscosité dynamique ; λ : viscosité associée aux changements du volume ; \bar{I} : Tenseur identité ; \bar{D} : Le tenseur des déformations.

Sous forme indicielle :

$$\tau_{ij} = 2\mu D_{ij} + \lambda \text{div}(U)\delta_{ij} \quad (3.67)$$

D'après l'équation de conservation de masse ci-dessus.

$$\text{div} U = 0 \quad (3.68)$$

Alors :

$$\lambda (\text{div} U)\delta_{ij} = 0 \quad (3.69)$$

D'où :

$$\tau_{ij} = 2\mu D_{ij} \quad (3.70)$$

Le tenseur de déformation D s'écrit sous la forme indicielle suivante :

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.71)$$

Et par conséquent le tenseur de contraintes devient :

$$\bar{\sigma} = -P\bar{I} + 2\mu \bar{D} \quad (3.72)$$

En substituant l'expression du tenseur de contraintes (3.72) dans l'équation (3.62) ci-dessus par son expression, on obtient :

$$\iiint_V \rho \frac{d\bar{U}}{dt} dV = \iiint_V [\vec{G} + \vec{\nabla} \cdot (-P\bar{I} + 2\mu \bar{D})] dV \quad (3.73)$$

$$\iiint_V \rho \frac{d\bar{U}}{dt} dV = \iiint_V [\vec{G} - \overrightarrow{\text{grad}} P + 2\mu \text{div} \bar{D}] dV \quad (3.74)$$

On remplace le tenseur D de déformation par son expression (3.71) on obtient :

$$\iiint_V \rho \frac{d\bar{U}}{dt} dV = \iiint_V [\vec{G} - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \text{div} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)] dV \quad (3.75)$$

D'où l'équation (3.77) devient :

$$\iiint_V \rho \frac{\partial \bar{U}}{\partial t} dV + \iiint_V \bar{U} \text{div}(\rho \bar{U}) dV = \iiint_V [\vec{G} - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \text{div} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)] dV \quad (3.76)$$

On obtient la forme explicite suivante :

$$\iiint_V [\rho \frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{U} \otimes \bar{U})] dV = \iiint_V [\vec{G} - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \text{div} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)] dV \quad (3.77)$$

Après intégration l'équation devient :

$$\rho \frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{U} \otimes \bar{U}) = [\vec{G} - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \text{div} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)] \quad (3.78)$$

La formulation indicielle de l'équation (3.80) est respectivement :

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i U_j}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + G_i + S \quad (3.79)$$

Projection suivant x :

$$\rho \left(\frac{\partial U_x}{\partial t} + U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} \right) + G_x + S_x \quad (3.80)$$

Projection suivant y :

$$\rho \left(\frac{\partial U_x}{\partial t} + U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} \right) + G_x + S_y \quad (3.81)$$

P : présente la pression.

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

La prise en compte du changement de phase est faite grâce à un modèle de porosité qui considère la zone en transition comme une zone poreuse dont la fraction liquide est comprise entre 0 et 1.

La fraction liquide intervient au niveau de la quantité du mouvement grâce au terme source S (équation (3.82)) qui permet d'annuler la quantité du mouvement lorsque le MCP est solide, c'est-à-dire quand la fraction liquide est égale à 0.

$$\vec{S} = A_{mush} \frac{(1-f)^2}{(f^3-\xi)} \vec{U} \quad (3.82)$$

Avec \vec{S} terme source qui s'exprime grâce à la fraction liquide f et à un nombre très petit ξ ($\xi = 0,001$) pour éviter la division par zéro.

La constante A_{mush} est appelée constante de zone pâteuse ou de mélange, elle détermine la rapidité avec laquelle la vitesse est réduite à zéro lorsque le MCP passe en phase solide. Cette constante est généralement située entre 10^5 et 10^7 .

(En utilisant l'équation (3.35) ci-dessus). Alors, la quantité du mouvement s'écrit comme suit :

Projection suivant x :

$$\rho \left(\frac{\partial U_x}{\partial t} + U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} \right) + (\rho - \rho_0) g + S_x \quad (3.83)$$

Projection suivant y :

$$\rho \left(\frac{\partial U_y}{\partial t} + U_x \frac{\partial U_y}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 U_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_y}{\partial y^2} \right) + (\rho - \rho_0) g + S_y \quad (3.84)$$

Pour modéliser la convection naturelle, il est nécessaire d'introduire une dépendance de la masse volumique (ρ) à la température T . L'approximation de Boussinesq ci-dessus (Eq 3.36) est utilisée, l'équation de la quantité de mouvement s'écrit comme présenté dans l'équation (3.85) ci-dessous :

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \vec{g} \beta (T - T_0) + \vec{S} \quad (3.85)$$

$-\beta(T - T_0)g$: Le terme de flottabilité

Projection suivant x :

$$\rho \left(\frac{\partial U_x}{\partial t} + U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} \right) - \rho \vec{g} \beta (T - T_0) + \frac{(1-f)^2}{(f^3-\xi)} A_{mush} U_x \quad (3.86)$$

Projection suivant y :

$$\rho \left(\frac{\partial U_y}{\partial t} + U_x \frac{\partial U_y}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 U_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_y}{\partial y^2} \right) - \rho \vec{g} \beta (T - T_0) + \frac{(1-f)^2}{(f^3 - \xi)} A_{mush} U_y \quad (3.87)$$

Afin de calculer l'efficacité de la conversion thermomécanique, nous avons besoin d'estimer la chaleur échangée entre le système et le milieu extérieur dans notre cycle thermodynamique. C'est-à-dire la quantité d'énergie que le milieu extérieur cède au système par trois processus d'échange thermique : conduction thermique, convection et rayonnement. L'échange de chaleur est un mode de transfert d'énergie microscopique désordonnée. C'est en quelque sorte un transfert d'agitation thermique (donc par nature désordonné) entre le système et le milieu extérieur, alors trois types de chaleur interviennent dans notre cycle :

- la chaleur par conduction
- la chaleur par rayonnement
- la chaleur par convection

En complément de la première partie du modèle nous utilisons l'équation (3.90), issue de l'application du principe de conservation d'énergie.

3.4.1.4. Equation de la conservation d'énergie :

Le premier principe de la thermodynamique stipule que pour un système fermé :

$$\Delta E = W + Q \quad (3.88)$$

Avec :

E : énergie totale spécifique du système.

W : travail des forces extérieures.

Q : la quantité de chaleur échangée avec le milieu extérieur au système (la quantité d'énergie que le milieu extérieur cède au système)

Ecrivons le 1^{er} principe de la thermodynamique pendant un intervalle de temps dt.

Nous obtenons :

$$\frac{d}{dt} E = \dot{W} + \dot{Q} \quad (3.89)$$

Avec \dot{W} : La puissance des forces extérieures et \dot{Q} : La puissance thermique échangée.

L'énergie contenue dans un volume matériel V est :

$$\iiint_V \rho \left(e + \frac{1}{2} U^2 \right) dV \quad (3.90)$$

Avec :

$\left(e + \frac{1}{2} U^2 \right)$: est la densité d'énergie dans le volume V.

e : énergie interne massique.

Selon le premier principe de la thermodynamique :

$$\frac{d}{dt} \iiint_V \rho \left(e + \frac{1}{2} U^2 \right) dV = \frac{dW}{dt} + \frac{dQ}{dt} \quad (3.91)$$

La quantité de chaleur fournie au système est :

$$\frac{dQ}{dt} = \iiint_V r \, dV - \oint_S \vec{\Phi} \cdot \vec{n} \, dS \quad (3.92)$$

Avec

$\vec{\Phi}$: Flux de chaleur traversant la surface S par conduction

r : la quantité d'énergie que le milieu extérieur cède au fluide par rayonnement.

En utilisant la loi de Fourier :

$$\vec{\Phi} = -k \overline{\text{grad} T} \quad (3.93)$$

Avec T : température du milieu fluide et k : conductivité thermique.

La puissance des forces extérieures est :

$$\frac{dW}{dt} = \iiint_V \vec{G} \cdot \vec{U} \, dV + \oint_S \vec{T} \cdot \vec{U} \, dS \quad (3.94)$$

$\iiint_V \vec{G} \cdot \vec{U} \, dV$: Puissances des forces volumiques.

$\oint_S \vec{T} \cdot \vec{U} \, dS$: Puissances des forces de surface.

\vec{T} : Vecteur contrainte, il peut s'exprimer par la convention d'Einstein :

$$\vec{T} = \overline{\sigma} \cdot \vec{n} \quad (3.95)$$

Alors le bilan d'énergie s'écrit en associant les équations (3.91), (3.92) et (3.94) :

$$\frac{d}{dt} \iiint_V \rho \left(e + \frac{1}{2} U^2 \right) dV = \iiint_V \vec{G} \cdot \vec{U} dV + \oint_S \vec{T} \cdot \vec{U} dS + \iiint_V r dV - \oint_S \vec{\Phi} \cdot \vec{n} dS \quad (3.96)$$

$$\frac{d}{dt} \iiint_V \rho \left(e + \frac{1}{2} U^2 \right) dV = \iiint_V \vec{G} \cdot \vec{U} dV + \oint_S \vec{\sigma} \cdot \vec{n} \cdot \vec{U} dS + \iiint_V r dV - \oint_S \vec{\Phi} \cdot \vec{n} dS \quad (3.97)$$

En Appliquant le théorème de Green-Ostrogradski, on obtient :

$$\frac{d}{dt} \iiint_V \rho \left(e + \frac{1}{2} U^2 \right) dV = \iiint_V \vec{G} \cdot \vec{U} dV + \iiint_V \vec{\nabla} \cdot \vec{\sigma} \cdot \vec{U} dV + \iiint_V r dV - \iiint_V \vec{\nabla} \cdot \vec{\Phi} dV \quad (3.98)$$

$$\frac{d}{dt} \iiint_V \rho \left(e + \frac{1}{2} U^2 \right) dV = \iiint_V \vec{U} \cdot (\vec{G} + \vec{\nabla} \cdot \vec{\sigma}) dV + \iiint_V r dV - \iiint_V \vec{\nabla} \cdot \vec{\Phi} dV \quad (3.99)$$

On remplace ce terme $\iiint_V (\vec{G} + \vec{\nabla} \cdot \vec{\sigma}) dV$ par $\iiint_V \rho \frac{d\vec{U}}{dt} dV$ de l'équation (3.64) de quantité du mouvement ci-dessus, alors l'équation (3.100) devient :

$$\frac{d}{dt} \iiint_V \rho \left(e + \frac{1}{2} U^2 \right) dV = \iiint_V \rho \vec{U} \frac{d\vec{U}}{dt} dV + \iiint_V r dV - \iiint_V \vec{\nabla} \cdot \vec{\Phi} dV \quad (3.100)$$

$$\iiint_V \rho \left(\frac{d}{dt} e + \frac{1}{2} \frac{d}{dt} U^2 \right) dV = \iiint_V \rho \vec{U} \frac{d\vec{U}}{dt} dV + \iiint_V r dV - \iiint_V \vec{\nabla} \cdot \vec{\Phi} dV \quad (3.101)$$

$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} U^2 = U \frac{d}{dt} U$, on simplifie l'équation (3.101) :

$$\iiint_V \rho \frac{d}{dt} e dV = \iiint_V r dV - \iiint_V \vec{\nabla} \cdot \vec{\Phi} dV \quad (3.102)$$

On remplace $\vec{\Phi}$ par : $-k \overline{\text{grad}T}$

$$\text{D'où :} \quad \iiint_V \rho \frac{d}{dt} e dV = \iiint_V r dV + \iiint_V \vec{\nabla} \cdot (k \overline{\text{grad}T}) dV \quad (3.103)$$

$$\iiint_V \rho \frac{d}{dt} e dV = \iiint_V [r dV + \vec{\nabla} \cdot (k \overline{\text{grad}T})] dV \quad (3.104)$$

$$\rho \frac{d}{dt} e = r + \vec{\nabla} \cdot (k \overline{\text{grad}T}) \quad (3.105)$$

$$\text{D'où :} \quad \rho \frac{d}{dt} e = r + k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3.106)$$

Afin de se ramener à deux variables indépendantes, on introduit une nouvelle fonction d'état l'enthalpie H.

Sachant que : $H = e + \frac{P}{\rho}$ fonction enthalpie de l'unité de masse.

En exprimant la dérivée particulière de l'enthalpie H :

$$\frac{dH}{dt} = \frac{de}{dt} + \frac{d}{dt} \left(\frac{P}{\rho} \right) \quad (3.107)$$

$$\frac{dH}{dt} = \frac{de}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dt} + P \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{\rho} \right) \quad (3.108)$$

$$\frac{dH}{dt} = \frac{de}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dt} - \frac{P}{\rho^2} \frac{d\rho}{dt} \quad (3.109)$$

D'après l'équation de conservation d'énergie on a :

$$\frac{d\rho}{dt} = 0 \quad (3.110)$$

Pour un écoulement du fluide laminaire on a :

$$\frac{dP}{dt} = 0 \quad (3.111)$$

Après simplification, on obtient :

$$\frac{dH}{dt} = \frac{de}{dt} \quad (3.112)$$

$$\rho \frac{dH}{dt} = \rho \frac{de}{dt} \quad (3.113)$$

$$\rho \frac{dH}{dt} = r + k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3.114)$$

Appliquons le théorème de transport (également connu sous le théorème de transport Leibniz Reynolds), il est utilisé pour réduire les dérivés de quantités intégrées à la dérivée $\frac{dH}{dt}$:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + \vec{U} \text{div} H \quad (3.115)$$

D'où :

$$\rho \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \vec{U} \text{div} H \right) = r + k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3.116)$$

Finalement après simplifications, le bilan de conservation de l'énergie s'écrit comme :

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + U_x \frac{\partial(\rho H)}{\partial x} + U_y \frac{\partial(\rho H)}{\partial y} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + r \quad (3.117)$$

Cette écriture avec une formulation enthalpique est la plus adoptée à la résolution numérique des problèmes avec changement de phase.

Les systèmes subissant un changement de phase ont une enthalpie totale égale à la somme de l'énergie sensible h_s et l'énergie latente h_L comme présenté dans l'équation ci-dessous :

$$H = h_s + h_L = \int c_p dT + fL \quad (3.118)$$

La chaleur sensible h_s correspond à l'énergie stockée sous forme d'élévation de la température du matériau solide ou liquide et peut être exprimée grâce à l'équation (3.119) ci-dessous :

$$h_s = \int c_p dT \quad (3.119)$$

Avec

c_p : La chaleur spécifique.

La chaleur latente h_L représente l'énergie accumulée par le matériau durant son changement de phase et peut s'exprimer selon l'équation (3.120) ci-dessous :

$$h_L = fL \quad (3.120)$$

L : Chaleur latente absorbée localement

f : La fraction liquide définit par :

$$f = \begin{cases} 0 & (T < T_{sol}) \\ \frac{T - T_{sol}}{T_{liq} - T_{sol}} & (T_{sol} \leq T \leq T_{liq}) \\ 1 & (T > T_{liq}) \end{cases} \quad (3.121)$$

Après réarrangement on obtient :

$$\frac{\partial[(\rho \int c_p dT) + fL]}{\partial t} + U_x \frac{\partial[(\rho \int c_p dT) + fL]}{\partial x} + U_y \frac{\partial[(\rho \int c_p dT) + fL]}{\partial y} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + r \quad (3.122)$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + U_x \frac{\partial T}{\partial x} + U_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \rho L \left(\frac{\partial f}{\partial t} + U_x \frac{\partial f}{\partial x} + U_y \frac{\partial f}{\partial y} \right) + r \quad (3.123)$$

Les matériaux utilisés à titre de référence dans ce travail sont les paraffines. Ses propriétés physiques et le diamètre typique du tube sont donnés dans le chapitre suivant.

La suite du chapitre sera consacrée à l'étude du couplage de la convection naturelle dans des milieux confinés avec le rayonnement (Couplage thermo-fluidique). Ce type d'écoulement dépend principalement des propriétés thermo-physiques des fluides et des caractéristiques géométriques de la configuration.

3.4.2. Couplage thermo-mécanique

Le phénomène du changement de phase solide-liquide est un processus complexe qui combine des phénomènes thermiques et fluidiques. Ce phénomène peut être modélisé correctement par un couplage entre les équations de Navier-Stokes et les sources de transfert de chaleur (conduction-convection-rayonnement) qui influent sur la plaque rectangulaire MCP.

Le rayonnement est un mode de transfert particulièrement important dans de nombreuses situations industrielles à hautes températures. Le rayonnement thermique est de nature électromagnétique en raison de l'agitation de la matière sous l'effet de la température.

On suppose que la variation de volume du MCP au cours du changement de phase était négligeable $\Delta V = \text{cst}$. De plus le MCP est isotrope et homogène. Et les propriétés thermophysiques sont supposées constantes.

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + U_x \frac{\partial T}{\partial x} + U_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \rho L \left(\frac{\partial f}{\partial t} + U_x \frac{\partial f}{\partial x} + U_y \frac{\partial f}{\partial y} \right) + r \quad (3.124)$$

On définit r (quantité d'énergie reçue par rayonnement) : $r = \varphi_{\text{ray}}$.

Avec φ_{ray} : le flux du rayonnement.

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + U_x \frac{\partial T}{\partial x} + U_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \rho L \left(\frac{\partial f}{\partial t} + U_x \frac{\partial f}{\partial x} + U_y \frac{\partial f}{\partial y} \right) + \varphi_{\text{ray}} \quad (3.125)$$

$$\varphi_{\text{ray}} = \sigma \varepsilon_p S (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (3.126)$$

En remplaçant le flux du rayonnement par son expression :

On obtient :

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + U_x \frac{\partial T}{\partial x} + U_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \rho L \left(\frac{\partial f}{\partial t} + U_x \frac{\partial f}{\partial x} + U_y \frac{\partial f}{\partial y} \right) + \sigma \varepsilon_p S (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (3.127)$$

Le modèle couplé thermomécanique permet de décrire la transformation de phase solide-liquide en se basant sur les différents modes de transfert de chaleur.

3.5. L'EFFET DE DIFFERENTS MODES DE TRANSFERTS DE CHALEUR SUR LA GEOMETRIE CHOISIE POUR UN MCP

L'étude des modes du transfert de la chaleur permet d'optimiser les systèmes du stockage de l'énergie thermique, cependant il y a d'autres facteurs qui influent sur le MCP tel que la géométrie. Cette dernière est l'une des techniques pour rencontrer le problème de faible conductivité thermique car elle maximisera la zone du transfert de la chaleur pour le volume donné du MCP.

En effet, plusieurs travaux ont traité la géométrie des conteneurs qui affecte fondamentalement la conception de l'application du stockage. Par conséquent, le MCP a été utilisé dans différentes géométries, les plus utilisées étant la rectangulaire, la sphérique et la cylindrique. En revanche, il existe quelques études sur d'autres géométries (triangulaire, hexagonale ou trapézoïdale).

Barba et al [73] ont étudié le comportement de fusion du MCP des trois types géométriques, planaire, cylindrique et sphérique destinés aux applications du stockage domestique.

Duan et al [74] ont analysé les comportements des MCP encapsulés sous différentes formes par exemple en nid d'abeille circulaire, quadrilatère, hexagonal et triangulaire.

Sommer et al [75] ont conçu un conteneur solaire hexagonal pour le stockage d'énergie thermique à chaleur latente (LHTES).

Pour compléter ce travail, il est nécessaire d'adapter le modèle thermo-fluidique proposé précédemment avec différentes structures. Alors une étude géométrique a été établie à partir d'une ingénierie triangulaire afin de bien contrôler le changement de phase solide-liquide dans une structure MCP et de trouver la géométrie optimale du MCP pour réduire le temps de fusion.

3.5.1. Le modèle physique pour une structures triangulaire

L'enjeu actuel se situe donc dans l'évaluation du gain par chaleur latente des MCP. Il s'agit d'évaluer leur viabilité via leurs performances pour parvenir à des systèmes efficaces du stockage de l'énergie thermique. Ce qui permet de formuler des recommandations sur la conception de ce dispositif expérimental et sur la procédure de caractérisation dynamique à suivre qui est un objectif de ce travail.

L'étude des performances d'un MCP solide-liquide au sein d'un banc expérimental passe par une étape d'encapsulation qui est primordiale. Dans les systèmes par encapsulation, le MCP est introduit dans un récipient de petite taille autour duquel circule le fluide caloporteur permettant le

transfert de l'énergie thermique, l'ensemble est contenu dans une cuve. Cette technique peut être utilisée en macro et micro-encapsulation.

La macro-encapsulation consiste à insérer une quantité significative de MCP à l'intérieur de capsules sphériques, tubulaires ou encore rectangulaires. La micro et macro-encapsulation des MCP se sont également avérées pour améliorer le taux du transfert de la chaleur.

Dans cette partie, une technique innovante pour encapsuler les MCP a été développée. L'étude dite géométrique combine une forme triangulaire qui sera le cœur de diverses géométries intégrées dans la modélisation thermomécanique proposée.

Le modèle ainsi développé va décrire les différents modes du transfert de la chaleur des différentes géométries afin de trouver la forme optimale qui améliore le comportement du stockage de l'énergie thermique dans le MCP.

3.5.2. Effets de la géométrie de la cavité sur le transfert de la chaleur et conditions aux limites

Dans ce chapitre, le modèle proposé précédemment a été visé pour une géométrie rectangulaire qui permet de décrire la transformation de phase solide-liquide en se basant sur les différents modes du transfert de la chaleur. Afin de généraliser la modélisation pour d'autres géométries, une étude numérique a été proposée pour valider le modèle couplé aux différentes géométries MCP.

Dans cette partie, l'étude numérique a été basée sur la géométrie triangulaire qui peut former d'autres géométries (rectangle et parallélogramme). (Figure 3.5).

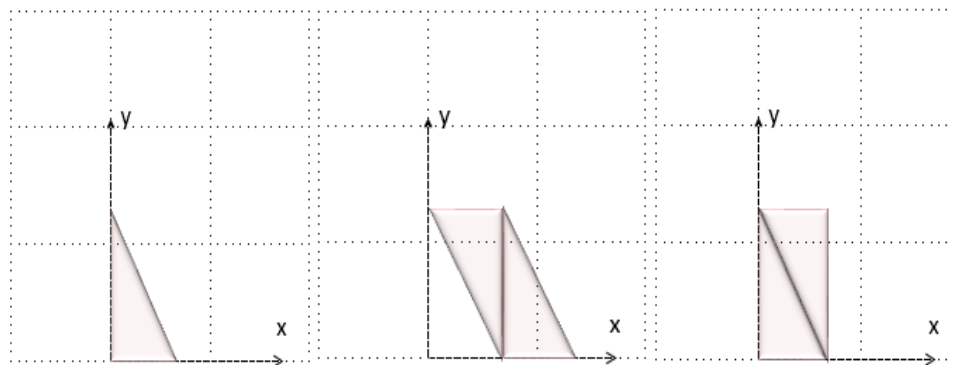


Figure 3. 5 : Schémas des formes triangulaires, rectangulaires et parallélogrammes

Il est supposé que la variation du volume de la matière lors du changement de phase est négligeable. De plus, le MCP est isotrope et homogène. Les propriétés thermophysiques sont supposées constantes. De cette façon, il est considéré comme le système décrit dans la figure 3.6 :

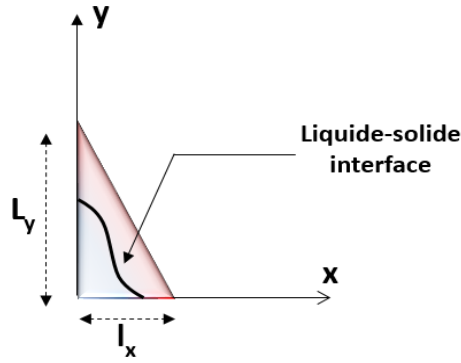


Figure 3. 6 : Conception du modèle proposé par MCP

En régime stationnaire, il a été proposé que le côté supérieur (hypoténuse) reçoive une température chaude et le côté inférieur reçoive une température froide, l'autre côté est supposé adiabatique.

Dans cette étude, on a considéré la géométrie d'un triangle rectangle, ce type de géométrie peut généraliser l'étude géométrique proposée en changeant l'angle d'inclinaison avec la source chaude. La variation de l'angle d'inclinaison de la géométrie permet aussi de changer la durée du changement de phase et le transfert de la chaleur.

L'importance de l'angle de l'inclinaison (θ) réside dans l'équation de la quantité du mouvement comme il est présenté dans l'équation suivante :

Projection on x :

$$\rho \left(\frac{\partial U_x}{\partial t} + U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} \right) - \rho g \beta (T - T_0) \sin \theta + \frac{(1-f)^2}{(f^3 - \xi)} A_{mush} U_x \quad (3. 128)$$

Projection on y :

$$\rho \left(\frac{\partial U_y}{\partial t} + U_x \frac{\partial U_y}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 U_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_y}{\partial y^2} \right) - \rho g \beta (T - T_0) \cos \theta + \frac{(1-f)^2}{(f^3 - \xi)} A_{mush} U_y \quad (3. 129)$$

Avec P: la pression, ρ : la densité, θ angle d'inclinaison , β : Coefficient d'expansion , μ : viscosité dynamique , g accélération de gravité, f : fraction liquide, A_{mush} constante de la zone pâteuse , ξ : nombre réel de valeur (10^{-4}) pour éviter la division par zéro, T: température.

Ainsi, le modèle couplé thermique et fluide permet de décrire la transformation de phase liquide-solide en se basant sur les différents modes du transfert de la chaleur. On obtient :

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + U_x \frac{\partial T}{\partial x} + U_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \rho L \left(\frac{\partial f}{\partial t} + U_x \frac{\partial f}{\partial x} + U_y \frac{\partial f}{\partial y} \right) + \sigma \varepsilon_p S (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (3. 130)$$

Les équations de conservation de l'énergie obtenues sont intégrées pour résoudre le problème du transfert thermique sur la totalité du domaine physique.

Pour réaliser la simulation, nous allons utiliser ANSYS FLUENT, c'est un code du calcul dans la CFD (Computational Fluid Dynamics) qui modélise par la méthode des volumes finis des écoulements très variés dans des configurations plus ou moins complexes. Ce solveur offre toutes les capacités physiques nécessaires pour la modélisation des écoulements fluides et des transferts de la chaleur. FLUENT est employé pour résoudre les problèmes de flux de fluide dans les phénomènes de solidification ou de fusion à une température constante (métaux purs) ou dans un intervalle de températures (alliages binaires). La mise en place du calcul sera traitée dans le chapitre suivant.

3.6. CONCLUSION

Ce chapitre a mis l'accent sur un modèle thermomécanique qui permet de décrire le comportement des MCP pendant le processus du changement de phase via les équations de Navier Stokes. Celles-ci sont couplées avec les différents modes de transfert de chaleur. En outre, la modélisation permet d'analyser l'impact des principales variables de conception d'une unité de stockage thermique à chaleur latente sur l'extension de la zone solide et liquide pour une cavité rectangulaire. En effet, la compréhension du phénomène physique permet de mieux concevoir les unités du stockage thermique pour augmenter l'efficacité énergétique et ainsi diminuer le temps de retour sur l'investissement des systèmes dans lesquels elles sont intégrées. Pour accomplir cet objectif, la première étape, on a développé un modèle mathématique adéquat pouvant décrire le déplacement d'un fluide, le transfert de chaleur, la convection naturelle et le changement de phase. Plus précisément, on a mis en relief les équations théoriques de base couvrant cette physique, soit les équations de Navier-Stokes auquel on adjoint les conditions aux limites ainsi que les simplifications et les hypothèses concernant les propriétés thermophysiques du MCP. Pour être capable de résoudre le système des équations, plusieurs approximations ont dû être concrétisées. Pour simuler le changement de phase, les concepts de fraction liquide de température solidus et de température liquidus ont été introduits et l'énergie totale est devenue la somme de l'énergie sensible et de l'énergie latente. Un terme source a été ajouté à l'équation de la conservation d'énergie afin d'introduire les différents modes du transfert thermique dans le matériau. Cependant, l'effet de ces modes dépend essentiellement de la structure géométrique choisie. D'une part, on a développé le modèle couplé pour une géométrie rectangulaire simple. D'autre part, le modèle est généralisé pour les différentes géométries afin de choisir la géométrie optimale pour les différentes applications de MCP.

Chapitre

CHAPITRE 4 : ETUDE NUMERIQUE ET VALIDATION DU MODELE PROPOSE

Dans le chapitre précédent, une modélisation thermo-fluidique a été effectuée, qui permet d'optimiser le stockage d'énergie thermique en tenant compte des différents modes du transfert de la chaleur. Ensuite, le modèle proposé permet de décrire les effets supplémentaires comme la géométrie et son impact sur le transfert de la chaleur.

Dans ce chapitre, une étude numérique basée sur la simulation numérique permet de vérifier le modèle proposé. Ce dernier montre l'importance des modes du transfert de la chaleur dans l'amélioration du processus de changement de phase. Les résultats numériques qui ont été obtenus par la simulation montrent une bonne concordance avec la littérature. Afin de décrire l'évolution de la fusion dans les MCP. L'étude permet de compléter les résultats précédents et décrire l'importance de tous les modes du transfert de la chaleur en particulier le rayonnement dans le processus de changement de phase.

4.1. INTRODUCTION

Afin de valider la modélisation développée dans cette thèse, une étude numérique a été proposée qui permet d'établir une résolution numérique et une discrétisation spatio-temporelle des équations de base. En effet, le modèle thermo-fluidique décrit précédemment, nous a permis de décrire le changement de phase solide-liquide en prenant compte des différents modes de transfert de chaleur.

En première partie, l'étude est consacrée à la simulation des résultats en présence d'une source interne (rayonnement) et son influence sur l'équation de conservation d'énergie afin de comparer ces résultats obtenus avec la réalité.

Les résultats de simulation ont été comparés avec la littérature, ce qui permet de valider la modélisation développée. Au cours de cette vérification, on a étudié l'évolution de l'enthalpie, la température, la fraction liquide, le flux de chaleur et l'énergie stockée.

Ces résultats permettent de valider le modèle développé afin de décrire le comportement de MCP. Les équations du modèle sont implémentées dans la plateforme Matlab qui permet de simuler le système proposé.

Dans une seconde partie, pour que les résultats soient plus précis, des simulations par les logiciels ANSYS FLUENT et COMSOL Multiphysics ont été réalisées avec des maillages bien structurés et adaptés aux géométries proposées. Ensuite, le modèle est étudié afin d'observer l'effet du rayonnement sur le MCP pour diverses géométries (rectangle, triangle) en prenant compte des différents modes de transfert de chaleur.

4.2. PARAMETRES DE MCP

Le choix d'un matériau à changement de phase se fait sur trois critères principaux, sans oublier ceux décrits en deuxième chapitre, qui sont la température, la chaleur latente du changement de phase et une bonne qualité du transfert de chaleur. La température du changement d'état est très importante car elle doit convenir au type d'intégration et à la réalisation que l'on souhaite effectuer. Ainsi, il est recommandé de choisir le MCP qui aura une température évoluant au fil des jours de part et d'autre du point de changement d'état pour obtenir la performance optimale du matériau. En effet, il se peut que la totalité de la chaleur latente du changement d'état ne soit pas exploitée totalement ou que le changement de phase ne survienne pas. La qualité du transfert thermique par exemple, une conductivité thermique élevée faciliterait la charge et la décharge du stockage de l'énergie.

Dans le cadre du stockage par chaleur latente pour un système associé au bâtiment, on a choisi dans cette étude les matériaux à changement de phase organiques notamment les paraffines de formule moléculaire (C_nH_{2n+2}).

La paraffine est l'un des matériaux à changement de phase organique le plus utilisé en raison de ses nombreux avantages. Elle est un mélange d'hydrocarbures solides saturés de formule moléculaire C_nH_{2n+2} , les paraffines peuvent être classés en fonction du nombre d'atomes de carbone ainsi que de leurs états physiques. Selon cette classification, à température ambiante 1 à 4 nombres de carbones se réfèrent aux alcanes purs en phase gazeuse, 5 à 17 carbones sont des paraffines liquides et plus de 17 sont appelés cires solides. Ces solides cireux désignent un mélange d'hydrocarbures saturés tels que les cycloalcanes linéaires, iso, fortement ramifiés et cycloalcanes [29]. Généralement, les paraffines commerciales contiennent un mélange d'isomères et par conséquent, elles ont une gamme de températures de fusion. Les paraffines ont généralement une capacité thermique latente élevée. Si la longueur de la chaîne augmente, les plages de fusion des cires augmentent également, tandis que la capacité de fusion de la chaleur latente n'est soumise à aucun ordre particulier. En général, les cires de paraffine sont fiables, peu coûteuses et non irritantes. En ce qui concerne les problèmes économiques, la plupart des cires de qualité technique peuvent être utilisées comme MCP dans les systèmes de stockage de chaleur latente. Du point de vue chimique, les cires de paraffine sont inactives et stables. Elles présentent des changements de volume plus faibles pendant la fusion mais ont une faible pression de vapeur.

Les avantages sont la grande stabilité chimique des paraffines, elles n'ont pas tendance à la ségrégation des phases donc permettent de grands nombres de cycles fusion/solidification

consécutifs. La chaleur latente de fusion/solidification est grande. Il n'y a quasiment pas de surfusion avec les paraffines et les agents de nucléation ne sont pas nécessaires. De plus, les paraffines ne sont pas toxiques et 100% recyclables. Les inconvénients sont l'origine pétrolière des paraffines commerciales, ainsi que le fait que la conductivité thermique à l'état solide soit assez faible. Le volume occupé par la paraffine peut varier significativement avec le changement d'état. Contrairement aux sels hydratés, la zone de température de changement de phase est assez étalée sur plusieurs degrés, le pic est plus large et moins élevé. Enfin, les paraffines sont inflammables, donc elles doivent être conditionnées en conséquence pour l'usage en bâtiment.

Le choix du MCP dépend aussi et forcément de la fonction qui va la remplir et dépend de l'application proposée. Dans ces dernières années, différentes applications solaires qui ont utilisé une marge de température moyenne entre 15°C et 80°C ont été proposées.

En effet, le stockage de l'énergie thermique dans les bâtiments (parois par exemple) nécessite une température de fusion proche du confort climatique, cependant le stockage et la production de l'énergie thermique d'une source solaire nécessitent une chaleur latente plus élevée.

Il est clair que le premier critère de choix d'un MCP concerne la température de transformation puisqu'elle doit être conforme aux procédés. Notre choix est réparti en quatre types de MCP :

- **MCP (RT64)** : Le matériau à changement de phase utilisé pour le stockage et la production thermique est la paraffine (RT64) due à ses propriétés thermo-physiques qui sont plus adaptées au stockage d'énergie thermique.
- **MCP (RT35)** : De même la paraffine RT35 est utilisée pour garder la température stable dans les panneaux photovoltaïques afin d'améliorer la production d'énergie électrique.
- **MCP (RT27)** : D'un côté, le matériau utilisé pour maintenir la température des bâtiments proche du confort thermique est la paraffine RT27 due à sa température de fusion qui est proche de la température ambiante.
- **MCP (RT4)** : D'un autre côté, la paraffine RT4 est utilisée pour refroidir et conserver les produits alimentaires et pharmaceutiques.

Ainsi, notre simulation portera sur les 4 types de paraffines RT4, RT27, RT35 et RT64. Ces matériaux se caractérisent par une température de fusion qui se varie entre une plage de 3 °C et 64°C. Les propriétés thermo-physiques pour les quatre MCP ont été indiquées dans le tableau 4.1 ci-dessous, elles sont collectées dans la littérature et le fabricant :

Propriétés	Paraffine (RT64HC)	Paraffine (RT35)	Paraffine (RT4)	Paraffine (RT27)	Aluminium	Air
Densité solide	880 à 293 K	860	770 à -15 C	880 à 288 K	2719	1.22
Densité liquide (kg/m ³)	780 à 353 K	770	880 à 15	760 à 313 K		
Chaleur Spécifique (J/kg.K)	1900 (solide) 2000 (liquide)	1800 2400	2000	2000	871	1006.43
Conductivité thermique (W/m.K)	0.2 (solide) 0.2 (liquide)	0.2	0.2	0.2	202.4	0.0234
Chaleur latente (KJ/Kg)	230	160	175	189	-	-
température de solidification(K)	336-338	302-309	275-277	297.5	-	-
Température de fusion(K)	337-334	309-304	277-275	299.5	-	-

Tableau 4. 1 : les propriétés thermo-physiques des paraffines, aluminium et l'air

La problématique va consister à analyser la performance de l'intégration des MCP comme solution aux confort et à l'économie énergétique. Les conclusions de nombreuses études sur ce procédé indiquent que le matériau à l'état solide doit rester confiné (en place).

Une étape du projet va consister à mettre souvent au moins un additif qui se trouve intégré au MCP dans l'encapsulation pour améliorer une de ses caractéristiques ou palier un défaut majeur.

L'encapsulation est une méthode utilisée pour protéger et empêcher les fuites de MCP à l'état liquide. Les capsules se composent de deux parties, la coque et le noyau. La partie noyau contient des MCP, tandis que la partie coque est généralement composée de matériaux polymères aux propriétés mécaniques et thermiques améliorées. La partie coque joue le rôle de protection de transfert de chaleur et empêche parfois le rejet des matières toxiques dans l'environnement. Dans ces cas, la coque doit avoir une conductivité thermique appropriée. Les coques polymères sont couramment utilisées dans l'encapsulation des MCP paraffines. Le choix de la pièce centrale dépend de son domaine d'application.

Afin d'assurer le bon fonctionnement des matériaux à changement de phase dans les systèmes thermiques et avoir un potentiel important pour le stockage d'énergie, l'utilisation de l'encapsulation est indispensable pour garder leurs propriétés thermo-physiques. Par conséquent, l'intégration des matériaux composites est inévitable à cause de leurs excellentes propriétés et de leurs multiples applications. À cet effet, les différents échantillons qui ont été choisis avec les

paraffines (RT27, RT64...) ont été protégés par des composantes (résines époxy, perlite) et des particules d'aluminium.

Le composite choisi est une résine époxy, qui a récemment suscité des intérêts croissants pour la recherche en raison de ses bonnes propriétés mécaniques, de sa stabilité thermique, de sa résistance aux solvants et de sa facilité de préparation [21]. En revanche, La perlite expansée (PE) est un adhésif résistant à l'eau en résine utilisé comme matériau de revêtement. En outre, la poudre d'aluminium (Al) et le plâtre présentent une excellente conductivité thermique et un excellent comportement face à tout type d'agents externes, ce qui permet de protéger le MCP contre la corrosion.

La composition chimique de la perlite expansée est indiquée dans le tableau 4.2.

composition de la perlite expansée	Al ₂ O ₃	NaO ₃	FeO ₃	SiO ₂	K ₂ O	autre
% massique	13.3	3.87	0.98	75.92	4.23	1.7

Tableau 4.2 : composition chimique de l'adhésif utilise en résine

La morphologie souhaitée avant et après l'intégration de la paraffine nous permet de voir et de déterminer avec précision les flux de chaleur échangés, les conductivités thermiques effectives des composites, les quantités de chaleur stockées et déstockées et aussi de comparer la quantité de chaleur totale stockée et la capacité calorifique entre deux états thermiques stables.

4.3. VALIDATION DU MODELE NUMERIQUE

4.3.1. Interprétation du système proposé :

Pour visualiser le processus de fusion des différents MCP, un système de stockage d'énergie thermique (TES) basé sur des prototypes expérimentaux a été proposée. Ce système est identique pour tous les MCP étudiés, il peut être utilisé dans de nombreuses applications différentes à des fins de chauffage/refroidissement y compris le chauffage, la ventilation, les systèmes de climatisation, les centrales solaires pour stocker l'énergie thermique pendant la journée et la libérer pendant la nuit et les bâtiments résidentiels à des fins de récupération de la chaleur perdue. En fonction de l'application d'un système de stockage thermique proposé et de l'espace disponible pour l'installation de ce système, différents types de géométries telles que rectangulaire, cylindrique et sphérique peuvent être utilisés.

Par conséquent, dans la présente enquête l'objectif est d'étudier le processus détaillé de fusion (chargement) d'un système TES. En outre, le montage dans la figure 4.1 présente le système de stockage d'énergie thermique sous forme rectangulaire et en même temps l'étude est valable pour

la forme cylindrique. En effet, les systèmes TES rectangulaires offrent les avantages de la facilité de fabrication et peuvent être installés à la fois verticalement et horizontalement.

En revanche, le montage proposé basé sur des prototypes qui sont utilisables pour tous les MCP étudiés, cependant on abordera l'étude pour le cas de RT35 afin de vérifier partiellement et au fur et à mesure les objectifs de l'investigation.

4.3.2. Conditions aux limites :

Le processus de changement de phase sera pris en compte à travers les conditions aux limites de l'interface qui se déplace au cours du temps et par conséquent contrôler la modification des domaines occupés par les deux phases. Ces méthodes requièrent parfois l'utilisation de schémas numériques avec maillage mobile afin de connaître la position exacte de l'interface à chaque pas de temps.

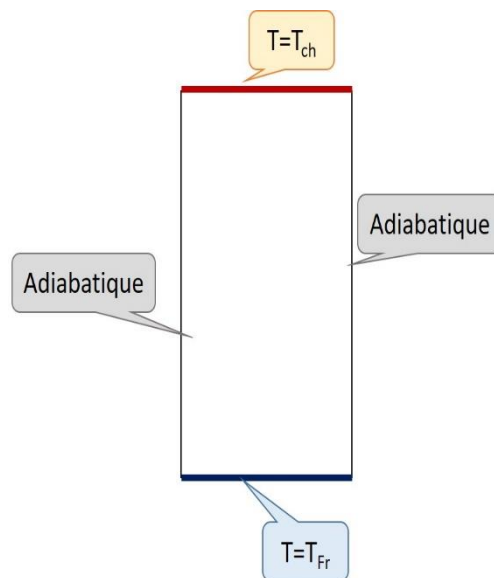


Figure 4. 1 : schéma de principe et les dimensions du système MCP

4.4. RESULTATS NUMERIQUES

4.4.1. Résultats des mesures physiques

Afin de valider le modèle mathématique que nous avons développé, les simulations numériques ont été effectuées en utilisant les propriétés thermophysiques précitées et les conditions aux limites en vue d'étudier le comportement thermique des différents matériaux. En premier lieu on essaie de déterminer les propriétés globales de MCP lors du changement de phase.

Afin de simuler cet effet, la figure 4.2 ci-dessous permet de décrire l'évolution de l'enthalpie en fonction de la température. Elle montre l'énergie stockée par les quatre matériaux RT64, RT35,

RT27 et RT4 et leur température de fusion qui est respectivement 64°C, 35°C, 27°C et 4°C. Ensuite, les résultats de la simulation sont comparés aux résultats de la littérature qui sont en bon accord.

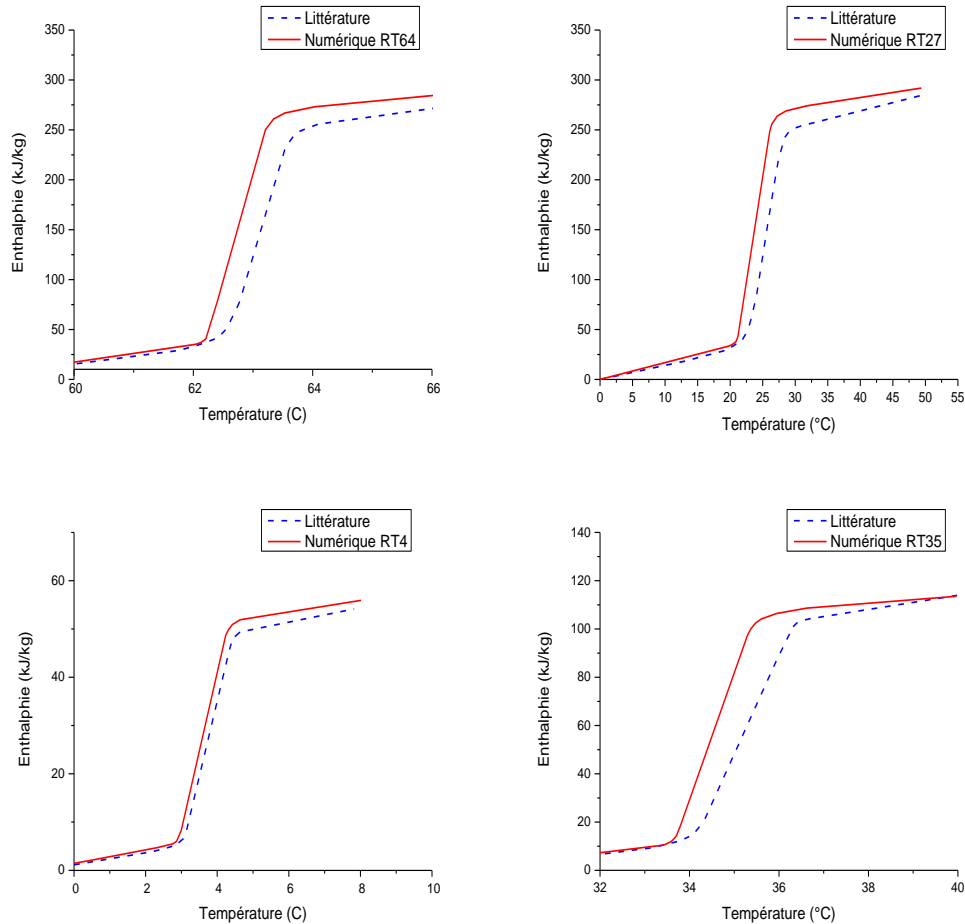


Figure 4. 2 : l'évolution de l'enthalpie H en fonction de la température pour :

- a) la paraffine RT64, b) la paraffine RT27, c) la paraffine RT4, d) la paraffine RT35

Les courbes généralement sont divisées en trois parties : Initialement, les MCP absorbent des quantités importantes d'énergie thermique qui se stocke sous forme de chaleur sensible. Ensuite, la température augmente jusqu'à ce que les MCP atteignent la température du changement de phase, dans ce cas la température est constante et l'énergie est stockée sous forme de chaleur latente. Puis, les MCP continuent d'absorber la chaleur jusqu'à ce que tous les matériaux soient convertis en phase liquide. On remarque que le modèle proposé décrit avec précision le processus du changement de phase.

Au final, cette méthode est consistante du point de vue thermodynamique, étant donné que dès le départ elle conduit à des résultats bien meilleurs comparés à la littérature. Par conséquent les résultats sont contrôlés en considérant différents modes de transfert de chaleur qui conduisent à un

changement de phase plus rapide du MCP. Ainsi le temps de fusion est optimisé et une grande quantité d'énergie est collectée comme le montre la Figure 4. 2.

D'un autre côté, la diminution de la température suscite le matériau de restituer l'énergie emmagasinée. Dans ce cadre, la considération des différentes sources de chaleur permet de réduire le temps de fusion comme a été montré dans la figure 4.3.

La température pendant le processus de fusion augmente pendant les 30 premières minutes, puis la courbe devient presque droite entre 30 minutes et 60 minutes. Pendant cette période, les transitions de phase solide à liquide ont lieu à 62 °C pour la paraffine RT64, 27 °C pour la paraffine RT27, 35°C pour la paraffine RT35 et 4 °C pour la paraffine RT4 respectivement. Le MCP stocke alors de l'énergie avec l'augmentation de la température.

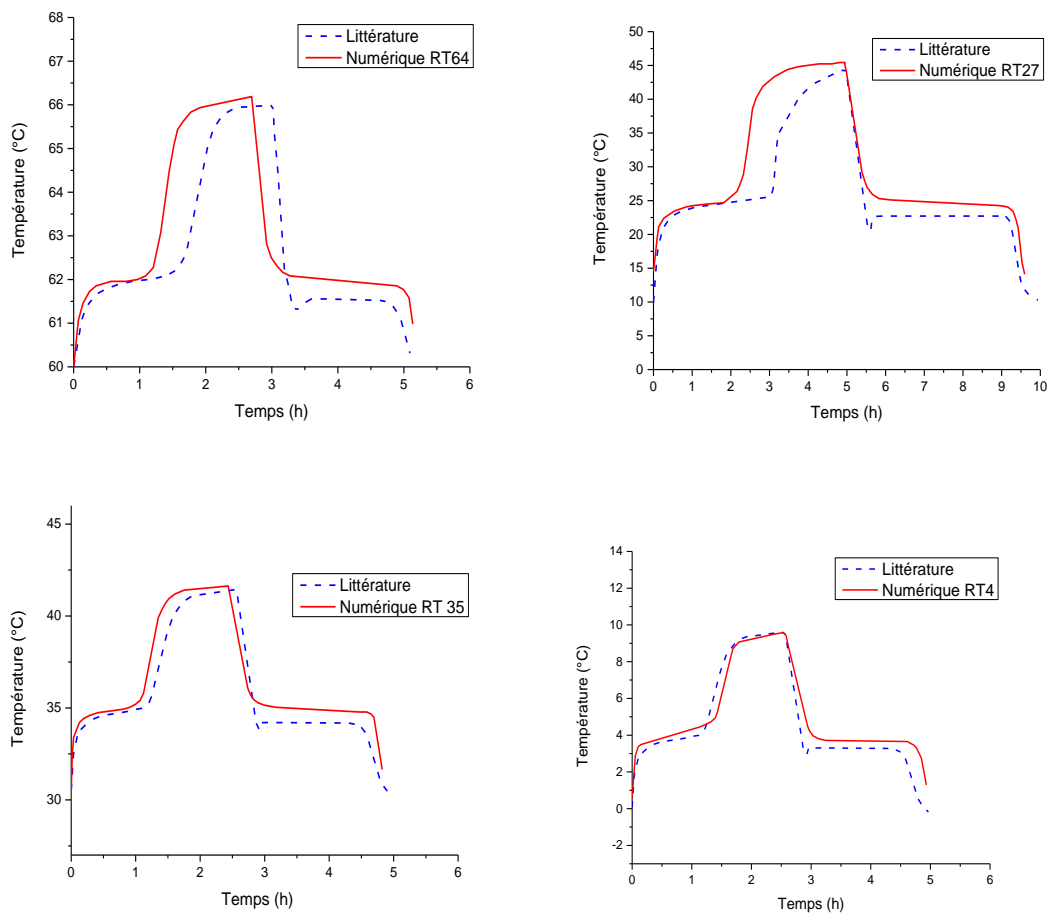


Figure 4. 3 : Courbe de la température en fonction du temps en comparant le modèle avec la littérature, pour : a) la paraffine RT64, b) la paraffine RT27, c) la paraffine RT35, d) la paraffine RT4

En conclusion, il existe un gradient de température dans l'échantillon et celui-ci loin d'avoir une température homogène, ce qui pose un problème dans l'évolution temporelle du MCP, en effet

dans un premier temps la variation de la température permet de varier l'énergie par unité de la masse, c'est ce qui a été montré dans cette étude.

En plus, le modèle montre que l'augmentation de la température d'un matériau à changement de phase à l'état initial permet de stocker l'énergie thermique par chaleur sensible. Ensuite, le changement de phase de MCP se fait à température constante et l'énergie sera stockée par chaleur latente jusqu'à la transformation complète du l'état solide à l'état liquide. Généralement, le matériau continue à recevoir de l'énergie au cours du temps, ce surplus d'énergie sera alors stocké sous forme de chaleur sensible.

4.4.2. Le processus de fusion / solidification

Dans le cadre de cette étude, l'étude numérique est effectuée afin de suivre le processus de fusion d'un MCP de type RT35 pour un système TES cylindrique vertical.

Suite aux résultats numériques menés, nous obtenons des résultats très intéressants. La figure 4.4 montre la comparaison de la fraction de fusion avec le temps entre les résultats expérimentaux et numériques. Cette fraction est calculée par ($f_v = \text{Volume de MCP liquide} \times 100 / \text{volume de MCP total}$).

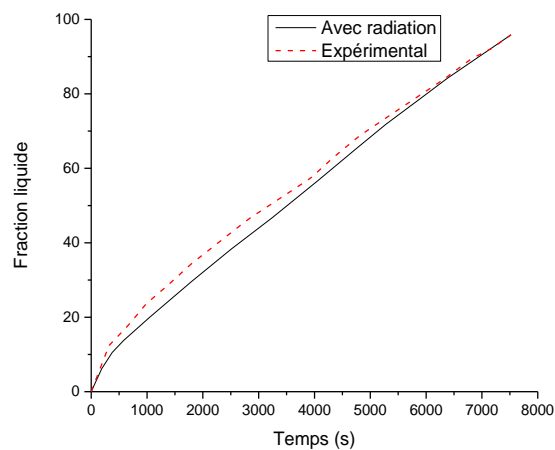


Figure 4. 4 : Une comparaison de la fraction de fusion avec le temps entre les résultats expérimentaux et numériques

Comme l'on peut voir, la courbe représente une comparaison de la fraction de fusion avec le temps entre les résultats du modèle et les résultats expérimentaux [76], un parfait accord entre les deux courbes est observé.

4.4.3. L'impact sur la fusion et la solidification du MCP

Nous étendons l'étude en contrôlant l'impact sur la fusion et la solidification du MCP. Nous utilisons le modèle basé d'un modèle enthalpique combiné avec le modèle de Carman-Kozeny [77] qui permet d'annuler la vitesse dans la partie solide.

Les résultats d'étude numérique du processus de fusion d'un matériau à changement de phase (MCP) placé à l'intérieur d'une enceinte rectangulaire verticale sont présentés sur la figure 4.6. Ce comportement est identique pour tous les matériaux étudiés.

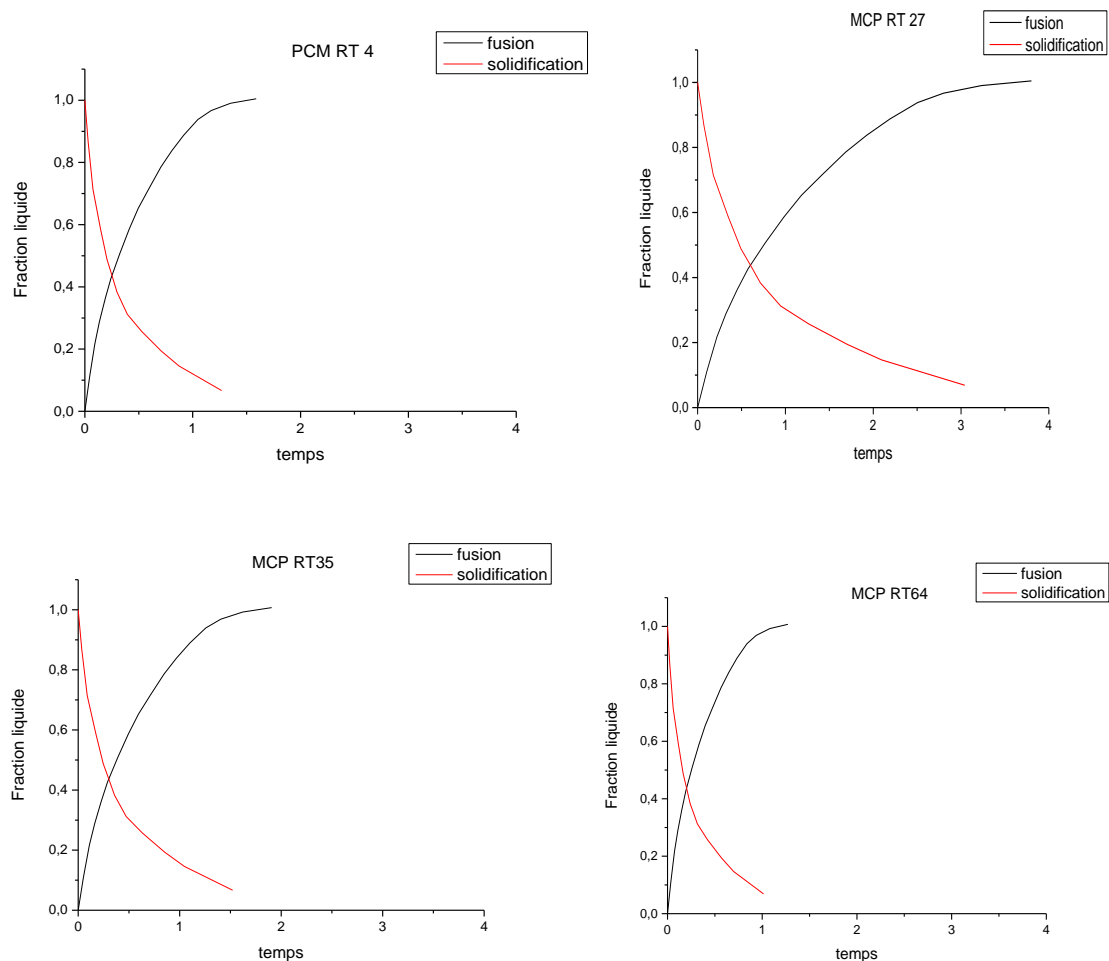


Figure 4. 5 : La solidification et la fusion dans un système MCP pour les différents types de MCP.

On constate que le refroidissement se fait d'une façon plus rapide que la fusion. C'est ce qui nous donne une information sur les applications de ce problème de changement de phase dans le domaine du stockage de l'énergie. La difficulté réside dans la non-linéarité des propriétés physiques et des équilibres énergétiques à l'interface solide-liquide et dans le déplacement de cette interface au cours du temps. A partir de ces résultats, on considère que le taux de fusion est dominé

par la convection naturelle, ainsi la convection est considérée comme le mode de transfert de chaleur qui régit le processus au début de la fusion, suivie par une courte période de transition avant que la conduction devienne le mode de transfert de chaleur dominant dans la phase liquide. Cependant, on peut dire que la convection naturelle accélère le processus de fusion, le déplacement solide- liquide, c'est ce qui peut être expliqué par le fait que la fusion est concentrée dans la partie supérieure de la cavité.

Dans ces conditions, on montre qu'un matériau à changement de phase (MCP) est une substance qui permet de stocker ou relâcher des grandes quantités d'énergies sous forme de chaleur latente en chauffant ou en refroidissant un solide ou un liquide. La chaleur est absorbée lorsque le matériau change de l'état solide à liquide, et elle est relâchée lorsque celui-ci passe de l'état liquide à l'état solide. La grande chaleur latente des MCP est efficace pour absorber la chaleur et ralentir l'augmentation de température des systèmes.

Nous nous proposons d'aborder maintenant de présenter les principes de modélisation à partir des lois fondamentales de thermodynamique.

4.5. LE PRINCIPE DE LA MODELISATION A PARTIR DES LOIS THERMODYNAMIQUES

L'idée est donc de comparer des résultats de simulation pour lesquels la modélisation thermodynamique du MCP est basée sur la méthode présentée ci-dessus avec des résultats utilisant les procédures habituellement mises en œuvre pour caractériser le MCP [78], [79].

Dans un premier temps, cette procédure a été testée sur des MCP purs, puis sur un matériau composite dans lequel on a inclus des MCP.

Sur les figures 4.6, nous avons représenté l'évolution de l'énergie mise en jeu (emmagasinée ou délivrée par l'échantillon) lors des cycles successifs de fusion/solidification. On remarque qu'il faut un certain temps pour que le comportement du matériau devienne stable. Ce n'est qu'au bout d'environ 100min qu'on retrouve le comportement et les enthalpies de fusion/solidification correspondant au MCP.

L'augmentation de la température permet aux matériaux à changement de phase d'emmagasiner une grande quantité d'énergie thermique par l'absorption de la chaleur de leur environnement.

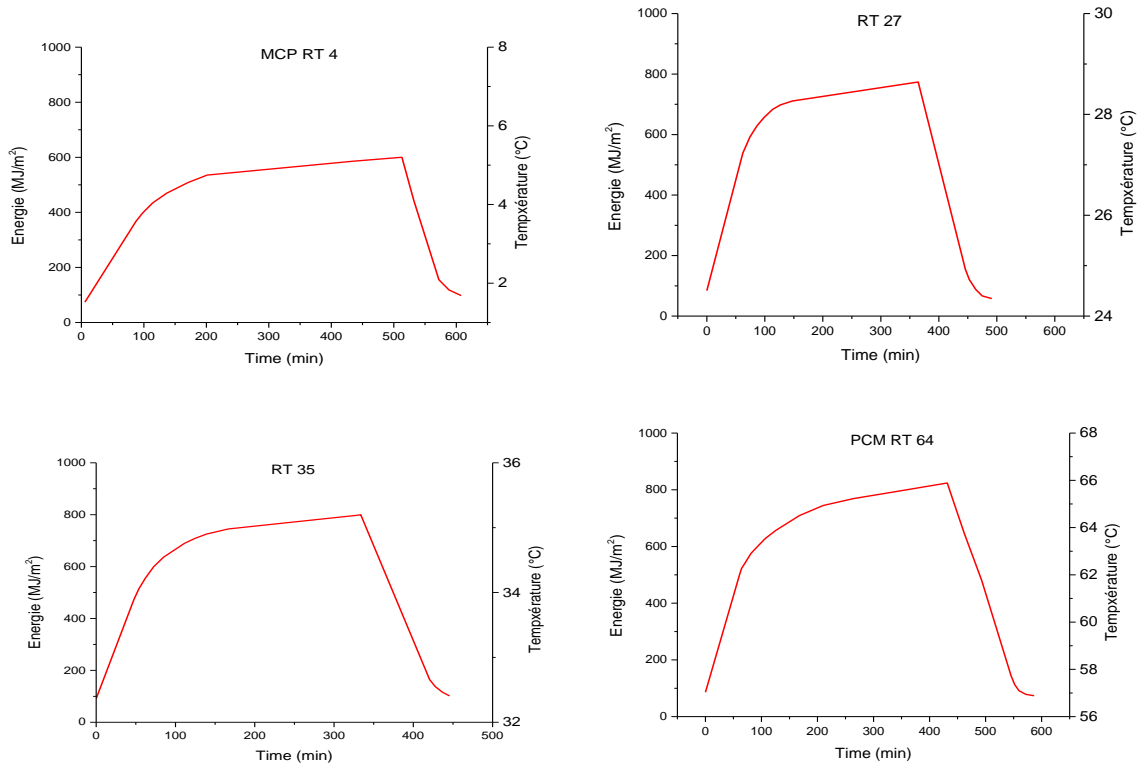


Figure 4. 6 : Énergie stockée par unité de surface en fonction du temps.

En conclusion, l'énergie est alors emmagasinée sous forme de chaleur latente grâce à la fusion de ces matériaux, puis elle est restituée au milieu ambiant due à leur solidification. Cependant, les systèmes de stockage d'énergie par chaleur latente ne sont pas très répandus car leur conception est freinée d'une part par la complexité des phénomènes de transfert thermiques qui se déroulent en leur sein, d'autre part par la difficulté de suivre avec précision l'évolution de l'interface solide-liquide et résoudre efficacement la convection naturelle dans la partie fluide.

Pour optimiser les performances du système de stockage d'énergie par chaleur latente et pour que toute l'énergie souhaitée puisse y être stockée, l'addition d'autres constituants à haute conductivité dans les MCP est présentée, C'est là le sujet des deux prochaines sous-parties.

4.6. VALIDATION DE LA METHODE PROPOSEE

L'intérêt de cette méthode est de justifier que l'incorporation d'un MCP dans un autre matériau permet d'améliorer et d'augmenter son inertie thermique par rapport au matériau de référence.

L'intégration de MCP dans une enveloppe peut être considérée comme le rôle d'accumulateur thermique (stockage et déstockage).

Les composites ont une grande capacité à se combiner avec d'autres substances de natures très différentes en raison de leurs excellentes propriétés et de leurs multiples applications. L'étude des propriétés thermiques des nouveaux composites résultant de la combinaison de résine époxy et de matériaux à changement de phase (MCP) a été étudiée. À cet effet, différents échantillons ont été proposés en combinant des résines époxy, des MCP organiques (paraffines) et des particules d'aluminium. Leur capacité conduit à introduire ce type du matériau dans tous les domaines de l'ingénierie, notamment dans le secteur solaire et de bâtiment....

4.6.1. Stockage et déstockage de paraffine RT27

4.6.1.1. Paraffine pure RT27

L'intégration des matériaux à changement de phase dans les systèmes thermiques permet de stocker l'énergie thermique par absorption de la chaleur extérieure, dans ce cas le système est dit endothermique. En revanche, le déstockage de la chaleur se fait par la libération de l'énergie stockée, alors le système est dit exothermique. L'échange de la chaleur entre le MCP et l'extérieur permet de collecter ou céder l'énergie via le flux de chaleur (figure 4.8).

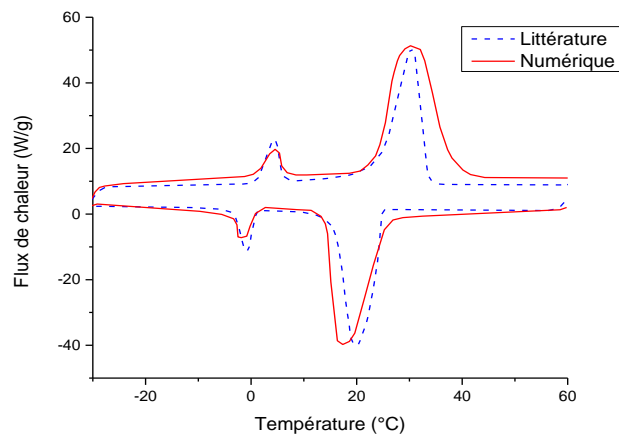


Figure 4. 7 : le flux de chaleur en fonction de température pour RT27 pure

La transformation de phase solide en liquide de paraffine RT27 stocke une quantité importante d'énergie thermique sous forme de chaleur latente. Comme le montre la figure 4.7, la courbe possède deux pics. D'une part, le pic principal correspond au changement de phase solide-liquide. D'autre part, Le pic léger correspond à la transition solide-solide. D'après la comparaison des résultats numériques avec les résultats expérimentaux des analyses DSC (calorimétrie différentielle à balayage) de chauffage et de refroidissement, les températures de début de fusion

et de cristallisation sont très proches à environ 25 °C. Les légères différences pourraient être affectées par de nombreux facteurs tels que la structure et la masse de l'échantillon, la vitesse de chauffage et de refroidissement et les extrémités sélectionnées de la ligne de base, comme il est mentionné par Trigui et al. [80].

4.6.1.2. Composite paraffine RT27 avec résine époxy

En comparant un MCP RT27 pur avec le même MCP contenant de résine époxy, le flux de chaleur et la température moyenne du MCP sont illustrés à la figure 4. 8.

La figure 4. 8 montre le processus de fusion du mélange en traçant le flux en fonction de la température. Deux pics apparaissent. Il a été constaté à partir de cette étude que l'échange de la chaleur a diminué entre la paraffine-résine époxy et la paraffine pure. Cette diminution peut être expliquée par l'ajout de la résine époxy à la paraffine, car ce mélange n'est pas homogène et n'est pas bien mêlé. Cependant, ceci nous révèle un résultat intéressant que les températures de fusion sont encourageantes car elles augmentent d'environ 29°C, c'est ce qui fait que le matériau va emmagasiner plus de chaleur pour la servir ultérieurement.

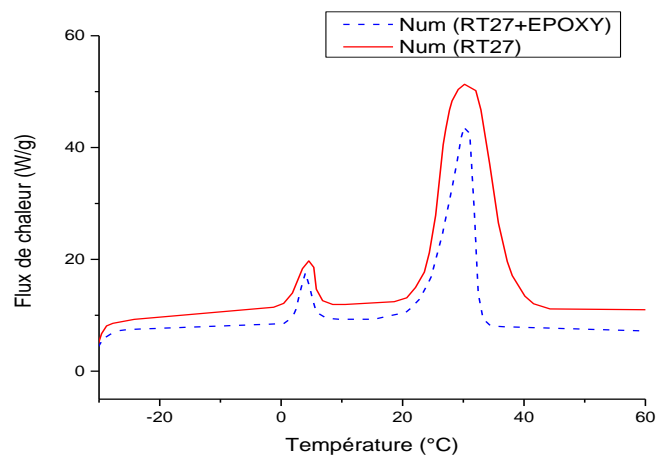


Figure 4. 8 : l'évolution de flux de la chaleur en fonction de la température pour la paraffine pure RT27 et la composite résine époxy

Dans la même direction, la figure 4.9 montre les résultats numériques de l'évolution du flux de la chaleur et de la température en fonction du temps pour le composite en question.

L'utilisation de ce type de composé peut également amortir les effets indésirables, tels que les pertes de performances des équipements dues à une surchauffe ce qui montre que l'incorporation des matériaux à changement de phase dans une résine époxy permet d'améliorer la conductivité thermique du composite [80].

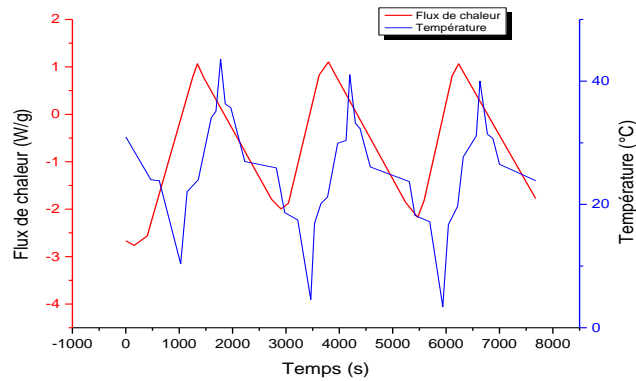


Figure 4. 9 : l'évolution du flux de la chaleur et de la température en fonction du temps

Ces résultats montrent en temps réel l'efficacité du mélange de la résine époxy avec le MCP. La courbe de la simulation a montré les pics d'absorption et de libération de chaleur les plus élevés, c'est-à-dire les plus grandes zones de pics. Les transitions de changement de phase ont été rapides, mais pas immédiates générant des pics étroits, allongés et différenciables. Cette combinaison pourrait être une bonne option pour un revêtement, car elle a une capacité d'absorption de chaleur élevée accompagnée d'un dégagement thermique ultérieur.

4.6.1.3. Composite de paraffine RT27 avec perlite expansée

La paraffine RT27 a été combinée avec la perlite expansée. Dans ce sens, le flux de chaleur et la température moyenne du MCP sont illustrés à la figure 4. 10 :

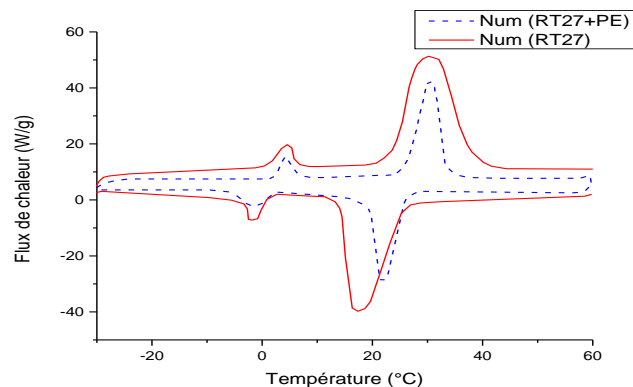


Figure 4. 10 : flux de la chaleur en fonction de la température pour la paraffine pure RT27 et la perlite expansée

La figure 4. 10 représente l'évolution de l'échange de la chaleur en fonction de la température pour la paraffine pure RT27 et la perlite expansée respectivement. Il a été remarqué à partir de cette étude que l'échange de la chaleur a diminué entre la paraffine/composite et l'extérieur. Cette diminution est due à l'hétérogénéité du mélange et à l'augmentation du volume de porosité de la paraffine dans le système.

Les résultats des tests de performances thermiques couplées aux performances mécaniques donnent une idée sur l'intégration de MCP-composite dans l'industrie de la construction.

L'état du MCP (solide ou liquide) - composite affecte les propriétés mécaniques du matériau. En effet, une diminution des performances mécaniques des MCP-composite est observée lorsque le MCP passe d'un état solide à un état liquide. Cette tendance augmente avec la teneur d'autre constituant dans le système, résultat représenté dans la figure 4.11.

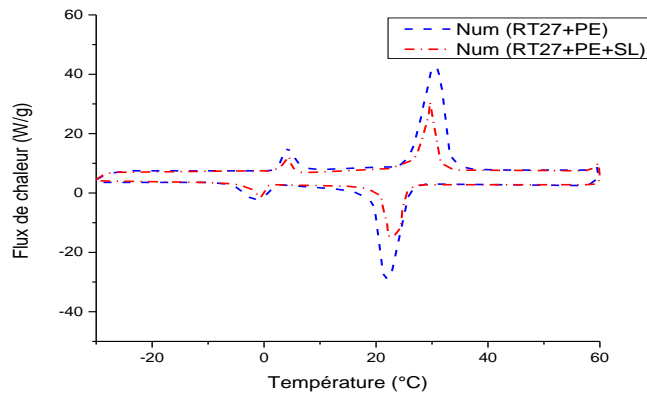


Figure 4. 11 : variation du flux de la chaleur en fonction de la température pour RT27 pure et les composites

Pour analyser les performances mécaniques au cours de cycle de chauffage et de refroidissement, des essais ont été réalisés sur (RT27 / PE / SL) avec et sans aluminium. La figure 4.12 représente la simulation de ces essais.

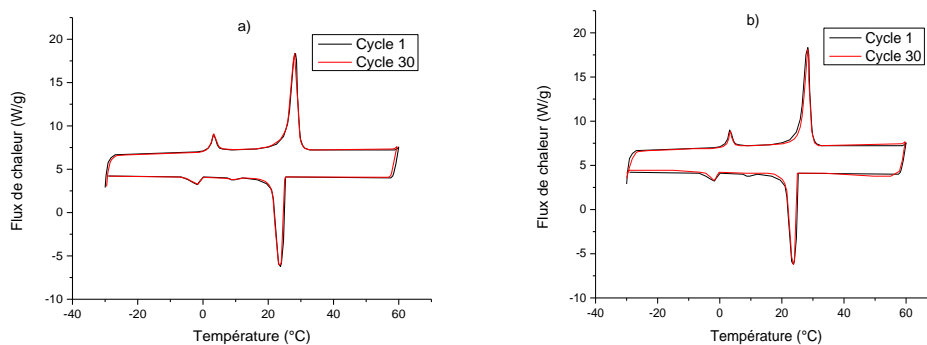


Figure 4. 12 : La variation du cyclage thermique de l'échange thermique en fonction de la température

Pour les composites (RT27 / PE / SL) des paraffines : a) sans aluminium, b) avec aluminium

Les tests cycliques montrent la fiabilité thermique des composants RT27 / PE / SL / et RT27 / PE / SL / Al / en tant que matériau du stockage de chaleur. Comme l'on peut le constater, les deux composites ont une bonne fiabilité thermique, leurs courbes se chevauchent presque parfaitement pour l'échantillon.

A partir de ces résultats, nous pouvons constater une très bonne concordance entre le modèle et les résultats expérimentaux [81]. C'est ce qui valide l'approche développée du matériau considéré avec la loi des mélanges.

4.6.2. Stockage et déstockage de paraffine RT64

4.6.2.1. Paraffine RT64 pure

Le modèle proposé a été aussi testé sur la paraffine RT64. Les résultats sont comparés aux résultats expérimentaux dans le cas de charge et décharge du stockage thermique. De plus, la complexité du phénomène thermique de matériaux composites contenant MCP a été étudiée afin de poursuivre la performance et améliorer les connaissances sur les matériaux à changement de phase.

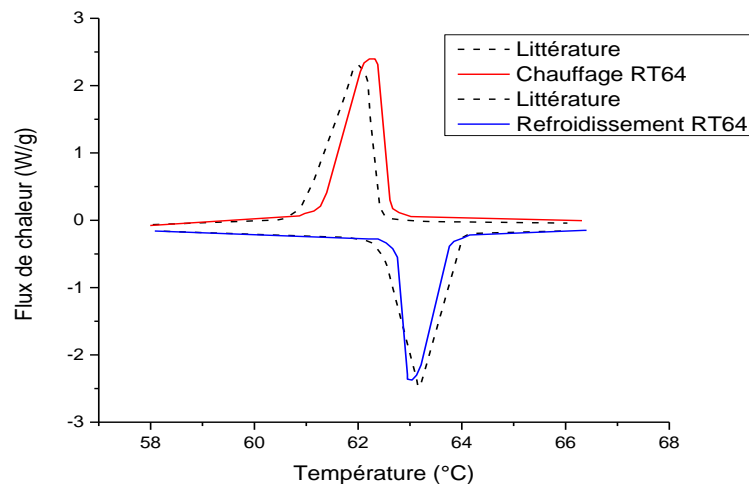


Figure 4. 13 : le flux de chaleur en fonction de la température

Comme il est montré sur la figure 4.13, les résultats numériques de l'évolution du flux de chaleur en fonction de la température pendant le processus du changement de phase solide-liquide et liquide-solide. Les flux de chaleur présentent deux pics l'un positif et l'autre négatif en raison du sens du transfert vers l'échantillon dans les deux cas. Ces pics caractérisent le pic de température de fusion et le pic de température de solidification. Dans ces résultats, la température de pic de fusion est égale à 62,4 °C, avec une valeur de 62,9 °C pour la température au pic de solidification. Le faible décalage de température de fusion remarqué peut être attribué à un équilibre énergétique dû aux différents modes de transfert de chaleur. La conduction domine le processus de fusion compensée par la convection naturelle et le mode de rayonnement qui freinent le processus en question.

4.6.2.2. Paraffine RT64 Composite

Cette partie propose de suivre l'évolution de la paraffine RT64 encapsulée par la perlite expansée et par l'ajout de polystyrène. Les résultats des simulations numériques sont présentés dans la figure 4.14.

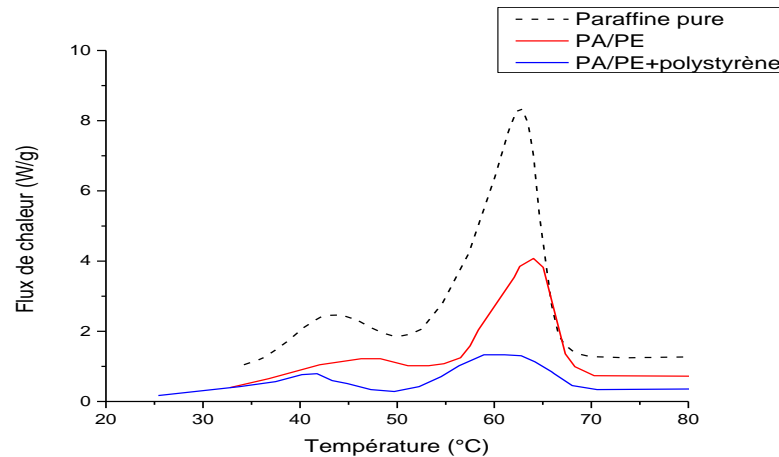


Figure 4. 14 : l'échange de la chaleur entre l'extérieur et le MCP

La figure 4.14 montre l'échange de la chaleur entre l'extérieur et le MCP, ce dernier permet de collecter l'énergie via le flux de chaleur. La transformation de phase solide en liquide de paraffine RT64 pure permet d'absorber une quantité importante d'énergie thermique sous forme de chaleur latente. Un fort pic est apparu à environ 62,3 °C attribué à la transition de phase solide-liquide de la paraffine et pourrait être considéré comme la température de fusion et la chaleur latente de fusion maximale. Par contre, il a été obtenu des pics environ 62°C attribué à la transition de phase solide-liquide des échantillons PE / PA et PE / PA modifiés en surface malgré la diminution de la chaleur latente de fusion. Les légères déviations dans la température de fusion pour deux échantillons de composites pourraient être attribuées à la faible interaction entre la paraffine et les surfaces internes des milieux poreux perlitiques, ce qui permet d'affecter le processus de cristallisation. Le premier léger pic pour chaque courbe pourrait être attribué au changement de structure solide à solide de la paraffine pendant le processus de chauffage.

Cependant, l'utilisation MCP- composites (perlite expansée, résine époxy) permet de protéger le MCP, mais elle diminue l'échange thermique avec l'extérieur ce qui réduit l'énergie stockée.

Cette diminution est due à l'hétérogénéité du mélange et à l'augmentation de volume de porosité de la paraffine dans le système.

Les faibles valeurs de la chaleur latente dans les deux échantillons composites sont dues à la plus faible quantité de paraffine dans le mélange. Ce qui explique que la paraffine pure est capable de stocker une grande chaleur latente par un processus de transition de phase isotherme.

Comme dans le cas du RT27, une étude est effectuée sur le comportement mécanique après n cycles de chauffage/refroidissement autour de la température du changement de phase du MCP. La courbe 4.15 représente les résultats des simulations numériques pour un n nombre de cycles répétés du composite-MCP.

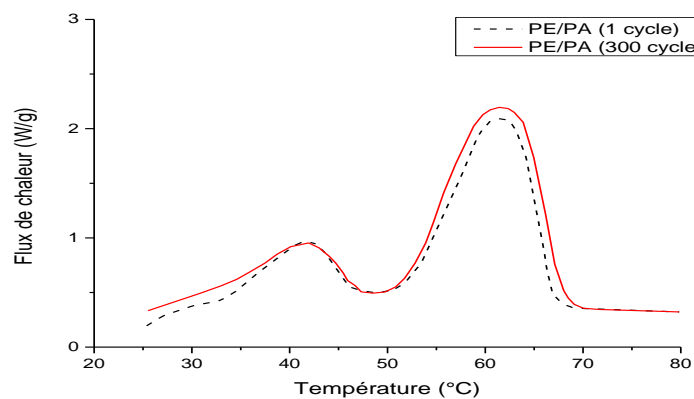


Figure 4. 15 : la variation du flux de la chaleur pour le composite PE/PA jusqu'à 300 cycles fusion/solidification.

Comme montre la figure, aucun changement significatif des propriétés thermiques des composites MCP n'a été observé après l'essai de cyclage thermique. De plus, aucune perte de paraffine n'a été observée après le test de cyclage thermique.

Ce que l'on peut tirer de ces résultats, c'est que la stabilité thermique et la fiabilité sur un grand nombre de cycles de fusion / solidification sont l'un des aspects cruciaux des composites MCP [27]. De ce fait, la stabilité thermique des composites PE / PA modifiés en surface a été évaluée via des tests de cyclage thermique en appliquant un programme de chauffage / refroidissement.

4.6.3. Stockage et déstockage de la paraffine RT35.

Des tests de simulations ont été aussi réalisés sur la paraffine RT35. Le flux de chaleur et la température moyenne du MCP sont illustrés à la figure 4.16.

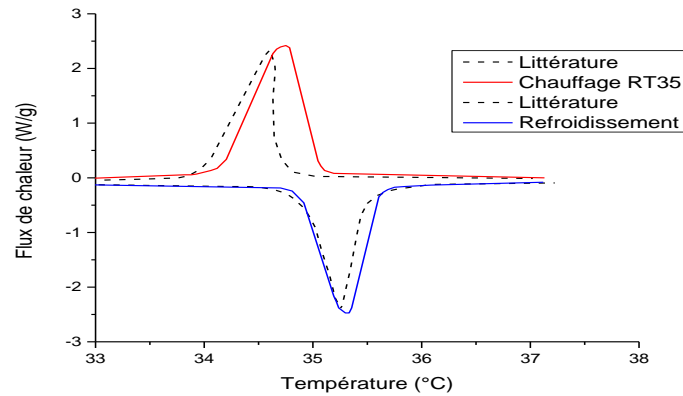


Figure 4. 16 : le flux de chaleur en fonction de température RT35 pure

Le flux de chaleur varie au fur et à mesure avec la variation de la température, l'échange thermique entre le MCP et l'extérieur permet d'absorber ou libérer l'énergie.

Ainsi, la variation de la température permet de décrire le processus de fusion /solidification de la paraffine RT35 et de déterminer le point de fusion entre la phase solide et liquide.

4.6.4. Stockage et déstockage de la paraffine RT4

Les tests ont été également effectués sur la paraffine RT4. Les résultats figurant sur la figure 4.17 ont été obtenus avec les mêmes hypothèses et scénarios que ceux utilisés pour les simulations des autres MCP.

La figure 4. 17 montre la variation du flux de chaleur en fonction de la température lors du processus de fusion /solidification de la paraffine RT4.

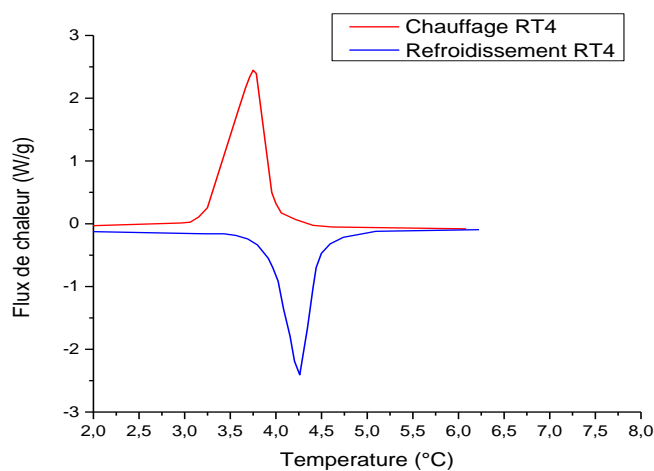


Figure 4. 17 : flux de chaleur de RT4 en fonction de la température

Cette dernière stocke une quantité importante d'énergie thermique sous forme de chaleur latente lors du changement de phase solide en liquide.

Le RT4 est un MCP adapté à son point de fusion dans la plage de température souhaitée, une surface d'échange de chaleur appropriée et un récipient compatible avec le MCP.

4.7. ÉTUDE DES PARAMETRES DE CONDUCTION THERMIQUE

4.7.1. Capacité calorifique

Le but de ce paragraphe est de contribuer à l'étude des matériaux (composites) complexes intégrant des matériaux à changements de phase et donner une évaluation de la performance énergétique globale. Le résultat attendu de cette étude est de contrôler à la fois les phénomènes physiques (changement de phase) mis en jeu et les paramètres de la conduction thermique (capacité calorifique et l'estimation de la conductivité thermique du matériau composite-MCP).

La capacité thermique à pression constante (C_p) est une grandeur qui caractérise la quantité de chaleur (ΔQ) requise pour changer la température de l'échantillon par ΔT .

Sur la courbe 4.19, on présente la variation de la capacité thermique en chauffage de RT 27 pure en fonction de la température.

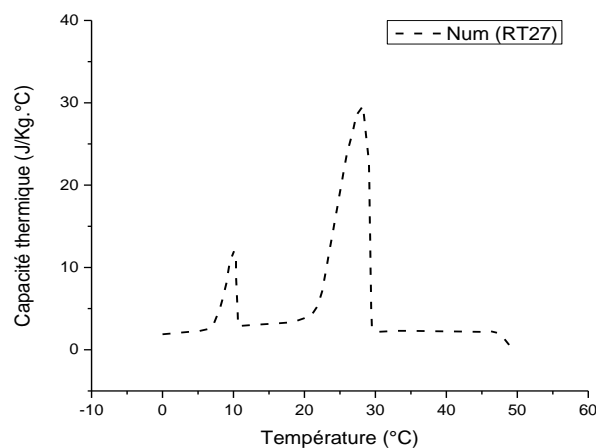


Figure 4. 18 : l'évolution de la capacité thermique en fonction de la température

Pour contrôler la propagation de chaleur du milieu hétérogène, on a suivi l'évolution de la capacité thermique en fonction de la température. Pour cette simulation, on a choisi comme matériau le composite paraffine RT27 /perlite expansée. Le composite obtenu a été mélangé au plâtre pour différentes fractions massiques variant entre 20 et 50%.

La figure 4.19 représente l'évolution de la capacité thermique des composites paraffine / perlite expansée / plâtre sans Al en chauffage à 10°C/min, On remarque que la capacité thermique mesurée quand le matériau est à l'état solide est bien inférieure à la capacité thermique mesurée quand la paraffine est à l'état liquide.

La capacité thermique du composite-RT27 augmente de façon linéaire avec la température sur les plages de température étudiées. Le composite en % – MCP améliore la capacité calorifique, c'est ce qui peut traduire que le mélange convient à l'application du stockage de l'énergie thermique aussi bien à basse température qu'à haute température [25].

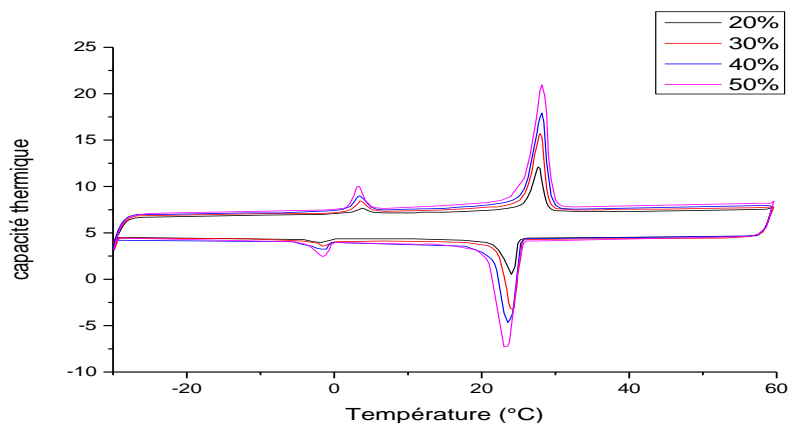


Figure 4. 19 : Evolution de la capacité thermique massique des composites paraffine / perlite expansée / plâtre sans Al en chauffage à 10°C/min

4.7.2. Contrôle de la conductivité thermique

La conductivité thermique « k » ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) est une grandeur physique importante qui caractérise la capacité isolante d'un matériau. Plus le coefficient k est faible, plus le pouvoir isolant du matériau est grand. Sa valeur dépend de plusieurs facteurs. La conductivité thermique k des matériaux est la propriété la plus couramment étudiée car elle dépend de la structure du matériau et de ses composants, contrairement à la convection qui intègre l'environnement immédiat du matériau. Elle présente un intérêt particulier dans les applications de transfert de chaleur. Ce paramètre est fortement affecté par la composition et la structure des matériaux hétérogènes [24].

L'étude de la conductivité thermique peut être réalisée par dispersion de particules conductrices dans le MCP, le mélange obtenu dispose ainsi d'une conductivité accrue. Les particules utilisées sont généralement des particules métalliques. Une imprégnation du MCP dans une structure poreuse conductrice peut aussi être réalisée, la nature du matériau conducteur utilisé est un composite.

Dans ce travail, les propriétés thermo-physiques des matériaux composites avec changement de phase ont été étudiées numériquement.

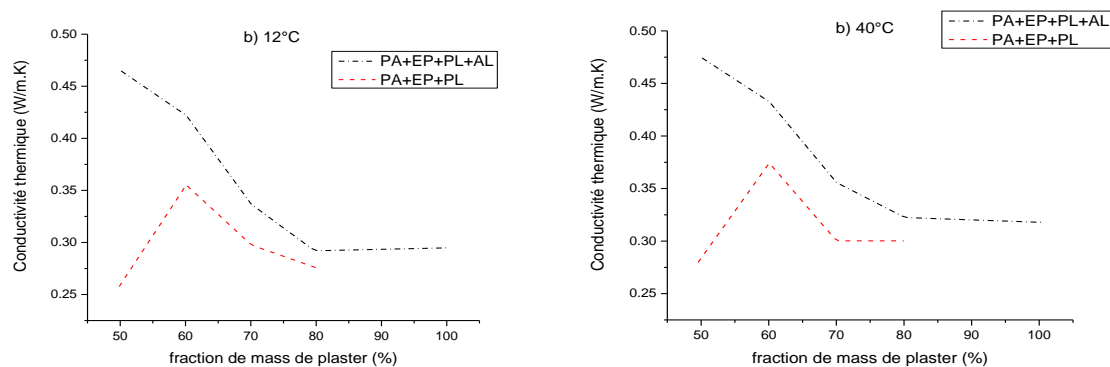


Figure 4. 20 : l'évolution de la conductivité thermique en fonction de % masse de plâtre

La figure 4.20 représente la variation de la conductivité thermique en fonction de la fraction de % de masse de plâtre. Les résultats numériques expliquent notre MCP composite ((RT27/EP/PL) avec et sans ajout d'une poudre d'Aluminium à masse variable.

Les résultats montrent que la faible conductivité thermique de (RT27/EP/PL) pourrait entraîner de faibles taux de transfert de chaleur en limitant la capacité du stockage et de récupération de chaleur pendant les processus du chauffage et du refroidissement.

Afin d'augmenter la conductivité thermique pour maintenir la température souhaitée de notre composite MCP (RT27/EP/PL), un additif d'une poudre d'aluminium après séchage du composite RT27 / EP / PL a été ajouté.

L'ajout d'aluminium après séchage du composite RT27/EP/PL à 10% en poids change les mesures de conductivité thermique aussi bien à l'état solide 12°C qu'à l'état liquide 40°C. Suite à ces résultats, la conductivité thermique est très importante dans le composite MCP, ce qui peut améliorer le potentiel d'absorption de chaleur pour une application dans des revêtements de surface par rapport au composite MCP sans Al.

4.8. MODELE NUMERIQUE EN 2D

La caractérisation thermophysique du comportement de MCP dépend de plusieurs facteurs, entre autres, le mode de transfert de chaleur et la géométrie. Plusieurs classifications ont été citées dans la littérature. Ces facteurs rendent le problème de changement de phase plus complexe et très coûteux en temps de calcul surtout lorsque l'on modélise numériquement ces processus. Pourtant la négligence de ces facteurs rend l'étude incomplète.

4.8.1. Modèle physique

Le système physique considéré dans ce travail, il s'agit d'une enceinte de forme rectangulaire de hauteur 30 cm et de largeur 20 cm, remplie des paraffines comme MCP, dans toutes les faces sont isolées thermiquement sauf la face supérieure de plaque reçoit une température chaude et celle du bas reçoit une température froide.

Afin de développer une simulation numérique qui permet de décrire le processus de changement de phase avec les phénomènes accompagnant, une étude numérique par le logiciel ANSYS Fluent a été réalisée. Ce code commercial se base sur la méthode des volumes finis, celle-ci consiste à discrétiser le domaine de l'écoulement en une multitude de volumes de contrôle, puis à effectuer sur chacun d'entre eux les bilans de masse, de quantité de mouvement et d'énergie. Le principal atout de la méthode des volumes finis par rapport aux autres méthodes est qu'elle est conservative.

Le schéma de discrétisation spatiale POWER LAW a été utilisé. En effet, plusieurs chercheurs [82], [83] ont montré que ce schéma est le plus approprié pour la simulation du changement de phase par la méthode enthalpique.

Dans cette étude, un modèle 2D à double précision est utilisé. De plus, les paramètres de contrôle sont utilisés par défaut. Ensuite, la méthode SIMPLEC est adoptée en mode de couplage vitesse-pression, le calcul de la pression a été fait par la méthode PRESTO et les autres sont tous par défaut. Dans cette partie, une étude de vérification a été menée pour valider la modélisation proposée du chapitre précédent.

4.8.2. Géométrie rectangulaire

Dans une première étape, la géométrie de MCP choisie est une structure rectangulaire. Cette géométrie est la plus utilisée dans la recherche et dans l'industrialisation due à sa simplicité de modélisation et de fabrication. Dans ce sens on a considéré une structure MCP de longueur $L=30\text{cm}$ et de largeur $l=20\text{cm}$ comme elle a été présentée dans la figure 4.21 ci-dessous :

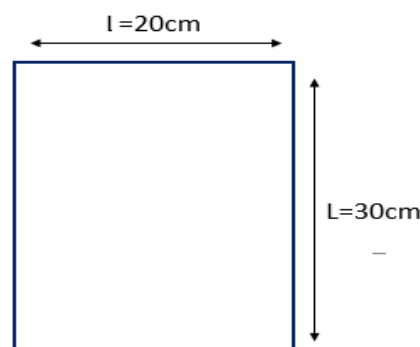


Figure 4. 21 : *Modèle géométrique de la structure proposée*

4.8.3. Maillage du système

Le maillage a un impact direct aussi bien sur la convergence, sur la précision de la solution et sur le temps de calcul. Le modèle géométrique est maillé de manière uniforme à l'aide des cellules carrées symétriques, comme c'est illustré à la figure 4. 22 ci-dessous :

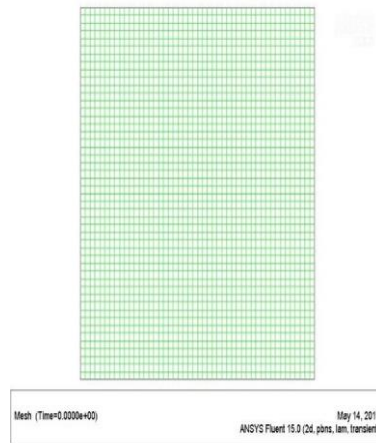


Figure 4. 22 : *Maillage pour la géométrie rectangulaire.*

4.8.4 Géométrie triangulaire

De même, afin d'optimiser le processus de changement de phase, une étude numérique a été établie à partir d'une ingénierie triangulaire. Cette géométrie peut former des autres géométries comme (rectangle et parallélogramme). Le modèle est maillé de manière uniforme selon la figure 4.23.

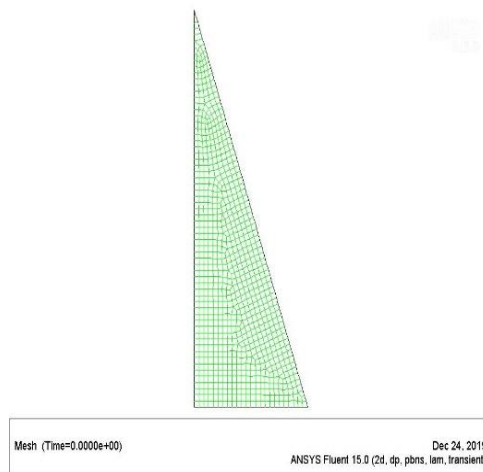


Figure 4. 23 : *Maillage pour la géométrie triangulaire*

4.8.5. Résultat du modèle numérique CFD

Les résultats du modèle mathématique, nous ont montré que le transfert de chaleur dans un module de stockage est souvent influencé par les mouvements de convection naturelle de MCP liquide et de conduction pendant la solidification. La prédiction des performances thermiques de tel module a besoin de son dimensionnement. Afin de tenir compte de la géométrie et de la performance du module de stockage qui tiennent compte de tous les phénomènes physiques précédemment tout en permettant un temps de calcul raisonnable. Nous allons utiliser une approche CFD, c'est une approche fondée sur l'enthalpie qui tient compte le mouvement de MCP lors de changement de phase. Notons aussi que la méthode de maillage est aussi basée sur une formulation enthalpique de conservation de l'énergie, elle utilise la fraction liquide locale pour suivre le déplacement du front de fusion à travers le maillage.

Ainsi, pour contrôler la position du front de fusion ou de solidification au cours du temps, plusieurs méthodes numériques sont proposées dans la littérature (73). Méthode à maillage fixe et méthode à maillage mobile (déformable) une méthode qui demande plus de temps. Dans le cadre de notre étude, on choisit la méthode enthalpique à maillage fixe qui est une méthode très utilisée dans le domaine de métallurgie dans le but de prévoir le comportement des matériaux liquides au cours de leur solidification, aussi dans le domaine de stockage d'énergie par chaleur latente.

Dans cette étude numérique, le modèle peut prédire le comportement du MCP en prenant en compte les différents modes de transfert de chaleur pour une géométrie donnée. La solution du modèle numérique peut améliorer la prédiction du comportement thermique, et peut être utilisée pour optimiser et réduire le temps du changement de phase, ce qui permet d'augmenter la production et le stockage d'énergie dans les systèmes thermiques.

Le code d'ANSYS Fluent permet de prévoir l'écoulement du fluide par la résolution des équations de Navier-Stokes grâce à la méthode de volumes finis. Celle-ci consiste à intégrer les équations gouvernantes sur des volumes de contrôle entourant chaque point du maillage. En outre, cette méthode permet de traiter des équations qui contiennent des termes sources complexes et non-linéaires. De plus, elle satisfait les critères de conservation de la masse sur chaque volume de contrôle assurant ainsi la continuité de la solution numérique.

Dans un premier temps, les résultats de la simulation numérique par ANSYS pour une géométrie rectangulaire ont été présentés dans la figure 4. 24. ci-dessous :

Figure 4. 24 : *Evolution temporelle de la fusion du MCP rectangulaire (20, 40, 60, 80, 100,120,140, et 160 min) [67] [84]*

Au début le MCP est à l'état solide, lorsque la température augmente le MCP absorbe la chaleur et après un certain temps le processus de fusion commence. Après le début de la phase de fusion, la convection naturelle et la conduction sont contemporaines dans le système. Par conséquent, la

chaleur a été transmise à travers le MCP par les différents modes de transferts de chaleur en raison de la différence de la température entre le MCP et le système. Juste après la 30^{ème} minute, le MCP continue l'absorption de la chaleur et plus de moitié du système a été liquéfié, par conséquent la convection naturelle s'engage dans la partie liquide. Ainsi, plus la région de fusion s'augmente, le processus de la convection naturelle domine dans le système. Les résultats de CFD permettent de décrire le comportement réel du changement de phase dans le temps, ce qui est en bon accord avec les résultats de la littérature.

La méthodologie est aussi validée sur des essais de géométrie triangulaire, figure 4.25 ci-dessous.

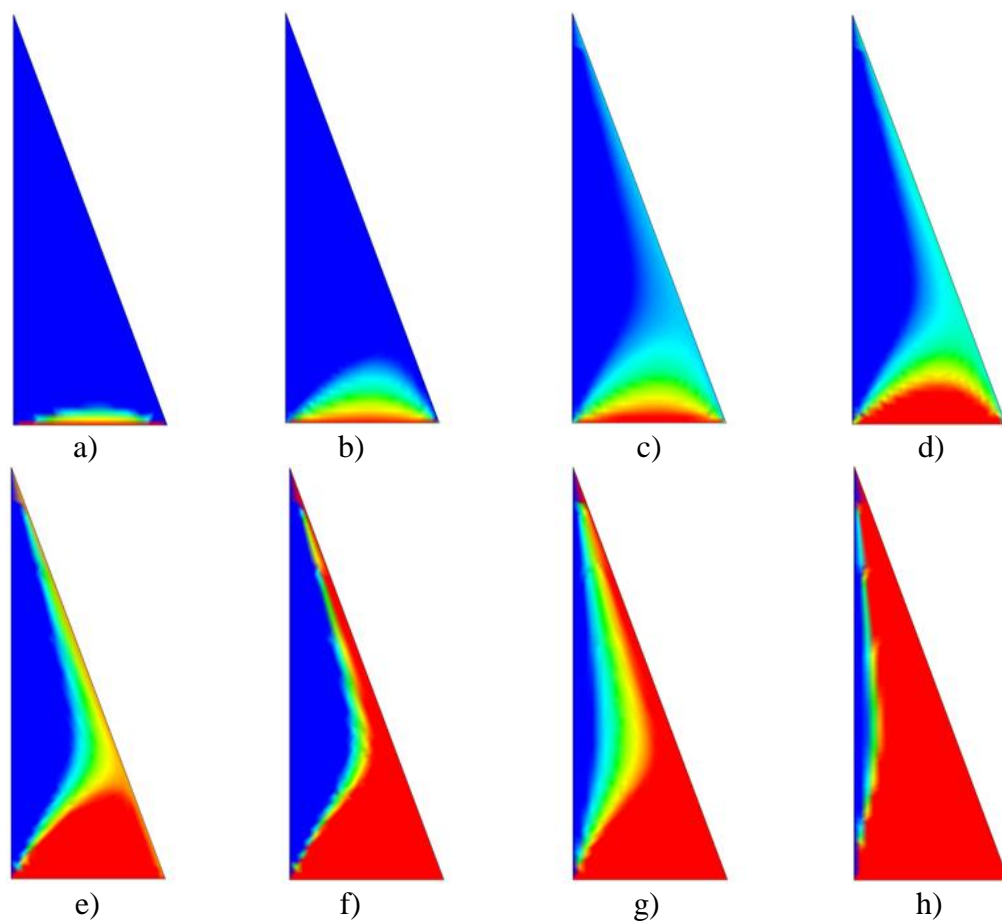


Figure 4. 25 : Evolution temporelle de la fusion du MCP triangulaire (10, 20, 30, 50, 70, 90,110, and 120 min)

Au début, l'augmentation de la température déclenche le processus de fusion qui dure 120 min. On constate que la fusion du MCP triangulaire prend un temps plus réduit que la fusion d'un MCP rectangulaire. Par contre, les vitesses de fusion du même MCP ne change pas. Par conséquent, la forme triangulaire est disponible pour une grande ingénierie qui peut être adaptée à diverses applications.

Suite aux résultats obtenus, on montre que le modèle système reproduit correctement le taux de change produit par la méthode numérique CFD, ainsi que celui est mesuré expérimentalement par un temps très intéressant estimé à plus de 90 fois plus faible. Les figures 4.24 et 4.25 montrent clairement que le taux de fusion augmente au cours du temps tout au long de la cavité.

4.9. EFFET DU RAYONNEMENT SUR LES MCP

La présente étude consacre à analyser l'importance de la radiation dans les systèmes MCP qui visent à stocker l'énergie thermique dans les différentes applications solaires. Dans les dernières années, plusieurs études sont faites pour optimiser le stockage d'énergie thermique par la description des différents mécanismes qui influent sur le processus du changement de phase.

La plupart de ces études considèrent que la conduction est le principal mode de transfert de chaleur pendant le processus de fusion/solidification. Cependant, des récentes recherches montrent que la convection joue un rôle très important pendant la fusion des matériaux à changement de phase.

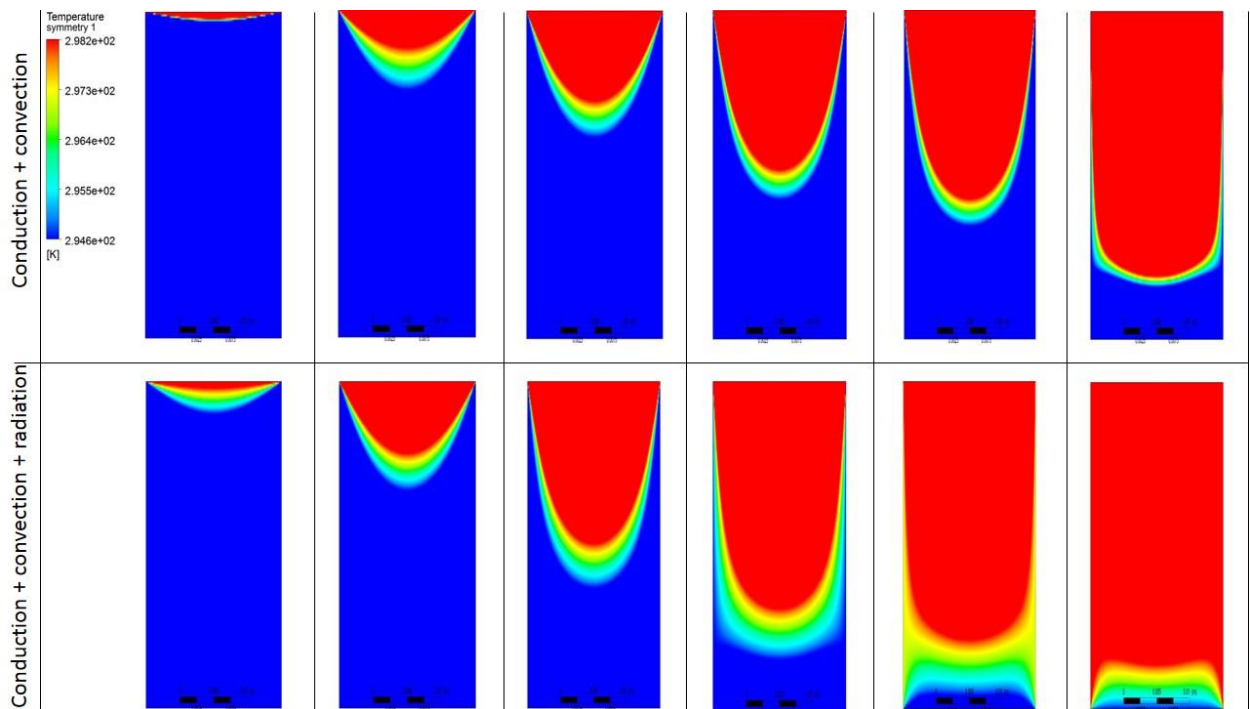


Figure 4. 26 : Evolution temporelle en fonction de la température au cours de la fusion du MCP (30, 60, 90, 120, 150, and 160 min) [67] [84]

Actuellement dans les applications solaires intégrant les MCP une importante énergie se stocke par les rayonnements du soleil. Dans ce cas, le transfert de la chaleur par convection naturelle et rayonnement est très essentiel pendant la fusion d'un MCP.

Tout au long de cette étude, une profonde investigation a été effectuée ; elle permet d'analyser le processus du changement de phase en prenant en compte les différents modes de transfert de chaleur spécialement le transfert par radiation.

Pour étudier l'impact de la radiation sur le phénomène du changement de phase, un calcul supplémentaire a été réalisé pour analyser le système MCP avec et sans radiation.

L'étude numérique par CFD permet de décrire le processus du changement de phase et de montrer l'importance de l'effet radiatif sur les phénomènes de fusion d'un MCP. La figure 4. 26 ci-dessus présente l'évolution temporelle de la température pendant la charge en comparant les différents modes du transfert de chaleur.

Dans le début de la simulation, les deux systèmes (avec radiation-sans radiation) sont dans l'état solide et le champ de température est très semblable. Après 30 min on remarque une progression remarquable dans le système qui tient compte de la radiation. Cette considération de radiation permet une progression rapide du champ thermique, ce qui forme une succession des couches thermiques au cours de la fusion dans la partie liquide du MCP. L'apparition de la zone liquide génère la convection naturelle dans le système, ce qui permet d'augmenter le champ thermique. Ensuite le flux de convection s'est renforcé avec le temps et le front de fusion s'est augmenté. Au bout de 160 min, le système avec radiation proche de la fusion totale par rapport au système sans radiation qui montre un retard remarquable tout au long du processus de fusion.

4.9.1. L'impact du flux du rayonnement sur la fusion et la solidification

- Front de fusion et de solidification

Processus de charge

Nous souhaitons montrer que le temps est un paramètre important du stockage thermique, qui est défini comme le temps nécessaire à un système thermique pour stocker de l'énergie. Il peut être représenté par le graphique de la fraction liquide, comme le montre la figure 4. 27.

En se référant aux ces résultats, nous montrons une autre fois et de manière significative l'impact de l'utilisation de MCP avec et sans radiation.

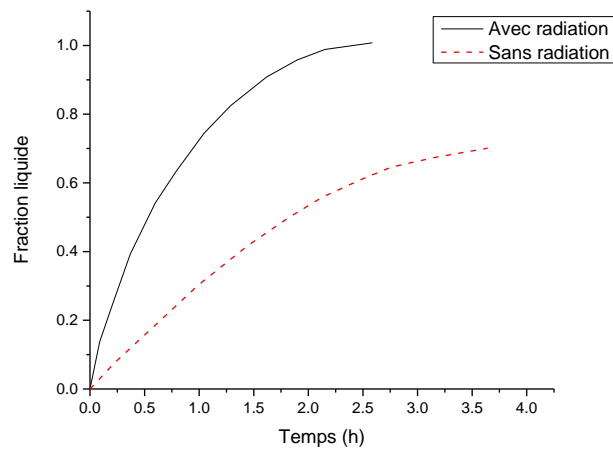


Figure 4. 27 : l'évolution de la fraction liquide durant la charge

Selon les données tirées du résultat numérique, le temps nécessaire pour que la fraction liquide atteigne la valeur 100 % était environ 120 min pour le système avec radiations, et 180 min pour le système à conduction-convection. Pour le système avec radiations la fraction liquide augmente rapidement, et le processus de fusion s'est terminé environ 120 min. Cependant, dans le cas du système sans radiations, le processus de fusion est beaucoup plus lent. Dans ce cas, le processus de fusion s'est terminé environ 200 min.

Il a été conclu que le processus de fusion dans la présence de radiations est beaucoup plus rapide que le processus de fusion du modèle sans radiations.

- **Processus de décharge**

Lors de la décharge (liquide-solide), la variation des fractions liquides est illustrée à la Figure 4. 28. ci-dessous.

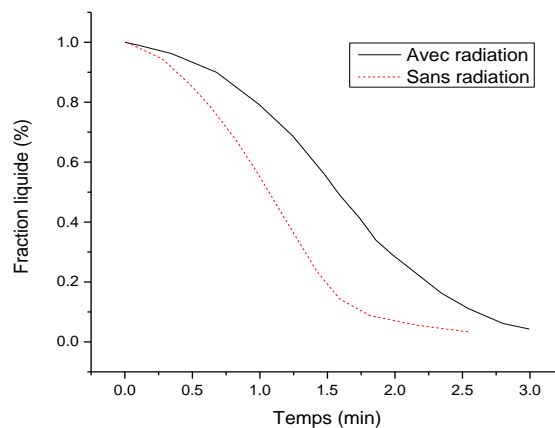


Figure 4. 28 : l'évolution de la fraction liquide durant la décharge

Les résultats de la simulation du système avec et sans radiations montrent que la solidification a commencé après les 20 premières minutes. Elle devient plus significative pour le système avec radiations, cette différence peut être liée à la formulation de changement de phase dans le modèle et des pertes thermiques.

4.9.2. Synthèse du résultat de la radiation

En comparant les résultats de deux approches avec et sans radiations, il s'avère que les deux donnent des résultats sur le comportement thermique avec un temps de calcul différent. La figure 4.30, illustre la différence entre deux simulations, réalisées toutes les deux avec un maillage fin, avec et sans radiations. Comme le montre la figure, l'évolution de la température en fonction du temps, leur comportement thermique à la fin de fusion est différent.

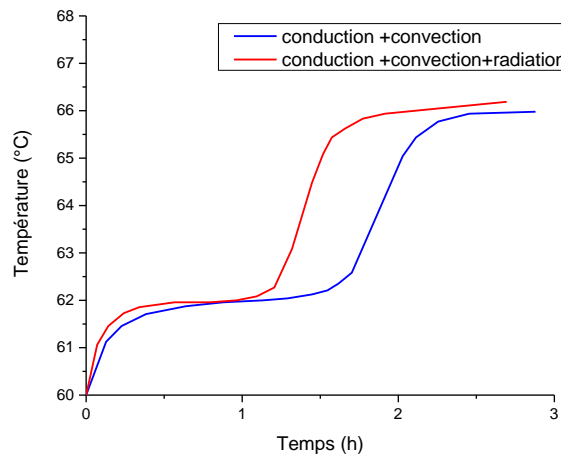


Figure 4. 29 : l'évolution de la température en fonction du temps

A partir de ces résultats, il paraît que le processus de fusion tel qu'il est modélisé n'est pas négligeable à l'échelle globale, résultats tout à fait cohérents avec ce qui est dit précédemment. Ainsi l'impact de radiation sur le transfert thermique n'est pas négligeable.

4.10. ÉTUDE NUMÉRIQUE DU MCP ENCAPSULE EN 3D

Pour exploiter le potentiel de stockage des MCP, une étude numérique de MCP encapsulé en 3D est effectuée pour un système sphérique et cylindrique d'un MCP RT27. Cette étude nous permet de suivre l'évolution de la variation du volume induite par le changement de phase, ce qui nous permettra de rendre compte la masse associée dans le système.

Les figures 4.30 et 4.31 montrent la répartition de la densité et l'emplacement des interfaces liquide-solide au cours du temps. Là encore notre modèle reproduit bien les résultats de simulation précédente.

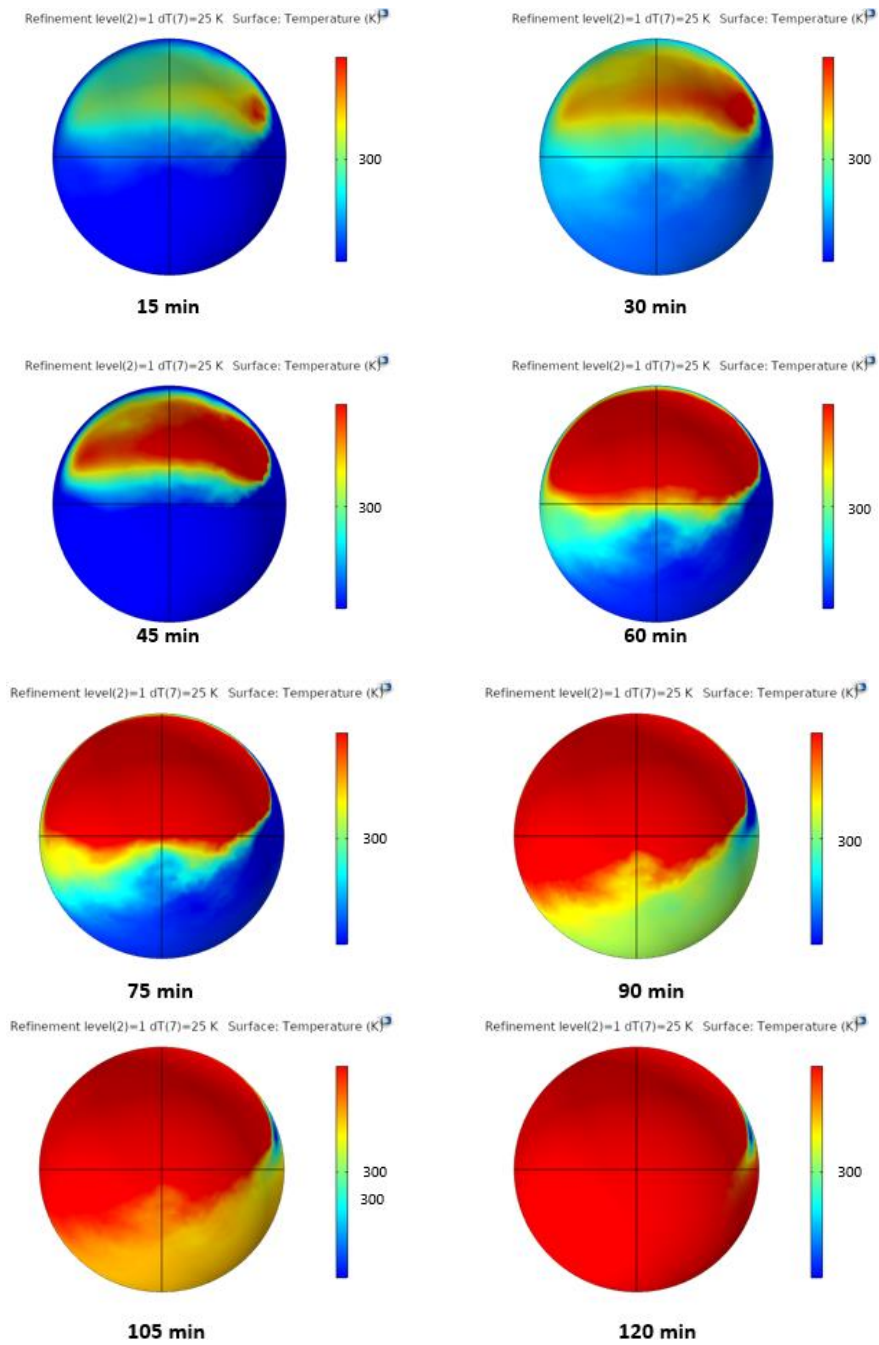


Figure 4. 30 : Répartition de la densité et emplacement des interfaces liquide / solide

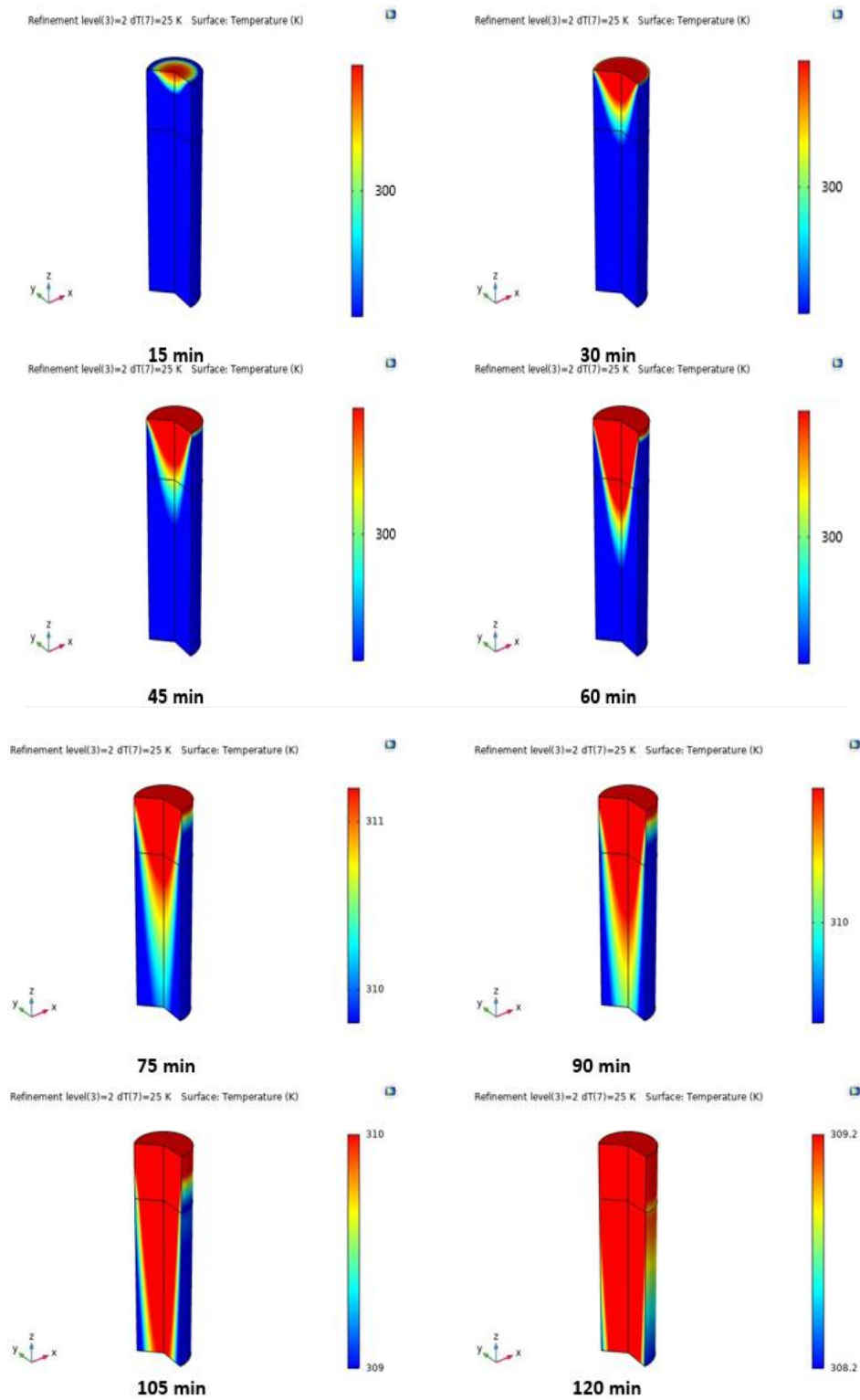


Figure 4. 31 : Répartition de la densité et emplacement des interfaces liquide / solide

4.11. CONCLUSION

Nous avons obtenu pour le modèle développé des résultats satisfaisants en termes d'approximation de la fraction liquide ainsi que de positionnement du front de fusion et du stockage d'énergie par les trois modes de transfert. Cela nous incite à penser que notre approche et nos hypothèses étaient bien choisis car ce sont elles qui ont permis de trouver ces résultats globalement positifs. Il est à noter aussi que notre modèle permet d'obtenir des résultats complets de la zone liquide. Enfin, il nous semble indispensable de rappeler que ce modèle pourrait être rapidement implanté dans un code faisant de la conduction, de la convection et du rayonnement, ce qui représente un intérêt non négligeable vu le coup du développement ou d'achat d'un code de type CFD complet.

De plus, le couplage du champ thermique en tenant compte de la radiation et de champ fluide via l'équation de Navier-stokes présente des résultats en bonnes concordances avec les résultats expérimentaux. Les résultats montrent clairement que la modélisation du comportement thermodynamique du MCP corrèle bien avec les résultats expérimentaux. L'étude de la conductivité thermique nous a permis de montrer que l'ajout du métal aluminium au composite MCP améliore le potentiel thermique, ces ordres de grandeur ont été estimés à partir des résultats de charge et de décharge.

D'autre part, une simulation a été réalisée avec le logiciel ANSYS FLUENT avec un maillage bien structuré et adapté à la géométrie. Les résultats numériques décrivent le comportement réel du MCP en changement de phase. Ainsi, l'étude proposée montre que le système MCP permet de stocker des grandes quantités d'énergie dans un temps plus réduit par rapport aux autres systèmes proposés précédemment. L'étude numérique se focalise sur le changement de phase dans les diverses géométries (rectangle, triangle) en prenant compte les différents modes de transferts de chaleur. En définitif, il apparaît que les résultats numériques et expérimentaux sont cohérents. Ainsi le modèle envisagé est plus approprié pour le transfert thermique.

Chapitre

CHAPITRE 5 : APPLICATIONS DES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE DANS LES ENERGIES RENOUVELABLES

5.1. INTRODUCTION

L'augmentation continue de la demande de chaleur et d'électricité et les exigences croissantes de confort de vie nécessitent une gestion raisonnable des sources alternatives disponibles pour subvenir au besoin quotidien. Alors, l'énergie solaire est une source d'énergie alternative propre et renouvelable qui peut fournir de l'électricité via les systèmes photovoltaïques et l'énergie thermique via les systèmes thermiques. Cependant, l'inconvénient majeur de l'énergie solaire est sa discontinuité. Pour cette raison, de multiples recherches ont été menées pour améliorer les systèmes solaires en utilisant des matériaux à changement de phase qui renforcent la production et le stockage énergétique. L'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) permet d'optimiser l'efficacité thermique des systèmes énergétiques en raison de l'exploitation efficace et durable du processus de chauffage et de refroidissement.

Dans cette étude, les MCP sont intégrés dans différentes applications solaires comme le chauffe-eau-solaire, les cellules photovoltaïques et la climatisation des bâtiments pour optimiser la production et le stockage d'énergie.

5.2. LE CHAUFFE-EAU SOLAIRE

La production d'eau chaude sanitaire dans le bâtiment nécessite une grande quantité d'énergie. Pour cette raison, l'énergie solaire apparaît comme une solution idéale en utilisant le chauffe-eau solaire [85], [86], c'est un système capable de convertir l'énergie solaire en énergie thermique pour produire de l'eau chaude. Ces dernières années, plusieurs systèmes thermiques sont utilisés pour collecter cette énergie naturelle. Les systèmes solaires thermiques absorbent une grande quantité de l'énergie solaire pendant la journée, mais ils n'ont pas suffisamment de secours (thermique) pour continuer à fonctionner pendant les périodes où il y a peu ou pas de rayonnement solaire. Par conséquent l'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) est un moyen efficace de stocker l'énergie thermique et de réduire la consommation d'énergie [87], [88]. Au surplus, ce sont des matériaux économiques, écologiques et efficaces. Lorsque la température augmente le MCP se fond en absorbant l'énergie solaire sous forme de chaleur latente, et lorsque la température baisse, la chaleur stockée est libérée et par conséquent le MCP devient solide.

En effet, plusieurs études ont été effectuées pour améliorer les performances du chauffe-eau solaire par les matériaux à changement de phase. De cette façon, Nayak et al. [89] ont développé une technologie de stockage d'énergie thermique dans le réservoir sans MCP, cette technologie a stabilisé le système mais, elle n'a pas pu stocker de l'énergie thermique pour l'utiliser en cas de

besoin. En outre, C. Solé [90] a compilé divers types de recherches sur les capteurs solaires et les réservoirs d'énergie thermique utilisés pour les applications solaires thermiques. L'utilisation du MCP dans le ballon d'eau chaude sanitaire améliore ainsi le système thermique et réduit le coût du stockage. L'étude menée par Oro et al. [16] couvrait également le stockage dans des réservoirs solaires intégrés avec MCP, ce qui permet d'utiliser des réservoirs plus petits par rapport aux réservoirs traditionnels plus grands sans réduire l'énergie stockée, ce qui implique un avantage lorsque l'espace est pris en compte. Récemment, Mehmet [91] a conçu un système composé d'un capteur solaire connecté à un ballon de stockage de chaleur latente rempli de MCP encapsulé dans une pompe pour le chauffage des locaux afin d'optimiser le système de stockage. Cependant, aucune étude n'a été réalisée pour améliorer le stockage d'énergie à l'aide de MCP, ce qui était un pas en avant pour améliorer la production et le stockage d'énergie thermique dans les systèmes solaires. Dans ce travail, un système chauffe-eau solaire à base des matériaux à changement de phase visant à améliorer la production thermique et à optimiser le stockage d'énergie thermique a été proposé.

5.2.1. Le prototype du système solaire proposé

Dans cette étude, un système thermique basé sur les matériaux à changement de phase [92] pour la production et le stockage d'énergie thermique est proposé comme c'est illustré par la figure 5.1 ci-dessous :

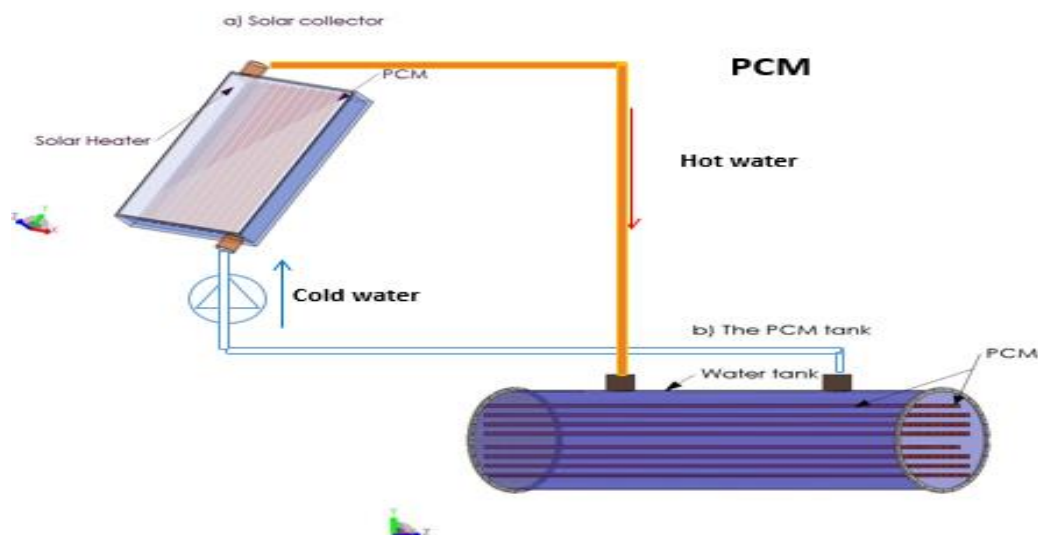


Figure 5. 1: Schéma d'un chauffe-eau solaire en utilisant le MCP

L'efficacité d'un système de chauffe-eau solaire dépend de la taille et du type de panneaux utilisés et de leur positionnement pour maximiser l'absorption du rayonnement solaire. Le système proposé

est inspiré des systèmes de chauffage ultérieurs. Cependant, les systèmes de chauffage peuvent être améliorés si les MCP sont intégrés dans les collecteurs, cela permet d'augmenter et d'accélérer le chauffage d'eau [88], [93], [94] d'une part et d'éviter la surchauffe des collecteurs d'autre part.

Le système solaire proposé dans la figure 5.1 se compose de deux éléments essentiels :

- Le capteur solaire est le composant principal d'un système de chauffage solaire, il peut être choisi comme panneaux solaires plats. Les capteurs collectent l'énergie du soleil, ensuite ils la transforment en chaleur, puis ils transmettent cette énergie thermique à un fluide, soit l'eau ou l'air. À cet égard, le collecteur utilisé dans ce système a deux fonctions, la première fonction est la conversion d'énergie du soleil en énergie thermique, la seconde fonction est le stockage de chaleur dans le MCP, ce qui permet d'accélérer le prochain cycle de chauffage de l'eau domestique.

- Le réservoir MCP est la partie la plus importante du système de chauffage thermique, il est conçu pour stocker la chaleur et la libérer en cas de besoin ou en absence du soleil. De plus, l'utilisation de MCP dans les systèmes permet d'utiliser un volume de réservoirs plus réduit sans réduire l'énergie stockée. Alors, la capacité énergétique est basée sur un processus de stratification thermique selon lequel l'eau chaude se déposera toujours au-dessus de l'eau froide [16].

En fait, ce système vise à soutenir et compléter les systèmes précédents proposés et donc à développer un système parfait et homogène de chauffage et de stockage d'eau.

5.2.2. Le modèle physique

Le transfert de chaleur dans la couche MCP est obtenu par changement de phase. En fait, il existe diverses méthodes de chauffage comme le rayonnement et la conduction. Il a supposé que la variation du volume du MCP pendant le changement de phase était négligeable. De plus, le MCP est isotrope, homogène et les propriétés thermophysiques sont supposées constantes [96]. De cette façon, nous considérons le système décrit dans la figure 5.2.

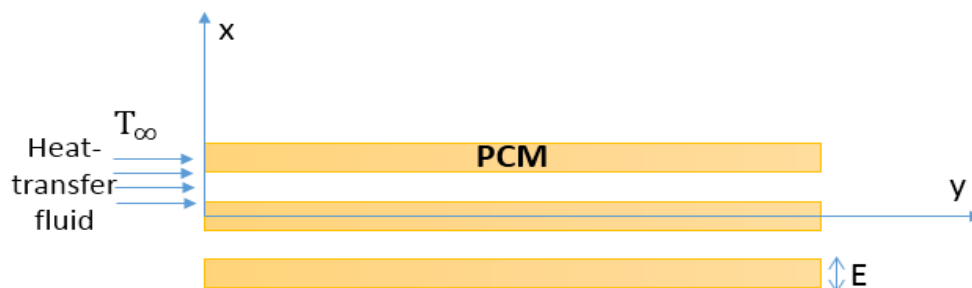


Figure 5. 2: Schéma des MCP à plaques simplifiées

Le système de la figure 5.2 décrit le stockage d'énergie thermique dans les couches MCP d'épaisseur E , qui se fait par la circulation d'eau chaude [97]. A l'inverse, la circulation d'eau froide implique la restitution de l'énergie thermique.

Propriétés thermiques du MCP (RT64HC)	
La masse volumique (Kg/m^3)	≈ 820
La capacité thermique ($\text{KJ}/\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}$)	1.9 (solid) 2 (liquid)
La conductivité thermique ($\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$)	0.2 (solid) 0.2 (liquid)
La température de fusion ($^\circ\text{C}$)	64
Chaleur latente (KJ/Kg)	230

Tableau 5. 1 : Propriétés thermiques du MCP (RT64HC)

L'unité MCP est une plaque rectangulaire [70] remplie de paraffine de longueur $L = 25 \text{ cm}$ et d'épaisseur $E = 6 \text{ cm}$ (figure 5.3).

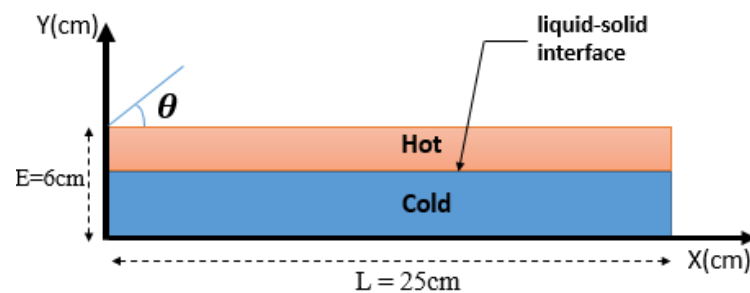


Figure 5. 3: Conception du modèle proposé par MCP

5.2.3. Conditions initiales et aux limites

Les conditions aux limites et la direction de gravité utilisées pour la simulation numérique sont illustrées. En haut et en bas, une paroi adiabatique est définie pour éviter les échanges thermiques entre le MCP et l'air, le domaine d'interface est considéré comme un mur [98].

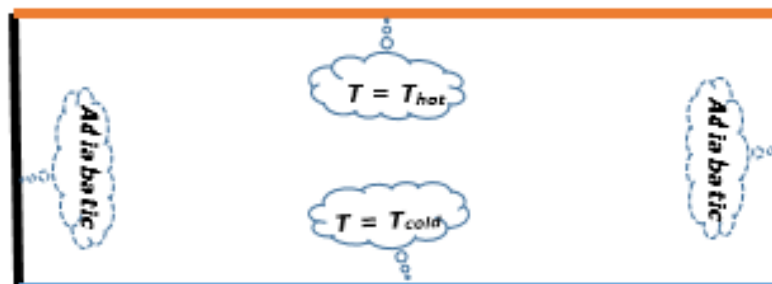


Figure 5. 4: Les conditions aux limites appliquées au MCP.

La condition limite adiabatique a arrêté la dissipation de chaleur qui provient du transfert de chaleur du fluide pendant le processus de charge. On suppose que la surface supérieure de la plaque MCP reçoive une température chaude lorsque celle du bas reçoive une température froide. Les conditions aux limites sont indiquées sur la figure 5.4 [99].

5.2.4. Résultats et discussions

Le système proposé permet de chauffer l'eau selon deux méthodes complémentaires, la première consiste à chauffer l'eau directement par les rayons du soleil et la seconde consiste à chauffer l'eau par le MCP qui est déjà réchauffé. Cette dernière méthode permet d'accélérer la vitesse de chauffage. De plus, le réservoir utilisant le MCP peut stocker plus d'énergie pendant une longue durée. Enfin, la prise en compte de l'angle d'inclinaison permet au capteur de collecter plus d'énergie thermique.

Afin d'améliorer la production et le stockage de l'énergie thermique, une simulation numérique 2D par le logiciel ANSYS FLUENT basée sur une approche en volume fini a été proposée. De plus, la paraffine RT64 est utilisée pour le processus de fusion, car elle a une chaleur latente très élevée et peut être trouvée partout.

En supposant que $x = 0$ à la paroi externe de la plaque, la plaque soit initialement à $T_i = 57^\circ\text{C}$, la température du fluide du transfert de chaleur $T_\infty = 69^\circ\text{C}$. La température de changement de phase de la paraffine $T_f = 64^\circ\text{C}$, le coefficient d'échange thermique [100]: $h = 220\text{W} / \text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ [101].

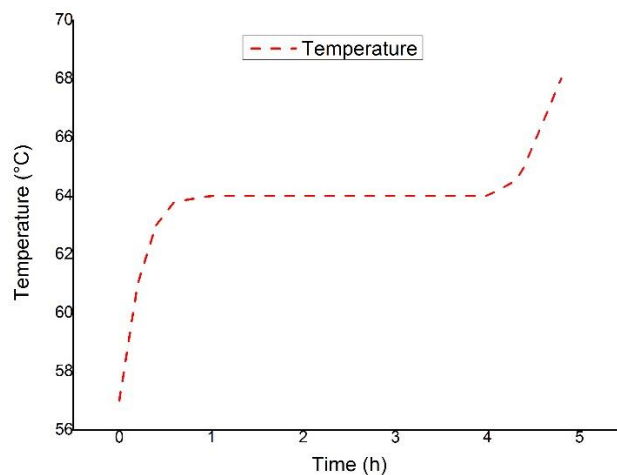


Figure 5. 5: Evolution de la température de MCP en fonction du temps

La figure 5.5 montre l'évolution de la température en fonction du temps. Le MCP est complètement solide à 57°C , après avoir absorbé toute la chaleur sensible entre 57°C et 64°C , la

fusion du MCP commence, puis le matériau devient complètement liquide après 64°C. Par conséquent, le processus de fusion de la paraffine peut être divisé en trois périodes : la première période est le temps nécessaire pour que le MCP atteigne la température de fusion, la seconde est le temps nécessaire pour que le MCP change de phase et la troisième période est le temps requis au MCP pour atteindre la température d'équilibre avec le fluide caloporteur.

Les résultats obtenus montrent que les MCP absorbent des grandes quantités de chaleur, puis la température augmente jusqu'à ce qu'ils atteignent la température de changement de phase (température de fusion). Cependant, le MCP continue d'absorber la chaleur jusqu'à ce que tout le matériau soit converti en phase liquide. En conséquence, la simulation peut décrire le comportement du MCP [102]. Par conséquent, l'enthalpie change en fonction du temps, le système absorbant ou libérant de l'énergie jusqu'à ce que l'état stationnaire soit atteint, comme le montre la figure 5.6 ci-dessous.

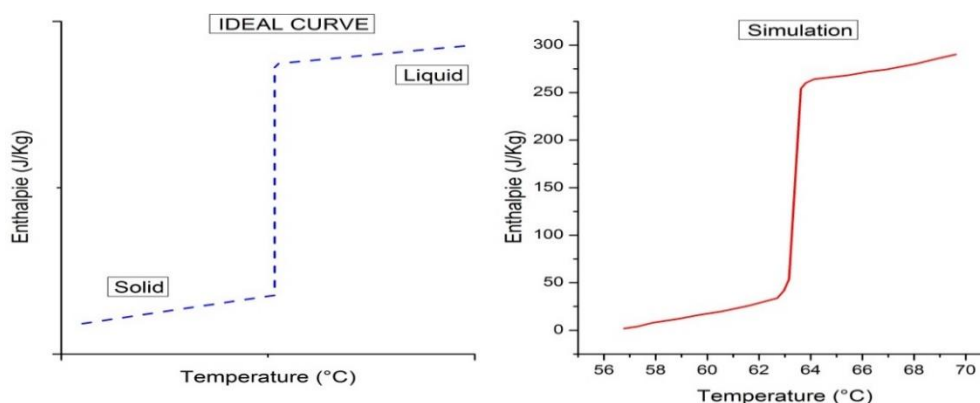


Figure 5. 6 : L'évolution de l'enthalpie H en fonction de la température

La figure 5.6 montre l'évolution de l'enthalpie H en fonction de la température. Par conséquent, la pente des courbes d'enthalpie est très similaire à celle des données de la littérature. Pour le test de chauffage, l'enthalpie et la température sont correctement mesurées. Le changement d'enthalpie total entre 57 ° C et 69 ° C est de 300 J .kg⁻¹. De plus, la courbe est décomposée en trois parties lors du test de chauffage : dans un premier temps, le MCP stocke l'énergie en utilisant une chaleur sensible, puis l'enthalpie augmente rapidement et tous les MCP ont la même température lors du changement de phase, dans ce cas le MCP stocke une grande quantité de chaleur en utilisant la chaleur latente, puis le MCP est complètement liquide.

Les quantités d'énergie utilisant le transfert de chaleur latente impliquées dans le processus de changement de phase sont beaucoup plus importantes que celles impliquées dans le transfert de

chaleur sensible. Il est désormais possible de réduire le volume de stockage et d'augmenter l'énergie stockée dans le même volume de stockage.

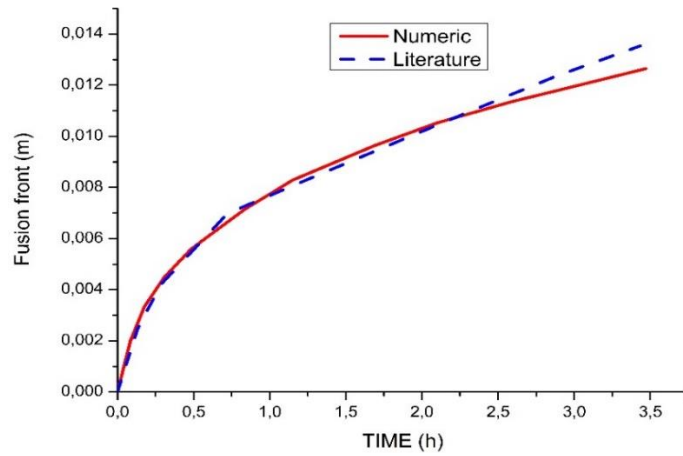


Figure 5. 7 : Evolution de l'interface solide-liquide du collecteur

Sur la figure 5.7, on constate que la fusion change en fonction du temps [101], lorsque la température augmente, la fusion [103] augmente également. Enfin, on en déduit que les solutions numériques et expérimentales de fusion sont en bon accord. La géométrie proposée est une plaque MCP rectangulaire. Celle-ci a une hauteur H et une épaisseur E. Le maillage est de type structuré, ce qui permet d'étudier la fusion du processus MCP. Le modèle géométrique est uniformément maillé à l'aide de cellules carrées symétriques, comme il est illustré à la figure 5.8. Un maillage très fin a été appliqué au MCP rectangulaire 2D. Les éléments sélectionnés sont 1056 et les nœuds sont 1139.

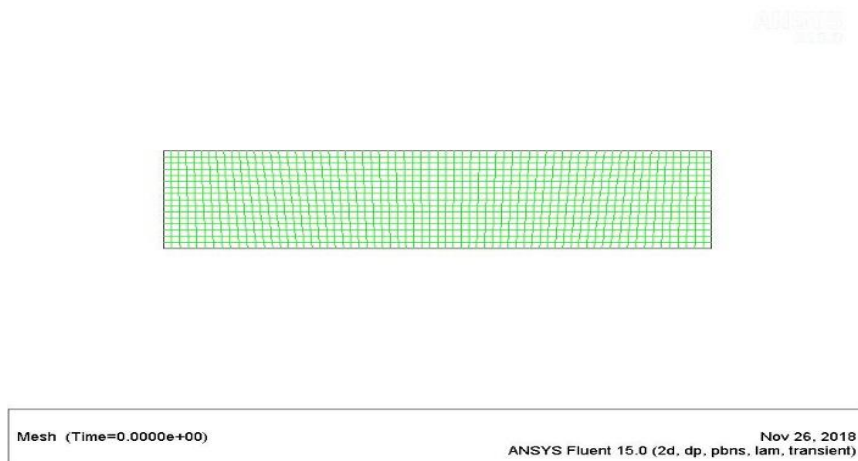


Figure 5. 8 : Géométrie et maillage

Les calculs de convergence sont effectués en utilisant ANSYS (Fluent) 15.0. La convergence de la solution en vérifiant les résidus des équations gouvernantes résolues numériquement est réduite à moins de 10^{-8} , le nombre d'itérations par le pas du temps est réglé à 100 et le pas de temps est

réglé à 1 s. La simulation a été effectuée sur un processeur Intel Core i5 à 2 GHz avec 4 Go de RAM.

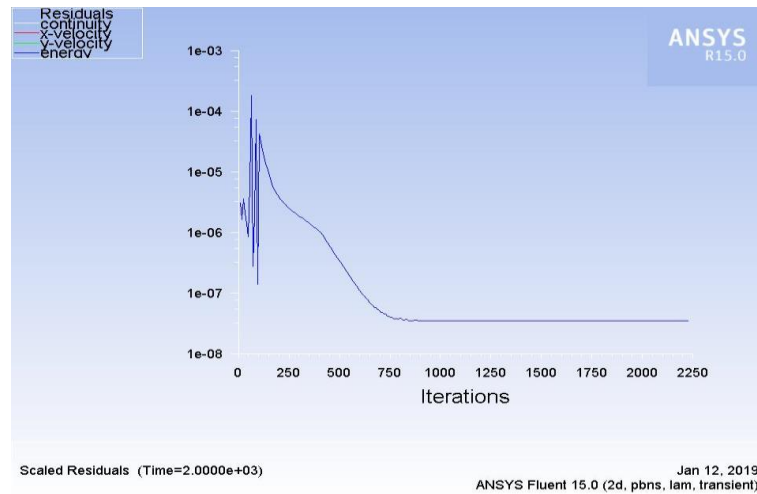


Figure 5. 9 : Courbe de convergence

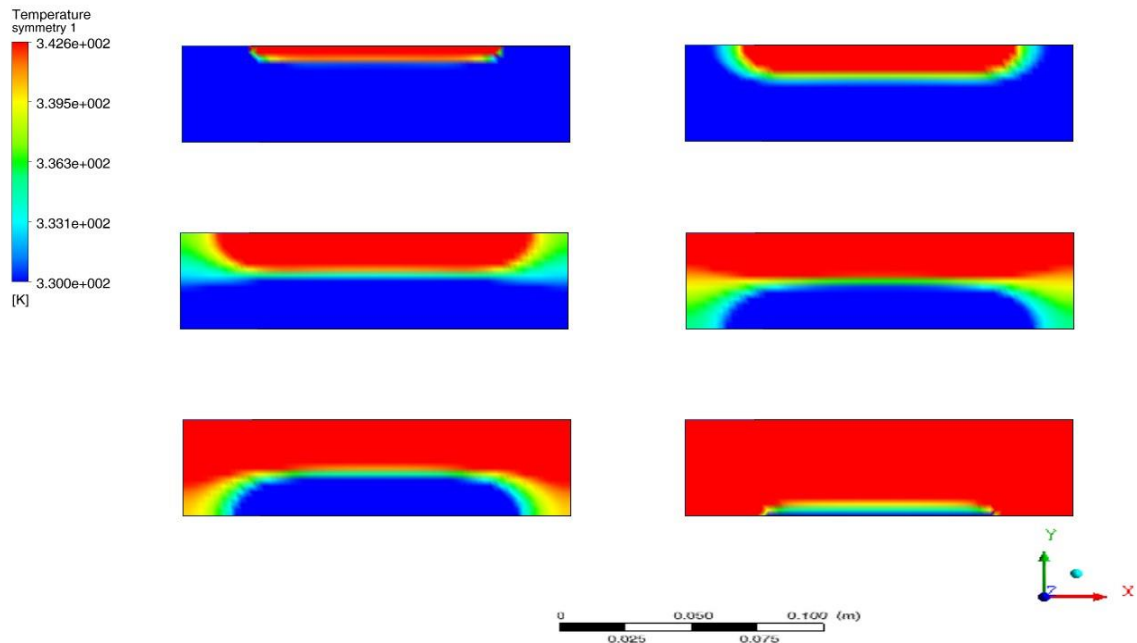


Figure 5. 10 : Evolution temporelle de la fusion MCP dans le collecteur (de haut en bas) (30, 60, 90, 120, 150 et 240 min)

Au départ, le MCP est à l'état solide, lorsque le collecteur et le réservoir absorbent la chaleur alors le MCP démarre le processus de fusion et la chaleur se transmet à travers le MCP par conduction en raison de la différence de température entre la température du système et le MCP, à 30 minutes le MCP absorbe la chaleur (figure 5.10). Ensuite, la chaleur absorbée est utilisée pour le changement de phase de l'état solide à l'état liquide. Puis, pendant la fusion, la convection naturelle et la conduction thermique sont contemporaines dans le système. L'augmentation du processus de fusion augmente la convection naturelle et par conséquent, la moitié du MCP est

fondue environ 90 minutes. La comparaison des résultats de simulation est en bon accord avec les résultats de l'expérience compte tenu de l'aspect du temps de fusion totale et des fractions de fusion détaillées [104]. On pourrait conclure que la méthode numérique valide les résultats pour la description du changement de phase MCP.

De toute évidence l'utilisation de MCP dans les systèmes de chauffe-eau sanitaire permet d'améliorer la production et le stockage d'énergie par rapport à un système sans MCP [105]. De cette façon, une comparaison de la chaleur stockée par trois systèmes (sans MCP, réservoir avec MCP, réservoir et collecteur avec MCP) est effectuée comme il est indiqué sur la figure 5.11 :

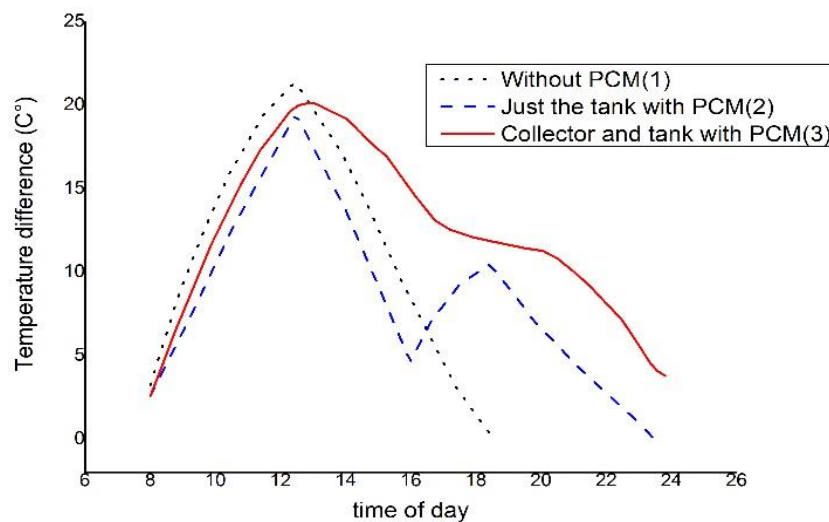


Figure 5. 11 : Comparaison de la différence de température mesurée du système solaire avec et sans MCP

Le résultat de la simulation présenté sur la figure 5.11 révèle les avantages d'intégration du MCP dans le système proposé. C'est la raison pour laquelle le système a une grande quantité d'énergie stockée dans le réservoir d'eau et dans le collecteur, ce qui permet de stabiliser la chaleur par rapport aux autres systèmes, il est encore plus productif qu'un système sans MCP ou encore mieux qu'un système avec MCP dans le réservoir [102]. De plus, le MCP peut améliorer les performances du système (protection du capteur solaire contre la surchauffe) et réduire la consommation d'énergie plus longtemps par rapport au système sans MCP.

Pour mieux comprendre l'ensemble du processus thermique, il est proposé d'analyser le réservoir, la quantité d'énergie stockée et le temps de stockage. Par conséquent, une étude numérique a été effectuée pour la comparaison du système proposé avec le MCP et le système sans MCP [106] et pour décrire le processus du chauffage et du refroidissement après 1000 W de stockage thermique [91], comme le montre la figure 5.12:

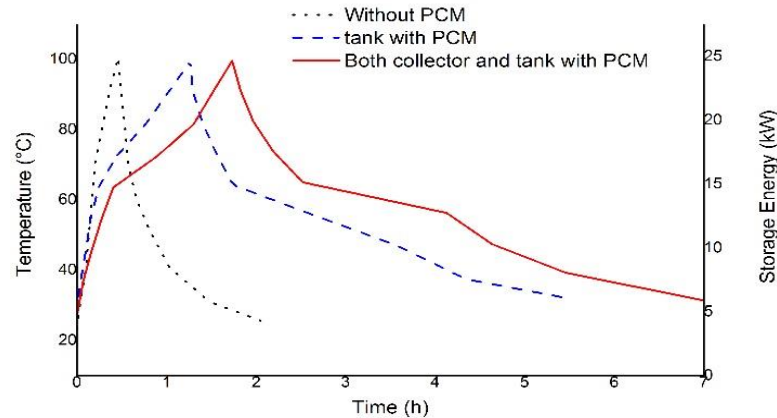


Figure 5. 12 : Stockage de l'énergie thermique en fonction du temps et de température

On peut voir sur la figure 5.12 que la température du système solaire sans MCP augmente rapidement que le système avec MCP. Cependant, l'énergie stockée dans le système proposé est plus stable que le système sans MCP et le système avec MCP juste dans le réservoir. À cet égard, le temps nécessaire à la décharge de l'énergie thermique stockée est respectivement de 1,74 h, 3,63 h et 4,55 h pour le boîtier sans MCP, avec MCP dans le réservoir et avec MCP dans le réservoir et le collecteur [102].

Le système proposé est capable de stocker de l'énergie dans le collecteur et dans le réservoir, c'est la raison pour laquelle le système sans MCP atteint l'énergie plus rapidement que le système proposé. Par conséquent, le fonctionnement global du système de chauffage peut accélérer le chauffage, par exemple si le réservoir est épuisé, le collecteur chauffe l'eau rapidement en utilisant l'énergie stockée dans le MCP et en utilisant l'énergie provenant du soleil.

De plus, les performances du capteur solaire peuvent être améliorées si l'effet d'angle d'inclinaison est amélioré. Pour cette raison, l'évolution de la fraction liquide en fonction du temps pour différentes valeurs d'angle d'inclinaison Θ (0° à 90°) a été étudiée [107] comme le montre la figure 5.13 ci-dessous :

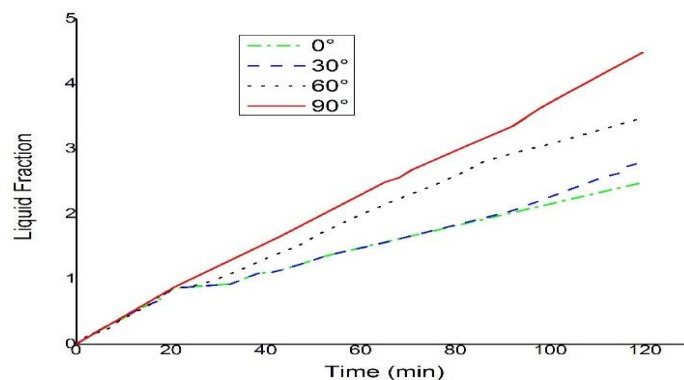


Figure 5. 13 : Évolution de la fraction liquide en fonction du temps pour différentes valeurs de Θ

La figure 5.13 montre que l'inclinaison de la plaque MCP influe sur la fraction liquide, lorsque l'angle d'inclinaison est supérieur à 45° , la fraction liquide devient importante, contrairement à l'inclinaison inférieure à 45° , elle reste négligeable.

Les résultats numériques sont beaucoup plus proches de la solution expérimentale lors du processus du chargement et du déchargement de la paraffine. Par conséquent, un bon accord entre la modélisation et l'expérience est obtenu.

5.2.5. Conclusion

Le MCP est un matériau qui stocke des grandes quantités de chaleur pour les utiliser au besoin. Dans cette étude, le MCP a deux fonctions l'une complète l'autre ; la première consiste à stocker l'énergie thermique et la seconde consiste à accélérer la vitesse de chauffage par la chaleur précédemment stockée. Ce système est capable de renforcer et de compléter les systèmes proposés précédemment et donc de développer un système parfait et homogène.

La géométrie choisie est une plaque rectangulaire qui a été modélisée par la méthode enthalpique en considérant les conditions aux limites du système proposé, ensuite les résultats obtenus sont comparés aux résultats de la littérature. Les courbes obtenues en fonction du temps sont prometteuses, car elles prennent un temps raisonnable pour la fusion et le stockage d'énergie, et par conséquent, les prochains cycles de fusion-solidification sont plus rapides, car la température ambiante est augmentée. Par conséquent, le transfert d'énergie est plus rapide.

Pour que les résultats soient plus précis, une simulation par le logiciel ANSYS a été faite par un maillage bien structuré et adapté à la géométrie, les résultats numériques sont similaires aux résultats expérimentaux. Pour augmenter l'efficacité de ce système, l'angle d'inclinaison est pris en compte car plus la cavité est inclinée, plus la fusion s'accélère et la vitesse de fusion augmente. Ce système permet de stocker des grandes quantités d'énergie dans un temps plus réduit par rapport aux autres systèmes proposés précédemment.

5.3. LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES (PV)

Les systèmes photovoltaïques sont des technologies qui convertissent l'énergie solaire en énergie électrique. Cependant, ces systèmes peuvent absorber une quantité limitée du rayonnement solaire incident, le reste est perdu sous forme d'énergie thermique, ce qui augmente la température des cellules photovoltaïques et la perte par effet de joule, et par conséquent la productivité électrique se diminue.

Afin d'améliorer la production d'énergie électrique, un système MCP a été développé ; il permet de maintenir la température des panneaux photovoltaïques en utilisant les matériaux à changement de phase. Ensuite, l'énergie thermique absorbée par les MCP est utilisée pour chauffer l'eau sanitaire.

5.3.1. Introduction

Le soleil est actuellement l'une des plus grandes sources d'énergie verte, il a fait l'objet des recherches approfondies dans la production de chaleur et d'électricité. L'utilisation de l'énergie solaire dans la vie quotidienne peut protéger l'environnement et minimiser les coûts énergétiques. Par conséquent, les cellules photovoltaïques (PV) exploitent l'effet photoélectrique pour produire un courant continu en absorbant le rayonnement. Cet effet permet aux cellules de convertir l'énergie lumineuse des photons en électricité à travers des matériaux semi-conducteurs qui transportent les charges électriques.

Le problème avec ce système est qu'une quantité limitée du rayonnement solaire peut être absorbée, par conséquent l'énergie restante est transformée en chaleur, ce qui affecte la productivité électrique. Habituellement, 15% du rayonnement incident sur un collecteur photovoltaïque est transformé en électricité, le reste soit environ 85% est transformé en chaleur [108]. De cette façon, diverses recherches ont été menées pour mettre à niveau le capteur solaire afin d'augmenter la productivité électrique en améliorant les matériaux, la géométrie et les suiveurs solaires. Néanmoins, le PV absorbe une quantité limitée du rayonnement qui s'est transformée en énergie électrique et le reste du rayonnement est converti en chaleur, ce qui permet de réduire l'efficacité du système. En réponse à ce défi, Moharram [109] a développé un système de refroidissement sur la base des exigences de pulvérisation d'eau. Le système vise à minimiser la quantité d'eau et d'énergie électrique nécessaire pour refroidir les panneaux solaires.

Récemment, de nombreuses études ont utilisé les matériaux à changement de phase (MCP) pour atteindre une température constante dans les panneaux solaires. Les matériaux à changement de phase ont une grande capacité d'absorption de l'énergie sous forme de chaleur latente. Hajjaj [110] a formulé un moyen qui permet d'établir des conditions de refroidissement optimales pour les modules PV. Biwole [111] améliore le système de panneaux en utilisant le MCP pour maintenir la température PV proche de la température ambiante. Récemment, Abdelrahman [112] a mené une étude paramétrique pour réduire la température du module PV en ajoutant des nanoparticules MCP qui absorbent l'énergie thermique. Cependant, la température du MCP augmente après le changement de phase, ainsi la température du système PV est augmentée. Pourtant, il faudra sûrement un certain temps pour que le MCP soit saturé. Par conséquent, la nouveauté de notre travail est de bénéficier de l'énergie thermique absorbée pour produire de l'eau chaude et maintenir la température PV constante tout au long de la journée.

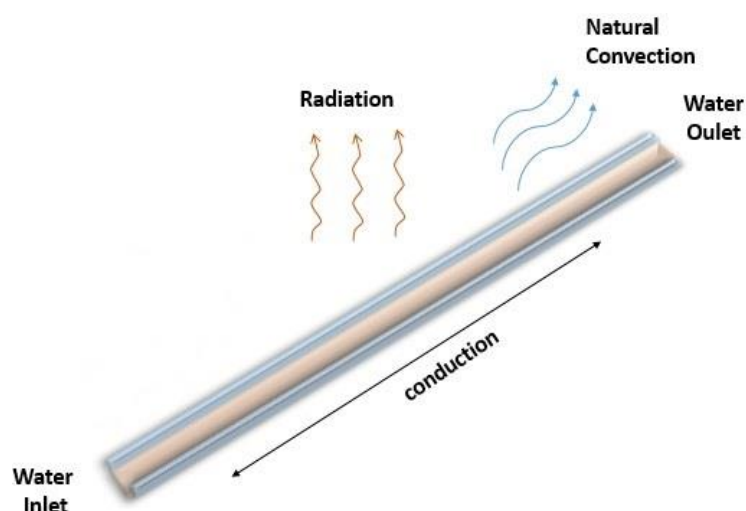


Figure 5. 14 : Transfert de chaleur dans le capteur solaire

Dans les dernières années, de nombreux chercheurs ont utilisé des matériaux à changement de phase (MCP) pour atteindre une température constante dans les panneaux solaires. Les MCP sont des matériaux qui ont une grande capacité de stockage d'énergie sous forme de chaleur latente. Un MCP change de phase, c'est-à-dire il devient liquide en absorbant la chaleur de l'atmosphère ambiante, et lorsque la température baisse, il devient solide par la libération de la chaleur stockée. Hajjaj [110] a proposé une loi qui permet d'établir des conditions de refroidissement optimales pour les modules PV. Rahul [111] a amélioré l'efficacité des cellules en réduisant la température et en utilisant l'énergie thermique supplémentaire générée à l'arrière des panneaux solaires à des fins différentes. Biwole [111] a étudié l'utilisation de MCP pour atteindre une température proche de la température ambiante dans les panneaux.

Dans cette étude, une nouvelle conception de capteur solaire vise à améliorer la production de l'énergie électrique dans le système PV par l'absorption de l'énergie thermique. Cette énergie peut être exploitée pour produire l'eau chaude. Pour cette raison, une modélisation mathématique a été réalisée qui vise à intégrer le MCP dans le système PV pour absorber l'énergie thermique et maintenir la température de PV. Ensuite, une étude numérique a été proposée pour valider le modèle proposé qui décrit l'évolution de la production d'énergie électrique et d'énergie thermique dans le système en intégrant le MCP dans le système. Ces matériaux peuvent absorber la température du système, puis transformer l'énergie acquise pour chauffer l'eau du bâtiment. Les résultats obtenus ont été comparés à la littérature, ce qui montre un bon accord et une amélioration significative de la production d'électricité.

5.3.2. Configuration de la méthodologie

Dans cette étude, les matériaux à changement de phase ont été intégrés dans le système photovoltaïque [5] afin d'améliorer la production d'électricité en absorbant la chaleur. L'énergie absorbée est utilisée pour générer et stocker de l'eau chaude, comme le montre la Figure 5. 15 ci-dessous



Figure 5. 15 : le système hybride thermo-photovoltaïque

Le système solaire est composé de :

- Le capteur hybride thermo-photovoltaïque est la partie principale du système solaire, il a deux utilités : L'une est la transformation de l'énergie du soleil en énergie électrique et l'autre est la transmission de l'énergie thermique du soleil au MCP. Ensuite, le MCP absorbe et stocke cette énergie sous forme de chaleur pour fournir de l'eau chaude.

-Le réservoir MCP est une partie très importante qui stocke l'énergie thermique selon les besoins. En outre, le volume des réservoirs peut être réduit en utilisant des MCP sans diminuer l'énergie stockée. Le système proposé est une amélioration des systèmes précédents ; il complète les capteurs photovoltaïques afin d'augmenter la production d'énergie électrique en utilisant le MCP pour diminuer l'effet négatif de la lumière solaire en absorbant l'énergie thermique. Cette dernière peut être utilisée pour chauffer l'eau chaude.

5.3.3. Le modèle physique

Le système PV est attaché aux plaques de MCP qui absorbent l'énergie thermique du panneau PV provenant de la lumière du soleil. En conséquence, le panneau PV a maintenu une température stable due à l'absorption de la chaleur par la plaque MCP. Le matériau continue d'absorber l'énergie thermique jusqu'à ce qu'il change de phase. L'énergie thermique est transférée entre le PV et le MCP par différents modes de transfert de chaleur, les plus efficaces sont la conduction et le rayonnement, plus tard, la convection naturelle apparaît lors de la phase de fusion dans le MCP. Il a été supposé que le volume du MCP est constant tout au long du changement de phase. Par ailleurs, les paramètres thermo-physiques du MCP sont constants, homogènes et isotropes [96]. En conséquence, le système peut être décrit comme indiqué sur la Figure 5. 16 :



Figure 5. 16 : Présentation du système PV / MCP, conditions aux limites et géométrie

La plaque MCP est de forme rectangulaire remplie de paraffine de longueur $L = 1,5$ m et de largeur $l = 0,1$ m.

5.3.4. Conditions initiales et aux limites

Les conditions aux limites considèrent que les parois externes sont adiabatiques pour éviter l'échange de chaleur entre le MCP et l'air. On suppose que la surface supérieure de la plaque MCP reçoit une température chaude lorsque les surfaces inférieures reçoivent une température froide. De plus, avons utilisé les conditions aux limites suivantes :

- Le MCP est en contact direct avec le PV.
- La température du système PV / MCP est de même température.

5.3.5. Résultats et discussions

Le système d'énergie solaire proposé vise à améliorer la production d'énergie électrique à l'aide d'un matériau à changement de phase (MCP), ce qui permet de réduire l'augmentation des températures indésirables, ces dernières peuvent être utilisées pour chauffer l'eau. Pour cette raison, une étude numérique a été utilisée pour obtenir les résultats en fonction de l'enthalpie, de la température, du temps, de l'énergie stockée et de l'évolution de la fusion. Pour valider l'étude numérique, une comparaison de la température prédite dans la simulation numérique avec les résultats expérimentaux a été réalisée. Afin de valider l'étude proposée, le modèle a été implémenté dans la plateforme Matlab. Les propriétés et les paramètres des matériaux utilisés dans la simulation sont présentés dans le tableau 5.2 ci-dessous :

propriétés	Unité	RT35	Air	Aluminium
La chaleur spécifique	(J/Kg.K)	2000	1004	871
La conductivité thermique	(W/m.K)	0.22	0.0242	202.4
La masse volumique	(kg/m ³)	880	1.22	2719
Température du liquide	(°C)	34-36	-	-
température du solide	(°C)	36-34	-	-
Chaleur de fusion	(J/kg)	240	-	-

Tableau 5. 2 : Spécifications de l'aluminium, de l'air et de la paraffine [113]

Les résultats obtenus montrent que le MCP absorbe l'énergie thermique du système PV, par conséquent la température diminue par rapport au système sans MCP (Figure 5. 17).

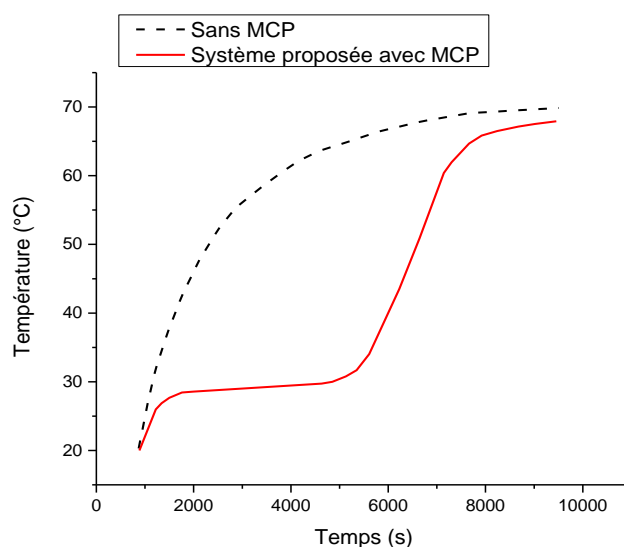


Figure 5. 17 : variation de température en fonction du temps

La figure 5. 17 montre l'évolution de la température en fonction du temps pour un système sans MCP et notre système avec MCP. Par conséquent, on peut remarquer que la température du photovoltaïque sans MCP augmente continuellement au cours du temps. À l'opposé, la température du système avec une couche MCP reste stable à une température environ 29 ° C pendant la moitié de la période d'étude.

Pendant le jour, le soleil fournit de la chaleur ainsi que de la radiation, qui est une quantité importante d'énergie qui peut être atteinte à environ 1200 W / m². Dans cette étude, les mesures sont prises dans une journée ensoleillée standard comme le montre la Figure 5. 18 :

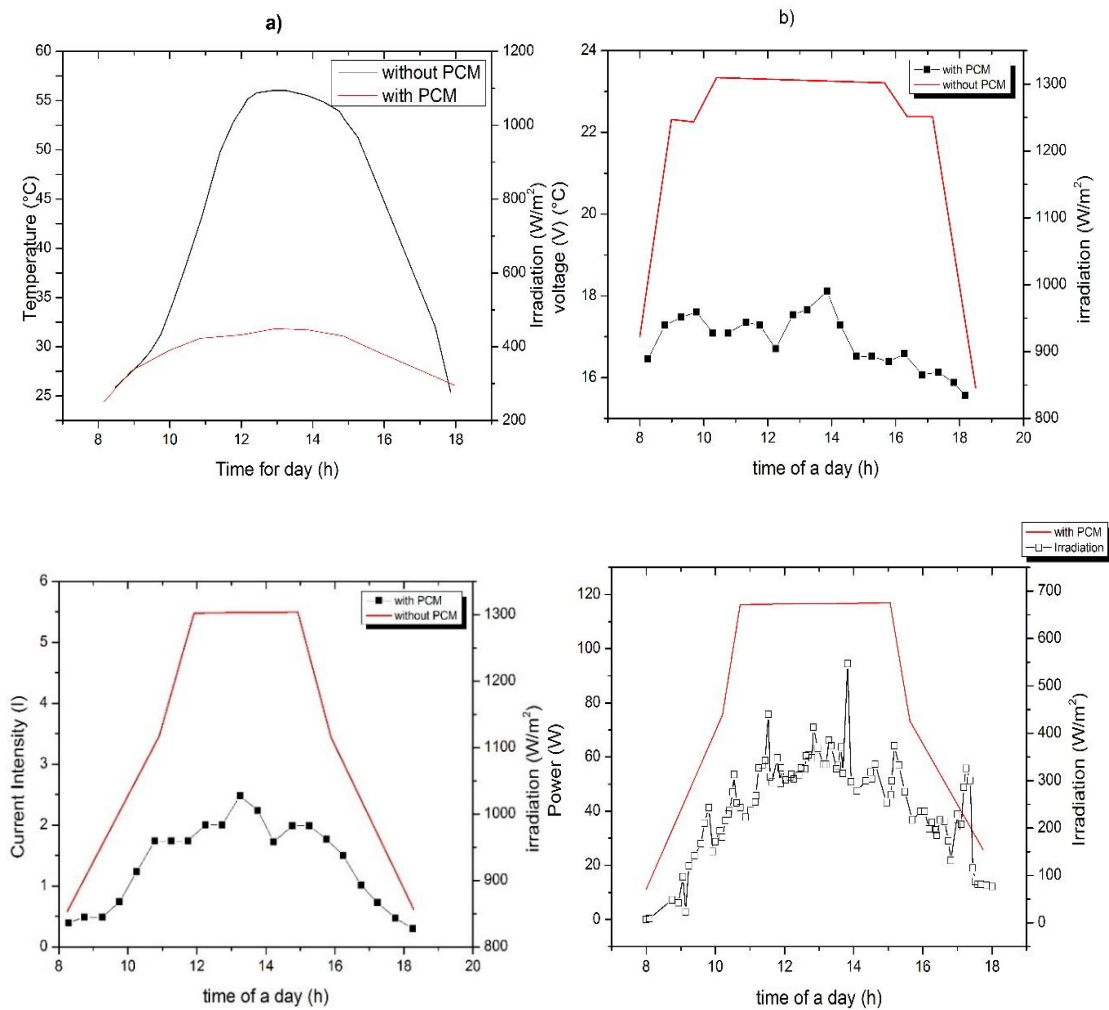


Figure 5. 18 : L'évolution de l'irradiation en fonction

(a) la température (b) la tension (c) l'intensité du courant (d) la puissance durant une journée ensoleillée

Figure 5.18.a. montre l'évolution de l'irradiation par rapport à la température du système solaire au cours de la journée avec et sans MCP. On peut remarquer que la température du système photovoltaïque sans MCP augmente progressivement jusqu'à ce qu'elle atteigne 57°C, contrairement à la température du système utilisant la couche MCP qui se stabilise environ à 29°C

durant toute la journée. On peut conclure que le MCP absorbe l'énergie thermique qui affecte le système photovoltaïque, ce qui permet de stabiliser la température du système photovoltaïque.

La Fig5.18.b montre la variation de la tension générée par le système PV en fonction du rayonnement solaire pendant une journée. Il a été observé que même l'irradiation est maximale, la tension générée par le système PV est limitée dans le système sans MCP, à cause de l'effet thermique qui affecte le fonctionnement de système. A l'inverse, l'intégration de MCP dans le système photovoltaïque augmente la tension générée au fur et à mesure que l'irradiation s'augmente. On peut conclure que le fonctionnement du système s'améliore grâce au MCP qui absorbe l'énergie thermique qui affecte le système.

La Fig5.18.c montre le courant généré dans le système PV en fonction de l'irradiation solaire pendant une journée. Il a été observé que le courant augmente avec l'augmentation de l'irradiation dans le système utilisant le MCP. À l'inverse, la génération du courant est limitée dans le système solaire sans MCP à cause de l'augmentation de l'effet thermique dans le système PV.

La Fig5.18.d montre la productivité électrique du système testé. Il a été déduit que l'énergie électrique a été améliorée grâce au MCP qui extrait l'énergie thermique durant la journée.

D'autre part, la stabilisation de la température augmente l'efficacité électrique et la production thermique du système PV/MCP comme l'illustre la figure. 5.19 :

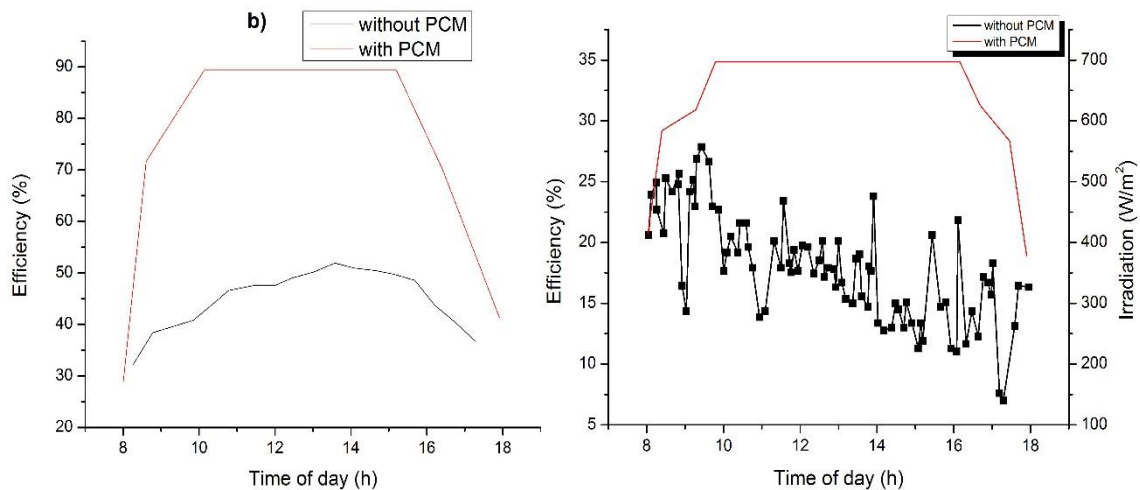


Figure 5. 19 : a) performances électriques durant la journée, b) performances thermiques durant la journée

La Figure 5. 19. a. montre l'évolution des performances électriques du système photovoltaïque au cours du temps. On observe une augmentation de l'efficacité du système PV avec MCP durant une journée ensoleillée par rapport au système sans MCP. Alors, l'intégration du MCP dans le

système photovoltaïque augmente l'efficacité du système, ce qui permet d'améliorer la production d'électricité.

La Figure 5. 19. b montre l'évolution de l'efficacité thermique du système au cours du temps. On peut observer que l'énergie thermique produite a augmenté au fur et à mesure avec l'irradiation. Alors, on a conclu que la température dans le système a diminué à cause de l'intégration du MCP dans le système PV, ce qui améliore la production électrique.

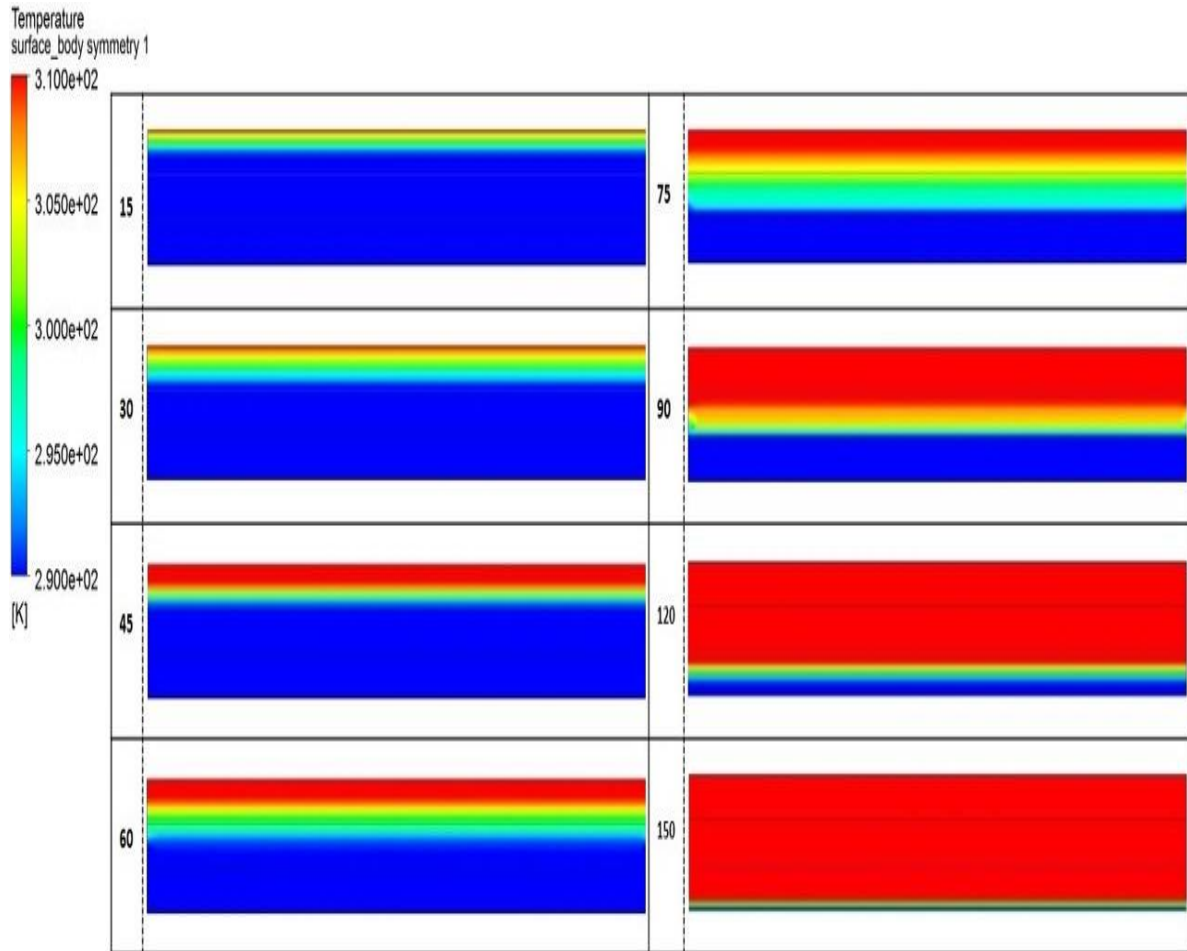


Figure 5. 20 : L'évolution thermique de la fusion MCP en fonction du temps
Dans le système solaire (15, 30, 45, 60, 75, 90, 120, 150 min)

Afin d'améliorer l'étude proposée, une étude numérique en utilisant la méthode des volumes finis (FVM) à l'aide du logiciel ANSYS FLUENT a été réalisée [114], [115]. En outre, la méthode PRESTO est utilisée pour le mode de rétention et la méthode SIMPLEC est utilisée pour le couplage pression-vitesse, les paramètres de sous-relaxation, les paramètres de contrôle et les autres paramètres sont tous des paramètres par défaut.

En supposant que $x = 0$ au niveau de la paroi externe de la plaque, la température initiale de la plaque est égale $T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, la température du fluide du transfert thermique $T_\infty = 60 \text{ }^\circ\text{C}$. La température du changement de phase de la paraffine est égale $T_f = 35 \text{ }^\circ\text{C}$.

Au début de la journée, la température du système PV est ambiante et le MCP sous forme solide. Ensuite, la température du PV augmente, par conséquent la chaleur est transmise à la plaque MCP par conduction en raison de la différence de la température entre le PV et le MCP, puis la température du MCP augmente progressivement et par conséquent, le MCP commence le processus de fusion. Après 75 min, le système PV est thermiquement stable à une température de $35 \text{ }^\circ\text{C}$, tandis que plus de la moitié du MCP est liquéfié, par conséquent la convection naturelle domine dans la partie liquide. A 150 min, le MCP change totalement de phase et transmet l'énergie thermique acquise à l'eau comme le montre la figure 5. 20. Enfin, la température du système est stable à l'équilibre et plus la température est élevée, plus l'eau devient chaude.

Conclusion

Dans cette étude, une nouvelle ingénierie d'un système photovoltaïque intégrant le MCP vise à améliorer la production électrique en absorbant l'énergie thermique, cette dernière a été exploitée pour chauffer l'eau sanitaire du bâtiment. Le système proposé est principalement conçu pour améliorer la production d'électricité. Cependant, il peut évidemment produire et stocker de l'énergie thermique. On peut conclure que le système PV a deux fonctions : la première fonction est de convertir l'énergie solaire en énergie électrique et thermique, la deuxième est de stocker l'énergie thermique. La modélisation mathématique décrit correctement le comportement MCP qui s'est adapté au système solaire. Pour vérifier le modèle, une comparaison de la température prédite dans la simulation numérique avec la littérature est effectuée. Ensuite, les résultats numériques montrent que l'intégration de MCP peut réduire la température photovoltaïque, ce qui améliore les performances PV. Enfin, l'énergie thermique absorbée par le MCP a été transformée pour chauffer l'eau. Les résultats obtenus sont en bon accord avec ceux de la littérature.

5.4. INTEGRATION DU MCP DANS LE BATIMENT

5.4.1. Introduction

L'intégration de MCP dans les bâtiments permet de stabiliser la température au sein du bâtiment en réduisant la consommation d'énergie. En effet, les matériaux à changement de phase peuvent être utilisés dans la construction des nouveaux bâtiments pour renforcer leur inertie thermique. Cependant, les MCP doivent être intégrés dans les bâtiments dès le début de construction. Par conséquent, il sera difficile d'incorporer les MCP après la finition de construction.

Ces dernières années les MCP sont intégrés dans les produits de construction pour limiter le recours à la climatisation en utilisant leurs propriétés, à savoir leur capacité à se liquéfier en absorbant les calories de l'atmosphère ambiante et à les restituer lorsque la température baisse. Ils maintiennent cette température dans la plage du confort et réduisent la consommation d'énergie. De cette manière, de nombreuses études ont utilisé les matériaux à changement de phase (MCP) pour maintenir la température proche du confort dans les bâtiments. Récemment, Saxena [116] a mené une étude expérimentale qui utilisait des MCP pour la conservation de l'énergie dans les bâtiments en raison de leurs grandes capacités de stockage de chaleur dans les conditions climatiques en réduisant la fluctuation de température. Rymes a analysé la faisabilité de l'utilisation de MCP dans plusieurs applications du bâtiment en utilisant le MCP disponible dans le commerce pour augmenter la capacité de stockage d'énergie thermique de la structure du bâtiment. Dernièrement, Rathore [117] a suggéré un MCP macro-encapsulé incorporé aux structures du bâtiment qui augmente la conservation de l'énergie en régulant la température intérieure. Dans certaines études antérieures, La plaque MCP était située sur la face intérieure du mur et dans certains d'entre eux, le panneau était défini comme une couche intermédiaire du mur [118]. Cependant, il a été démontré que l'emplacement le plus efficace de la plaque de plâtre dépend des paramètres tels que l'épaisseur de la couche et les propriétés thermiques du MCP utilisé. Il existe plusieurs méthodes d'utilisation des MCP : soit par incorporation directe dans les matériaux de construction (plâtre, béton, etc.) soit sous forme de plaques (plaque Energain). Cependant, l'utilisation du MCP rencontre plusieurs difficultés, malgré les progrès significatifs dans les recherches et la conception. La plupart du temps, certains facteurs ont été négligés qui affectent directement ce phénomène tel que les modes de transfert de chaleur et l'ingénierie. Néanmoins, l'efficacité de la production d'énergie thermique pourrait être meilleure si deux catégories

dissemblables et complémentaires de MCP étaient utilisées en tenant en compte les différents modes de transfert de chaleur et de la géométrie optimale.

Afin d'améliorer l'efficacité énergétique dans les systèmes du bâtiment, une étude numérique a été réalisée ; elle présente un système de stockage sous la forme d'une géométrie rectangulaire combinant deux types triangulaires de MCP. Ces deux MCP ont des températures de fusion différentes. En outre, la modélisation thermomécanique étudie le transfert de chaleur d'une géométrie triangulaire pour les deux types de MCP, ce qui augmente la capacité de stockage et de production d'énergie thermique dans les systèmes de bâtiment à base de MCP. Par conséquent, l'étude numérique montre une amélioration significative de la prédiction du comportement thermique dans les systèmes thermiques et montre aussi une réduction importante du temps de production et de stockage d'environ 10%.

5.4.2. Le modèle physique

Dans cette partie, l'étude se focalise sur la modélisation des phénomènes physiques dans la zone intérieure et extérieure du MCP. Les équations gouvernantes qui décrivent la relation entre les modes de transfert de chaleur et les équations de Navier-Stokes ont été adaptées au système MCP. Les simplifications et les hypothèses concernant les caractéristiques thermophysiques du MCP compte tenu des modes de transfert de chaleur sont présentées ainsi que les conditions aux limites. La résolution de la modélisation couplée a été utilisée pour démontrer comment la température, l'enthalpie et le temps de fusion sont liés. Dans cette recherche, le MCP utilisé est la paraffine en raison de sa plage de température de fusion, des caractéristiques thermochimiques stables et du coût raisonnable. De plus, à partir de la forme triangulaire, diverses formes peuvent être obtenues comme le rectangle et le parallélogramme.

On suppose que la variation du volume de matière pendant le changement de phase soit négligeable, le MCP est isotrope et homogène. De plus, les caractéristiques thermophysiques sont supposées stables et constantes. De cette manière, le système décrit sur la figure 5. 21 est considéré :

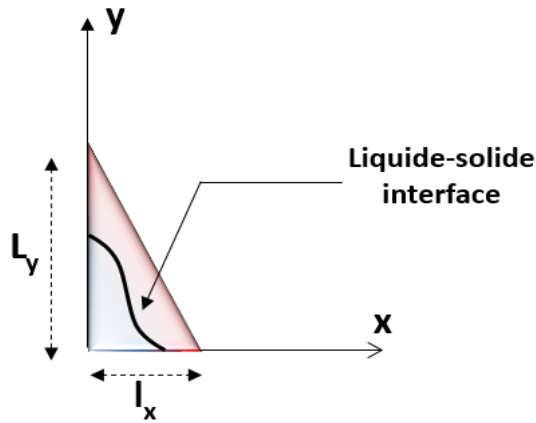


Figure 5. 21 : Conditions aux limites dans la plaque MCP

Le système de la figure 5. 21 décrit les conditions aux limites pour le stockage thermique dans la couche MCP avec la largeur (l_x) et la hauteur (l_y). Pour étudier l'interaction fluide caloporteur-MCP à l'intérieur d'une cavité triangulaire, en régime stationnaire, il a été proposé que la surface supérieure reçoive la température chaude et la face inférieure reçoive la température froide, l'autre côté est supposé adiabatique.

5.4.3. Résultats et discussions

Afin d'améliorer l'efficacité énergétique dans les systèmes MCP par l'augmentation de la capacité de stockage et de production, une étude numérique vise à combiner deux types de MCP ayant des températures de fusion différentes. De plus, la modélisation prend en compte les modes de transfert de chaleur et la géométrie optimale pour analyser le problème avec précision, car chaque source de chaleur est une énergie supplémentaire qu'il fallait prendre en compte.

Afin de vérifier la validité du modèle thermique, des simulations numériques ont été réalisées. Alors, la configuration des caractéristiques du modèle numérique est donnée dans le tableau 5.3.

Propriétés	RT21	RT28	Aluminium	Air
Densité (kg/m^3)	880	880	2719	1.22
Capacité Spécifique (J/kg.K)	2000	2000	871	1006.43
Conductivité Thermique (W/m.K)	0.2	0.2	202.4	0.0242
Enthalpie (kJ/kg)	190	250	-	-
Point solidification ($^{\circ}\text{C}$)	21-19	29-27	-	-
Point fusion ($^{\circ}\text{C}$)	20-23	27-29	-	-

Tableau 5. 3 : Les propriétés de la paraffine, de l'aluminium, et de l'air [72], [119], [120]

En conséquence, une comparaison qui montre la possibilité de la modélisation pour expliquer le comportement du MCP a été faite, ce qui correspond largement aux références [118], [121], [122], avec une amélioration significative des résultats actuels.

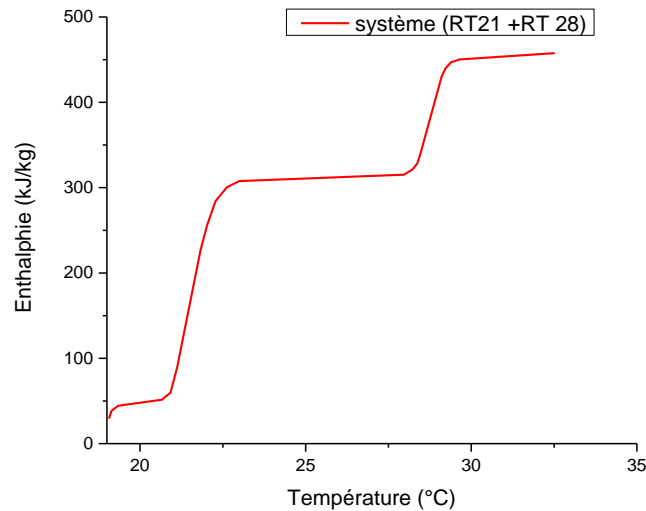


Figure 5. 22 : L'évolution complète de l'énergie produite en fonction de la température

Au début, les résultats décrivent l'enthalpie en fonction de la température. La courbe de simulation est divisée en cinq parties : Au début, le système absorbe des quantités importantes d'énergie thermique stockée sous forme de chaleur sensible. Par conséquent, le système continue d'absorber la chaleur jusqu'à ce que tous le MCP (RT21) soit convertis en phase liquide. Cependant, la température continue de s'augmenter au fur et à mesure le système MCP stocke de l'énergie sous forme de chaleur sensible. Ensuite, le MCP RT28 atteint la température de fusion dans ce cas, le système MCP stocke de l'énergie sous forme de chaleur latente. Après, le système continue d'absorber la chaleur jusqu'à ce que tout le MCP RT28 soit convertis en phase liquide. On peut observer que le modèle proposé décrit avec précision le changement de phase. On peut aussi conclure que le système proposé peut stocker l'énergie thermique sous forme de chaleur latente sur deux étapes principales. En outre, le système MCP peut absorber plus d'énergie thermique qu'un système avec un seul type de MCP. Par conséquent, le temps de climatisation est optimisé et une grande quantité d'énergie est absorbée comme le montre la figure 5.22. D'autre part, les résultats peuvent être satisfaisants lorsque le système n'effectue pas la charge complète, dans ce cas, notre système va bénéficier de l'énergie stockée par le MCP RT21 qui a déjà fondu.

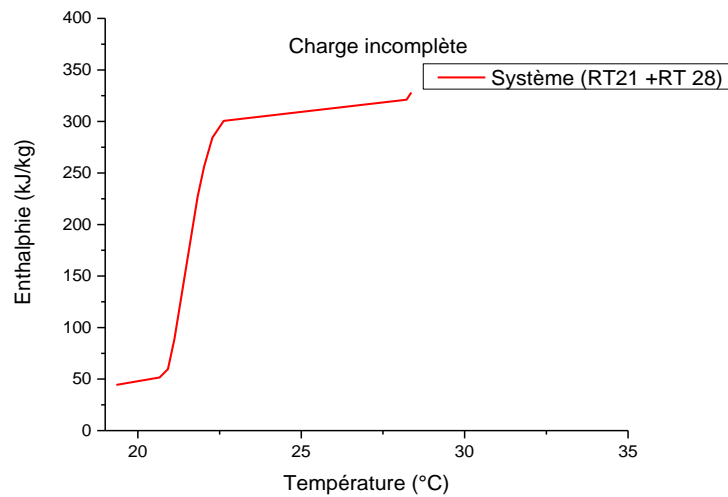


Figure 5. 23 : L'évolution de la charge incomplète en fonction de la température pour le système proposé

La figure 5. 23 décrit l'évolution de l'énergie en fonction de la température. A partir de la courbe, il a été observé que le système de deux MCP ne dépasse pas la température de fusion de MCP RT28. Ce résultat dépend du milieu extérieur qui ne dépasse pas 28°C. Par conséquent, le système proposé garde la température stable à l'intérieur de bâtiment qui est la même température de MCP RT28.

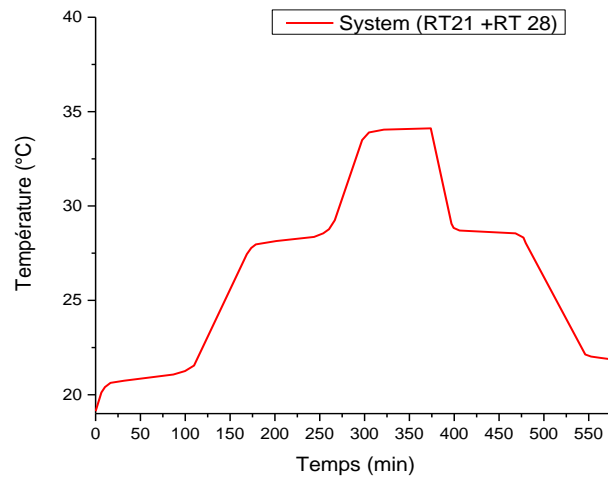


Figure 5. 24 : L'évolution de la température en fonction du temps du système (charge complète).

Chaque source d'énergie est considérée comme une énergie supplémentaire qui améliore la stabilité de l'énergie thermique à l'intérieur du bâtiment, ce qui permet d'augmenter la durée de climatisation comme le montre la figure 5.24.

La pente de la température pendant le cycle de fusion augmente pendant les 30 premières minutes, puis elle devient presque droite à environ 30 minutes à 120 minutes. Pendant cette période, la transition de phase solide à liquide (fusion) a lieu à 20 ° C pour MCP RT21. Au fur et à mesure que la température augmente, un deuxième changement de phase peut se produire à 28 ° C pour le MCP RT28. Le système proposé qui combine deux MCP peut stabiliser l'énergie thermique à l'intérieur du bâtiment pour une longue durée, car il peut diviser l'absorption d'énergie en deux étapes. Alors que le système stocke une énergie thermique significative dans la première période prêt à être utilisé pour stabiliser la température ultérieurement (figure 5.25).

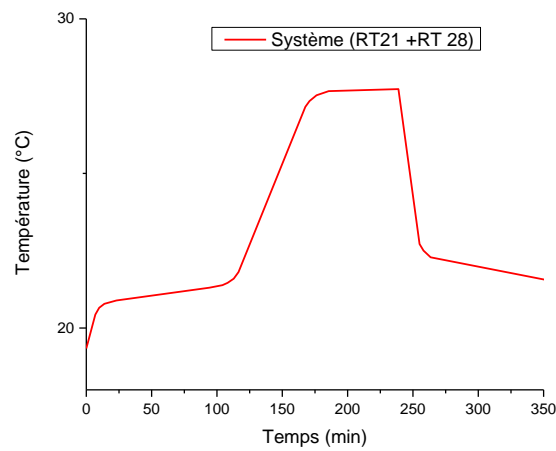


Figure 5. 25 : L'évolution de la température en fonction du temps du système (charge incomplète).

Afin de décrire le comportement thermique du système proposé, une simulation numérique du logiciel COMSOL MULTIPHYSICS a été utilisée. Le modèle géométrique est maillé uniformément comme l'illustre la figure 5.26 qui met en évidence les sections tridimensionnelles du conteneur triangulaire de composition qui est l'origine de différentes formes en tant que rectangle et parallélogramme.

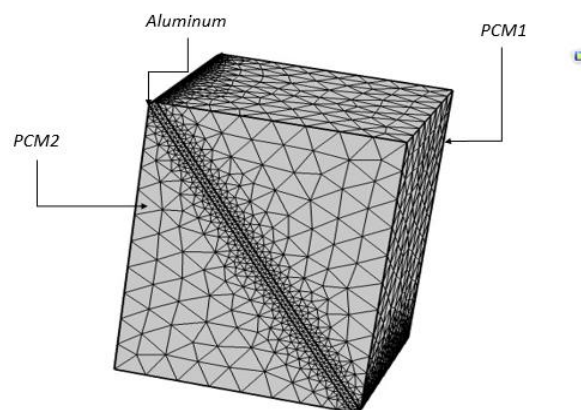


Figure 5. 26 : Géométrie et maillage

Le système proposé est de forme rectangulaire qui combine deux types de MCP en tant que conteneur triangulaire. La conductivité thermique de l'aluminium étant bien supérieure à celle du MCP, une couche d'ailette a été intégrée entre les deux MCP pour augmenter la conductivité.

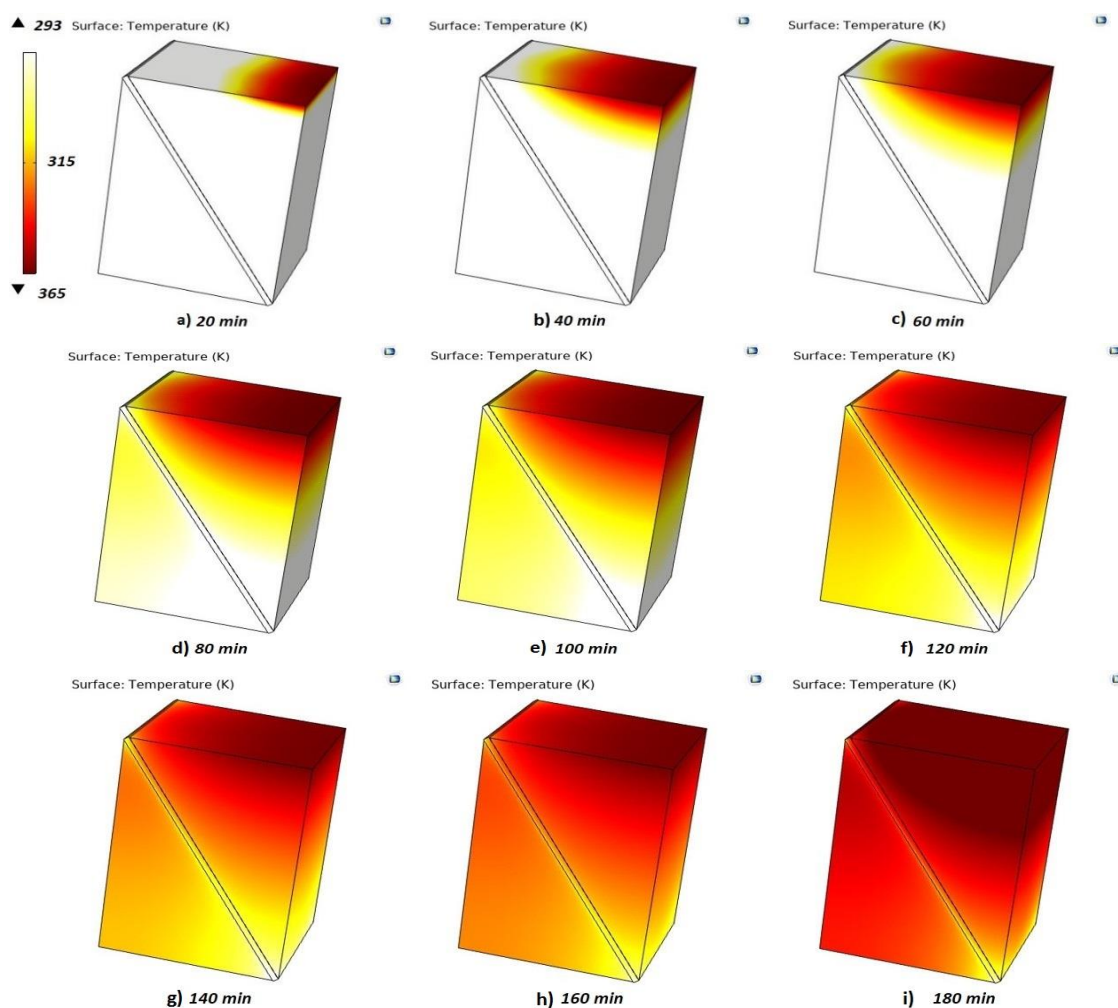


Figure 5. 27 : Évolution de la fusion en fonction du temps pour le système MCP proposé (20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160 et 180 min)

La figure 5. 27 décrit l'évolution de la fusion au cours du temps pour le système MCP. L'étude numérique explique que l'ingénierie joue un rôle important dans l'augmentation de capacité de stockage et le temps de fusion du MCP. Au début, l'augmentation de la température permet le système MCP d'absorber la chaleur. Ensuite, la première enceinte du MCP RT 21 commence le processus de fusion. Après, le système continue d'absorber l'énergie thermique jusqu'à ce que le tout le MCP RT 21 a une température de 21°C. En outre, la couche d'aluminium augmente la conductivité thermique du système et transmet l'énergie thermique à la deuxième enceinte triangulaire qui contient le MCP RT 28. Cependant, le système proposé montre une couleur différente dans les deux enceintes triangulaires, car les deux MCP ont une température de fusion différente.

5.4.4. Synthèse

Dans ce travail, une étude numérique qui combine deux types complémentaires de MCP ayant une gamme de température de fusion différente a été menée. Par ailleurs, on a proposé une modélisation thermo-fluidique qui est capable de décrire les différents modes de transferts thermiques dans un conteneur triangulaire de MCP. Ce système permet d'optimiser la stabilité du climat à l'intérieur du bâtiment. Ainsi, la concordance du modèle a été validée en décrivant le comportement réel du système MCP. Par conséquent, la simulation numérique montre une amélioration significative dans la prédiction du comportement des systèmes thermiques et montre aussi augmentation du temps de climatisation. Enfin, une simulation tridimensionnelle montre l'évolution des processus de fusion dans les conteneurs triangulaires des MCP RT21 et MCP RT28 dans le système proposé.

5.5. CONCLUSION

La présente étude vise à intégrer les matériaux à changement de phase dans les systèmes énergétiques du bâtiment grâce à leur capacité de stocker une importante quantité de l'énergie thermique et de la restituer ultérieurement. Dans un premier temps, on a proposé un système solaire à base de MCP pour la production et le stockage de l'énergie thermique. L'intégration des MCP dans le capteur solaire permet de réduire le temps de production et de stockage du système solaire. Ensuite, on a proposé une ingénierie d'un système hybride photovoltaïque thermique à base de MCP. L'intégration de MCP permet d'absorber la chaleur qui affecte les panneaux photovoltaïques et la stocker dans le réservoir d'eau sanitaire. L'énergie thermique absorbée permet de stabiliser la température dans le système ce qui augmente la production de l'énergie électrique dans le capteur photovoltaïque. Finalement, un système de stockage sous la forme d'une géométrie rectangulaire qui combine deux types de MCP triangulaires, qui ont des températures de fusion différentes. L'ingénierie utilisée permet d'augmenter la capacité de stockage, ce qui réduit le temps pour les systèmes de chauffage et augmente le temps pour les systèmes de climatisation. Il a été conclu que le choix du MCP dépend de l'application visée, les conditions de l'environnement et de l'ingénierie utilisée. Ces matériaux ont des multiples utilités et avantages ce qui les rendent envisageables dans différents domaines tels que la construction, la climatisation, le refroidissement, le stockage des systèmes et les énergies renouvelables.

CONCLUSION GENERALE

Les matériaux à changement de phase sont employés pour maintenir un niveau de confort par le biais du contrôle de la température. Ils offrent l'opportunité de réduire les besoins énergétiques mais également de faire des économies. Ainsi, en réduisant la consommation énergétique cela a pour conséquence directe, une diminution des émissions de CO₂.

En effet, ces matériaux à changement de phase (MCP) sont classiquement utilisés pour le stockage d'énergie sous forme thermique, en se focalisant principalement sur le changement de phase solide-liquide. Lorsque la température du matériau augmente, le MCP passe de l'état solide à l'état liquide et cette réaction endothermique absorbe la chaleur du milieu environnant. A l'inverse, quand la température diminue, la réaction est exothermique et le matériau restitue la chaleur au milieu environnant. Ces matériaux à changement de phase sont donc particulièrement intéressants dans les bâtiments à faible inertie, car ils permettent de limiter l'effet des conditions thermiques externes et de réduire les fluctuations de température au sein des locaux.

Dans le but de dévoiler le comportement thermomécanique de manière simple. Nous avons développé un modèle en tenant compte d'un ensemble des hypothèses simplificatrices suivantes ; l'étude a été réalisée sur un système physique muni de MCP. Les MCP sont supposés homogènes et isotropes contenus dans une enveloppe métallique de résistance thermique négligeable. Les propriétés physiques du matériau à l'état solide et liquide sont les mêmes. Les résistances d'interface sont négligeables. L'expansion volumique est négligée lors de la fusion du MCP. Dans cette optique, on a effectué une étude comparative relative aux comportements thermiques des deux types de configurations des parois rectangulaires et triangulaires. Cette étude comparative nous a permis de sélectionner le matériau à changement de phase opérationnel pour tous les niveaux thermiques des parois conditionnées.

La confrontation entre les résultats expérimentaux et les simulations numériques qui couplent à la fois le champ fluide via l'équation de Navier-stokes et le champ thermique en prenant compte la radiation, qui est un facteur important pour l'énergie fournie au MCP, particulièrement dans les systèmes solaires qui ont permis de valider le modèle de manière très satisfaisante. Notons bien aussi que le modèle est simulé pour quatre matériaux à changement de phase.

Pour améliorer la conductivité thermique de MCP, l'utilisation des composites des MCP était incontournable tout en maintenant un faible pourcentage en poids des particules métalliques. Les résultats obtenus ont montré que les températures de fusion et de solidification et les chaleurs

latentes de composite conviennent aux applications de stockage d'énergie thermique à basse température sans réduire sa capacité de stockage de chaleur.

A l'aide d'un logiciel ANSYS FLUENT et avec un maillage bien structuré et bien adapté à la géométrie, les résultats numériques décrivent le comportement réel du MCP en changement de phase. Par conséquent, l'étude proposée montre que le système MCP permet de stocker des grandes quantités d'énergie dans un temps plus réduit par rapport aux autres systèmes proposés précédemment.

La dernière partie du présent travail portait sur une extension du modèle développé qui constitue une des briques de base du dimensionnement des applications jusqu'à la plus grande échelle. L'amélioration de la performance d'un système de stockage de MCP repose sur la prise en compte de tous les modes de transfert thermique (Radiation, conduction, convection) et son intégration en tant que source thermique dans l'équation de la conservation d'énergie dans le modèle proposé. La géométrie du MCP et les températures clés de transformation de phase permettent aussi d'optimiser le système de stockage. La fonctionnalité acquise est exploitée pour concevoir des systèmes de stockage et de production de l'énergie thermique qu'on peut utiliser facilement dans le domaine des énergies renouvelables tel que le chauffe-eau solaire et dans le domaine de la climatisation.

PERSPECTIVES

L'ensemble des travaux réalisés convie à dégager quelques perspectives et un certain nombre d'objectifs.

En ce qui concerne la modélisation, l'étude pourrait également s'étoffer d'essais de type changement de phase, pour caractériser localement et énergétiquement le phénomène de transfert thermique. A moyen terme, il serait intéressant d'ajouter les ingrédients nécessaires dans le modèle afin de prendre en compte les aspects cycliques tels que l'évolution de la fatigue thermique.

Avec l'expérience acquise dans le domaine des matériaux à changement de phase, il est relativement naturel de s'orienter maintenant vers d'autres types de stockage tels que le stockage chimique et électrique.

Durant l'avancement des perspectives citées auparavant, nous allons continuer en parallèle à nous intéresser aux applications. Les retombées scientifiques de nos travaux de recherche académique vont être intégrées dans les outils d'aide à la conception, au dimensionnement des applications et à leurs tenues en service.

Ces aspects seront menés en collaboration avec des industriels du domaine. Autour de l'étude des applications, une collaboration avec les métallurgistes des matériaux de stockage renforcera fortement le savoir-faire de notre équipe. L'ensemble des perspectives permet de dégager notre thème de recherche sur les quelques années à venir. Il s'agit de l'étude comportementale des matériaux de stockage des énergies renouvelables et leur intégration dans les systèmes dans les différents domaines.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Hala GHAZI, “Modélisation d’écoulements compressibles avec transition de phase et prise en compte des états métastables,” UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE, 2018.
- [2] L. Andre, “Stockage thermochimique de l ’ énergie solaire concentrée à partir de matériaux innovants par réactions solide-gaz réversibles,” Université de Perpignan, 2018.
- [3] C. Marwan, “Modélisation , conception et étude expérimentale d ’ une pompe à chaleur industrielle à eau à haute température,” INSA de Lyon, 2013.
- [4] Adèle SOUPART-CARON, “Stockage de chaleur dans les Matériaux à Changement de Phase,” GRENOBLE ALPES, 2015.
- [5] H. Stéphanie, “Stockage de chaleur inter-saisonnier par voie thermochimique pour le chauffage solaire de la maison individuelle,” INSA de Lyon, 2012.
- [6] K. NDIAYE, “Etude numérique et expérimentale du stockage d’énergie par les matériaux cimentaires,” UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, 2013.
- [7] T. REMILLON, “Étude d’un système de récupération et de stockage de chaleur pour un système éolien-diesel avec stockage d’air comprimé,” UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI Étude, 2014.
- [8] V. B. Ochoa, Daniel, Abdelilah Slaoui, Robert Soler, “L’énergie solaire aux Etats-Unis,” 2009.
- [9] M. MARTINELLI, “Stockage d’énergie thermique par changement de phase – Application aux réseaux de chaleur,” Université Grenoble Alpes, 2016.
- [10] R. Osipian, “Étude dynamique d ’ un système de stockage par chaleur latente liquide-solide : application au véhicule électrique,” Université Sorbonne Paris Cité, 2018.
- [11] G.-O. CIMUCA, “SYSTEME INERTIEL DE STOCKAGE D’ENERGIE ASSOCIE A DES GENERATEURS EOLIENS,” Ecole Nationale Supérieure d’Arts et Métiers Centre de Lille, 2005.
- [12] R. Benchrifa and A. Bennouna, “ROLE DE L ’ HYDROGENE DANS LE STOCKAGE DE L ’ ELECTRICITE A BASE DES ENERGIES RENOUVELABLES 1 Introduction,” *Sol. Energy*, no. October, pp. 27–29, 2007.
- [13] T. Desrues, “Stockage massif d ’ électricité sous forme thermique,” Université de Grenoble, 2011.
- [14] J. Hoffmann, “Stockage thermique pour centrale solaire thermodynamique a concentration mettant en oeuvre des materiaux naturels ou recycles,” école doctorale, 2015.
- [15] P. Tatsidjodoung, “Procédé de stockage d ’ énergie solaire thermique par adsorption pour le chauffage des bâtiments : Modélisation et Simulation numérique,” 2014.
- [16] A. Gil, E. Oró, G. Peiró, S. Álvarez, and L. F. Cabeza, “Material selection and testing for thermal energy storage in solar cooling,” *Renew. Energy*, vol. 57, pp. 366–371, 2013, doi: 10.1016/j.renene.2013.02.008.
- [17] M. Telkes, “Thermal energy storage in salt hydrates,” *Sol. Energy Mater.*, vol. 2, no. 4, pp. 381–393, 1980, doi: 10.1016/0165-1633(80)90033-7.
- [18] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi, “Review on thermal energy storage with phase change materials and applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 2, pp. 318–345, 2009, doi: 10.1016/j.rser.2007.10.005.
- [19] L. F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. De Gracia, and A. I. Fernández, “Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 3, pp. 1675–1695, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.11.018.
- [20] S. Maaraoui, “Étude et conception d ’ une pompe à chaleur résidentielle intégrant un stockage par chaleur latente,” École nationale supérieure des mines de Paris, 2018.
- [21] A. Abhat, “Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials,” *Sol. Energy*, vol. 30, no. 4, pp. 313–332, 1983, doi: 10.1016/0038-092X(83)90186-X.

- [22] S. E. Ango, “Contribution au stockage d ’ énergie thermique en bâtiment : développement d ’ un système actif à matériaux à changement de phase,” École Nationale Supérieure d ’ Arts et Métiers, 2011.
- [23] G. Serale, E. Fabrizio, and M. Perino, “Design of a low-temperature solar heating system based on a slurry Phase Change Material (PCS),” *Energy Build.*, vol. 106, pp. 44–58, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.06.063.
- [24] Z. Younsi, A. Joulin, L. Zalewski, and D. R. Rouse, “Analyse numerique de la fusion de materiaux a changement de phase dans une enceinte rectangulaire chauffee par une paroi laterale,” no. May 2009, 2016.
- [25] D. Mathis and D. Mathis, “Développement de nouveaux matériaux de haute inertie thermique à base de bois et matériaux à changement de phase biosourcés,” laval, 2019.
- [26] H. Price *et al.*, “Advances in parabolic trough solar power technology,” *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME*, vol. 124, no. 2, pp. 109–125, 2002, doi: 10.1115/1.1467922.
- [27] A. Kaizawa *et al.*, “Thermal and flow behaviors in heat transportation container using phase change material,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 49, no. 4, pp. 698–706, 2008, doi: 10.1016/j.enconman.2007.07.022.
- [28] K. A. R. Ismail, F. A. M. Lino, R. C. R. Da Silva, A. B. De Jesus, and L. C. Paixão, “Experimentally validated two dimensional numerical model for the solidification of PCM along a horizontal long tube,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 75, pp. 184–193, 2014, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2013.08.008.
- [29] H. K. Sharma, S. K. Verma, P. K. Singh, S. Kumar, M. Kant Paswan, and P. Singhal, “Performance analysis of paraffin wax as PCM by using hybrid zinc-cobalt-iron oxide nano-fluid on latent heat energy storage system,” *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, pp. 2–5, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.300.
- [30] A. Sari and K. Kaygusuz, “Thermal performance of palmitic acid as a phase change energy storage material,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 43, no. 6, pp. 863–876, 2002, doi: 10.1016/S0196-8904(01)00071-1.
- [31] E. P. Ona *et al.*, “Influence of ultrasonic irradiation on the solidification behavior of erythritol as a PCM,” *J. Chem. Eng. Japan*, vol. 35, no. 3, pp. 290–298, 2002, doi: 10.1252/jcej.35.290.
- [32] S. Gschwander *et al.*, “Standardization of PCM Characterization via DSC,” *GREENSTOCK 2015- 13th Int. Conf. Energy Storage*, no. May, pp. 1–8, 2015.
- [33] L. L. Wei and K. Ohsasa, “Supercooling and solidification behavior of phase change material,” *ISIJ Int.*, vol. 50, no. 9, pp. 1265–1269, 2010, doi: 10.2355/isijinternational.50.1265.
- [34] A. Shukla, D. Buddhi, and R. L. Sawhney, “Solar water heaters with phase change material thermal energy storage medium: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 8, pp. 2119–2125, 2009, doi: 10.1016/j.rser.2009.01.024.
- [35] F. Agyenim and N. Hewitt, “The development of a finned phase change material (PCM) storage system to take advantage of off-peak electricity tariff for improvement in cost of heat pump operation,” *Energy Build.*, vol. 42, no. 9, pp. 1552–1560, 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.03.027.
- [36] R. Sharma, S. Sharma, and S. Tiwari, “Materials Today : Proceedings Design optimization of solar PV water pumping system,” *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.11.322.
- [37] S. Wang, P. Qin, X. Fang, Z. Zhang, S. Wang, and X. Liu, “A novel sebacic acid/expanded graphite composite phase change material for solar thermal medium-temperature applications,” *Sol. Energy*, vol. 99, pp. 283–290, 2014, doi: 10.1016/j.solener.2013.11.018.
- [38] S. Puupponen, A. Seppälä, K. Saari, and T. Ala-nissilä, “Preparation of Phase Change Material Nanofluids for Heat Transfer Applications,” no. March 2014, 2013.

- [39] H. M. B. Zalba, J. Marin, and Luisa F. Cabeza, *Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications*, vol. 704, 2012.
- [40] A. Pasupathy, R. Velraj, and R. V. Seeniraj, “Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, no. 1, pp. 39–64, 2008, doi: 10.1016/j.rser.2006.05.010.
- [41] A. Boubault, B. Claudet, O. Faugeron, G. Olalde, and J. J. Serra, “A numerical thermal approach to study the accelerated aging of a solar absorber material,” *Sol. Energy*, vol. 86, no. 11, pp. 3153–3167, 2012, doi: 10.1016/j.solener.2012.08.007.
- [42] Y. Kozak, B. Abramzon, and G. Ziskind, “Experimental and numerical investigation of a hybrid PCM-air heat sink,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 59, no. 1–2, pp. 142–152, 2013, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.05.021.
- [43] C. M. Lai and S. Hokoi, “Thermal performance of an aluminum honeycomb wallboard incorporating microencapsulated PCM,” *Energy Build.*, vol. 73, pp. 37–47, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.01.017.
- [44] Y. Mohammad Hashemi, M. Kadkhodaei, and M. R. Mohammadzadeh, “Fatigue analysis of shape memory alloy helical springs,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 161–162, no. August, 2019, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2019.105059.
- [45] F. S. Barnes and J. G. Levine, *Large Energy Storage Systems Handbook*.
- [46] J. Leland and G. Recktenwald, “Optimization of a phase change heat sink for extreme environments,” *Annu. IEEE Semicond. Therm. Meas. Manag. Symp.*, pp. 351–356, 2003, doi: 10.1109/stherm.2003.1194384.
- [47] E. Gundabattini, R. Kuppan, D. G. Solomon, A. Kalam, D. P. Kothari, and R. Abu Bakar, “A review on methods of finding losses and cooling methods to increase efficiency of electric machines,” *Ain Shams Eng. J.*, no. xxxx, 2020, doi: 10.1016/j.asej.2020.08.014.
- [48] M. M. Farid, A. M. Khudhair, S. A. K. Razack, and S. Al-Hallaj, “A review on phase change energy storage: Materials and applications,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 45, no. 9–10, pp. 1597–1615, 2004, doi: 10.1016/j.enconman.2003.09.015.
- [49] M. M. Kenisarin, “High-temperature phase change materials for thermal energy storage,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 3, pp. 955–970, 2010, doi: 10.1016/j.rser.2009.11.011.
- [50] F. Agyenim, N. Hewitt, P. Eames, and M. Smyth, “A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS),” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 2, pp. 615–628, 2010, doi: 10.1016/j.rser.2009.10.015.
- [51] Z. I. Djamaï, “Contribution à la caractérisation multi-échelle de composites textile mortier à inertie thermique renforcée par des matériaux à changement de phase (composite MCP-TRC) : application au bâtiment,” 2018.
- [52] S. RIGAL, “Stockage par matériaux à changement de phase de l’énergie thermique rejetée par l’industrie à basse température,” université de pau et des pays de l’adour, 2005.
- [53] N. M. et K. Imessad, “Matériau à changement de phase au service de la bioclimatique,” *Rev. des Energies Renouvelables*, vol. 19, pp. 647–662, 2016.
- [54] S. M. Hasnain, “Review on sustainable thermal energy storage technologies, part I: Heat storage materials and techniques,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 39, no. 11, pp. 1127–1138, 1998.
- [55] D. W. Hawes, D. Feldman, and D. Banu, “Latent heat storage in building materials,” *Energy Build.*, vol. 20, no. 1, pp. 77–86, 1993, doi: 10.1016/0378-7788(93)90040-2.
- [56] D. A. Neeper, “Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage,” *Sol. Energy*, vol. 68, no. 5, pp. 393–403, 2000, doi: 10.1016/S0038-092X(00)00012-8.
- [57] M. Xiao, B. Feng, and K. Gong, “Preparation and performance of shape stabilized phase

- change thermal storage materials with high thermal conductivity,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 43, no. 1, pp. 103–108, 2002, doi: 10.1016/S0196-8904(01)00010-3.
- [58] R. A. T. Zebbiche, “Résolution d ’ un problème de changement de phase en présence de la convection naturelle par la méthode enthalpique : Application au Gallium,” pp. 25–36, 2008.
- [59] 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,” Université de la Réunion, 2016.
- [60] F. Mechighel, “Modélisation de la convection au cours des changements de phase liquide-solide : effet d’un champ magnétique,” UNIVERSITE DE LIMOGES ECOLE, 2011.
- [61] S. S. Kiyaroudi, “SOLAR HOT WATER SYSTEM USING LATENT HEAT THERMAL ENERGY,” University of Tasmania, 2016.
- [62] J. Vogel, J. Felbinger, and M. Johnson, “Natural convection in high temperature flat plate latent heat thermal energy storage systems,” *Appl. Energy*, vol. 184, pp. 184–196, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.10.001.
- [63] V. V. R. & P. C., “A Fixed grid numerical modelling methodology for convection diffusion mushy region phase change problems,” *Int. Journal Heat Mass Transf.*, vol. 30, no. 8, pp. 1709–1719, 1978.
- [64] R. R. Kasibhatla, A. König-Haagen, F. Rösler, and D. Brüggemann, “Numerical modelling of melting and settling of an encapsulated PCM using variable viscosity,” *Heat Mass Transf.*, vol. 53, no. 5, pp. 1735–1744, May 2017, doi: 10.1007/s00231-016-1932-0.
- [65] J. Boussinesq, *Théorie de l’écoulement tourbillonnant et tumultueux des liquides dans les lits rectilignes à grande section, Tome I.* Gauthier-Villars et Fils, 1897.
- [66] M. Kumar and D. J. Krishna, “Influence of Mushy Zone Constant on Thermohydraulics of a PCM,” *Energy Procedia*, vol. 109, no. November 2016, pp. 314–321, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.074.
- [67] S. Arena, G. Cau, and C. Palomba, “CFD Simulation of Melting and Solidification of PCM in Thermal Energy Storage Systems of Different Geometry,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 655, no. 1, 2015, doi: 10.1088/1742-6596/655/1/012051.
- [68] S. Le Foll, “Modélisation du couplage conduction/rayonnement dans les systèmes de protection thermique soumis à de très hauts niveaux de températures,” INSA de Lyon, 2014.
- [69] F. L. Tan, S. F. Hosseinizadeh, J. M. Khodadadi, and L. Fan, “Experimental and computational study of constrained melting of phase change materials (PCM) inside a spherical capsule,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 52, no. 15–16, pp. 3464–3472, 2009, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.02.043.
- [70] C. W. Chan and F. L. Tan, “Solidification inside a sphere - An experimental study,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 33, no. 3, pp. 335–341, 2006, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2005.10.010.
- [71] M. Sheikholeslami, A. Ghasemi, Z. Li, A. Shafee, and S. Saleem, “Influence of CuO nanoparticles on heat transfer behavior of PCM in solidification process considering radiative source term,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 126, pp. 1252–1264, 2018, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.116.
- [72] M. Ben Zohra, A. Riad, A. Alhamany, and M. Sennoune, “Coupled thermo-fluidic model for thermal energy storage based on liquid solid phase change,” *Mater. Res. Express*, vol. 7, no. 2, pp. 0–12, 2020, doi: 10.1088/2053-1591/ab73fc.
- [73] A. Barba and M. Spiga, “Discharge mode for encapsulated PCMs in storage tanks,” vol. 74, no. February, pp. 141–148, 2003.
- [74] Y. X. and D. Y. 3 Juan Duan, “Melting Behavior of Phase Change Material in Honeycomb Structures with Different,” 2019, doi: 10.3390/en12152920.
- [75] T. Barz *et al.*, “State and state of charge estimation for a latent heat storage,” no. 2018, pp.

- 151–166, doi: 10.1016/j.conengprac.2017.11.006.The.
- [76] C. Beust *et al.*, “Influence des paramètres de modélisation sur la simulation numérique d ’ un module de stockage thermique par chaleur latente avec ailettes circulaires To cite this version : HAL Id : hal-02144716 Influence des paramètres de modélisation sur la simulation ,” 2019.
- [77] A. Rakotondrandisa, I. Danaila, and L. Danaila, “Numerical modelling of a melting-solidification cycle of a phase-change material with complete or partial melting,” *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 76, no. May 2018, pp. 57–71, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2018.11.004.
- [78] Y. O. Souci and S. Houat, “Numerical study of building materials filled by PCM for thermal energy storage,” *Epa. - J. Silic. Based Compos. Mater.*, vol. 70, no. 4, pp. 123–127, 2018, doi: 10.14382/epitoanyag-jsbcm.2018.23.
- [79] L. Royon, L. Karim, and A. Bontemps, “Thermal energy storage and release of a new component with PCM for integration in floors for thermal management of buildings,” *Energy Build.*, vol. 63, pp. 29–35, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.03.042.
- [80] A. Trigui, M. Karkri, C. Boudaya, Y. Candau, L. Ibos, and M. Fois, “Experimental investigation of a composite phase change material: Thermal-energy storage and release,” *J. Compos. Mater.*, vol. 48, no. 1, pp. 49–62, 2014, doi: 10.1177/0021998312468185.
- [81] N. Mekaddem, S. Ben Ali, M. Fois, and A. Hannachi, “Paraffin/expanded perlite/plaster as thermal energy storage composite,” *Energy Procedia*, vol. 157, pp. 1118–1129, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2018.11.279.
- [82] S. Drissi, “numérique du comportement thermique To cite this version : HAL Id : tel-01271597 Développement de nouveaux bétons ” accumulateurs d ’ énergie ” : Investigations expérimentale , probabiliste et numérique du comportement thermique,” 2016.
- [83] G. Vidalain, M. Des, P. Convectifs, L. A. Chaleur, E. T. D. Une, and F. Modifiée, “LORS DU CHANGEMENT DE PHASE SOLIDE-LIQUIDE Résumé,” 2007.
- [84] D. Ghosh, C. Guha, and J. Ghose, “Numerical investigation of paraffin wax solidification in spherical and rectangular cavity,” *Heat Mass Transf.*, vol. 55, no. 12, pp. 3547–3559, Dec. 2019, doi: 10.1007/s00231-019-02680-4.
- [85] E. D. Kerme, “PERFORMANCE ANALYSIS AND DESIGN OF LIQUID BASED SOLAR HEATING SYSTEM,” vol. 1, no. 1, pp. 182–191, 2015.
- [86] C. Yildirim and N. F. Tümen Özdil, “Theoretical investigation of a solar air heater roughened by ribs and grooves,” *J. Therm. Eng.*, vol. 4, no. 1, pp. 1702–1712, 2018, doi: 10.18186/journal-of-thermal-engineering.365713.
- [87] K. S. Surana, A. D. Joy, L. A. Quiros, and J. N. Reddy, “Mathematical models and numerical solutions of liquid-solid and solid-liquid phase change,” *J. Therm. Eng.*, vol. 1, no. 2, pp. 61–98, 2015, doi: 10.18186/jte.71504.
- [88] A. Nourbakhsh and M. Bayareh, “Study of the effect of the porous plates on the tank bottom on the boiling process,” *J. Therm. Eng.*, vol. 5, no. 3, pp. 149–156, 2019, doi: 10.18186/THERMAL.540120.
- [89] A. O. Nayak, M. Gowtham, R. Vinod, and G. Ramkumar, “Analysis of PCM Material in Thermal Energy Storage System,” *Int. J. Environ. Sci. Dev.*, vol. 01078, pp. 437–441, 2011, doi: 10.7763/IJESD.2011.V2.165.
- [90] C. Solé, M. Medrano, A. Castell, M. Nogués, H. Mehling, and L. F. Cabeza, “Energetic and exergetic analysis of a domestic water tank with phase change material,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 32, no. 3, pp. 204–214, Mar. 2008, doi: 10.1002/er.1341.
- [91] M. A. Ezan, M. Ozdogan, H. Gunerhan, A. Erek, and A. Hepbasli, “Energetic and exergetic analysis and assessment of a thermal energy storage (TES) unit for building applications,” *Energy Build.*, vol. 42, no. 10, pp. 1896–1901, Oct. 2010, doi:

- 10.1016/j.enbuild.2010.05.025.
- [92] R. Elbahjaoui and E. L. Q. H, “Optimisation D’Une Unite De Stockage D’Energie Solaire Par Chaleur Latente De Fusion Utilisant La Cire De Paraffine (Praffin Wax P116),” *12ème Congrès de Mécanique*, vol. 21-24 Avri, pp. 1–3, 2015.
- [93] F. Ünal, G. Temir, and H. Köten, “Energy, exergy and exergoeconomic analysis of solar-assisted vertical ground source heat pump system for heating season,” *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 8, pp. 3929–3942, 2018, doi: 10.1007/s12206-018-0744-1.
- [94] J. Zhao, Y. Ji, Y. Yuan, Z. Zhang, and J. Lu, “Energy-Saving Analysis of Solar Heating System with PCM Storage Tank,” *Energies*, vol. 11, no. 1, p. 237, 2018, doi: 10.3390/en11010237.
- [95] N. Beemkumar, A. Karthikeyan, K. S. Keshava Reddy, K. Rajesh, and A. Anderson, “Analysis of Thermal Energy Storage Tank by ANSYS and Comparison with Experimental Results to Improve its Thermal Efficiency,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 197, no. 1, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/197/1/012039.
- [96] M. A. P. Mohammed, E. Tarleton, M. N. Charalambides, and J. G. Williams, “Mechanical characterization and micromechanical modeling of bread dough,” *J. Rheol. (N. Y. N. Y.)*, vol. 57, no. 1, pp. 249–272, 2013, doi: 10.1122/1.4768463.
- [97] K. Reddy, V. Mudgal, and T. Mallick, “Thermal Performance Analysis of Multi-Phase Change Material Layer-Integrated Building Roofs for Energy Efficiency in Built-Environment,” *Energies*, vol. 10, no. 9, p. 1367, Sep. 2017, doi: 10.3390/en10091367.
- [98] Y. Tian and C.-Y. Zhao, “Heat transfer analysis for phase change materials (PCMs),” pp. 1–8, 2009.
- [99] C. L. and C. G. Petrone G., “Numerical simulation of pcm melting process,” no. July, pp. 469–474, 2012.
- [100] J. Vlachopoulos and D. Strutt, “Basic Heat Transfer and some applications ind polymer processing,” *Plast. Tech. Toolbox*, vol. 2, pp. 21–33, 2002.
- [101] M. Benbrika, M. Benbelhout, and M. Teggat, “Amélioration de l ’ efficacité thermique d ’ un chauffe -eau solaire par l ’ utilisation de matériaux à changement de phase (MCP),” *Int. J. Sci. Res. Eng. Technol.*, vol. Vol.4 pp.1, no. December, 2015.
- [102] C. L. Saw, H. H. Al-Kayiem, and A. L. Owolabi, “Experimental investigation on the effect of PCM and Nano-enhanced PCM of integrated solar collector performance,” *WIT Trans. Ecol. Environ.*, vol. 179 VOLUME, no. December, pp. 899–909, 2013, doi: 10.2495/SC130762.
- [103] Z. Younsi, A. Joulin, L. Zalewski, and D. Rousse, “Analyse Numérique De La Fusion De Matériaux À Changement De Phase Dans Une Enceinte,” *IXème Colloq. Interuniv. Fr. sur la Therm. des Systèmes*, 2009.
- [104] A. Yadav and S. Soni, “Simulation of Melting Process of a Phase Change Material (PCM) using ANSYS (Fluent),” *Int. Res. J. Eng. Technol.*, pp. 2395–56, 2017.
- [105] X. H. Yang, S. C. Tan, Z. Z. He, and J. Liu, “Finned heat pipe assisted low melting point metal PCM heat sink against extremely high power thermal shock,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 160, no. November 2017, pp. 467–476, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.01.056.
- [106] A. Ponsanmugakumar, R. Scholar, R. Madhan, A. L. Narayanan, and R. Rajavel, “Thermal Energy analysis using TRNSYS in PCM Storage Tank,” *Int. J. Futur. Revolut. Comput. Sci. Commun. Eng.*, pp. 1–5.
- [107] M. H. Joneidi, M. J. Hosseini, A. A. Ranjbar, and R. Bahrampoury, “Experimental investigation of phase change in a cavity for varying heat flux and inclination angles,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 88, no. February, pp. 594–607, 2017, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2017.07.017.
- [108] M. C. Browne, B. Norton, and S. J. McCormack, “Heat retention of a photovoltaic/thermal

- collector with PCM,” *Sol. Energy*, vol. 133, pp. 533–548, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.04.024.
- [109] Moharram and H. El-Sherif, “performance of photovoltaic panels by water cooling,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 4, no. 4, pp. 869–877, 2013, doi: 10.1016/j.asej.2013.03.005.
- [110] C. Hajjaj *et al.*, “Design of a new photovoltaic panel cooling system to optimize its electrical efficiency,” *Proc. 2016 Int. Renew. Sustain. Energy Conf. IRSEC 2016*, pp. 623–627, 2017, doi: 10.1109/IRSEC.2016.7983939.
- [111] P. Biwole, P. Eclache, and F. Kuznik, “Improving the Performance of Solar Panels by the Use of Phase-Change Materials,” *Proc. World Renew. Energy Congr. – Sweden, 8–13 May, 2011, Linköping, Sweden*, vol. 57, pp. 2953–2960, 2011, doi: 10.3384/ecp110572953.
- [112] H. E. Abdelrahman, M. H. Wahba, H. A. Refaey, M. Moawad, and N. S. Berbish, “Performance enhancement of photovoltaic cells by changing configuration and using PCM (RT35HC) with nanoparticles Al₂O₃,” *Sol. Energy*, vol. 177, no. October 2018, pp. 665–671, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2018.11.022.
- [113] V. Karthikeyan, C. Sirisamphanwong, S. Sukchai, S. K. Sahoo, and T. Wongwuttanasatian, “Reducing PV module temperature with radiation based PV module incorporating composite phase change material,” *J. Energy Storage*, vol. 29, no. November 2019, p. 101346, 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101346.
- [114] M. Koller, H. Walter, and M. Hameter, “Transient numerical simulation of the melting and solidification behavior of NaNO₃ using a wire matrix for enhancing the heat transfer,” *Energies*, vol. 9, no. 3, 2016, doi: 10.3390/en9030205.
- [115] W. M. Asyraf, A. Vasu, F. Y. Hagos, M. M. Noor, and R. Mamat, “Transient modelling of heat loading of phase change material for energy storage,” vol. 01078, 2017.
- [116] R. Saxena, D. Rakshit, and S. C. Kaushik, “Phase change material (PCM) incorporated bricks for energy conservation in composite climate: A sustainable building solution,” *Sol. Energy*, vol. 183, no. October 2018, pp. 276–284, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.03.035.
- [117] P. K. S. Rathore and S. K. Shukla, “An experimental evaluation of thermal behavior of the building envelope using macroencapsulated PCM for energy savings,” *Renew. Energy*, vol. 149, pp. 1300–1313, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.10.130.
- [118] H. Hamdani, S. Rizal, and M. Riza, “Numerical simulation analysis on the thermal performance of a building walls incorporating Phase Change Material (PCM) for thermal management,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 434, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/434/1/012186.
- [119] L. Sánchez-Silva, V. Lopez, N. Cuenca, and J. L. Valverde, “Poly(urea-formaldehyde) microcapsules containing commercial paraffin: in situ polymerization study,” *Colloid Polym. Sci.*, vol. 296, no. 9, pp. 1449–1457, 2018, doi: 10.1007/s00396-018-4365-0.
- [120] T. RUBITHERM RT, Datenblatt and ., “RT62HC,” 2020.
- [121] R. murthy Rudra and V. Gumtapure, “Thermal property study of fatty acid mixture as bio-phase change material for solar thermal energy storage usage in domestic hot water application,” *J. Energy Storage*, vol. 25, no. April, p. 100870, 2019, doi: 10.1016/j.est.2019.100870.
- [122] S. Hiebler and H. Mehling, “Measurement of the enthalpy of pcm,” *Appl. Energy*, no. JUNE 2009, 2016.