

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Par : **Mimouni Ahmed Rayane**

Kadri Mohamed

Sujet

Analyse du processus de fusion d'un matériau à changement de phase dans un échangeur de chaleur à ailettes longitudinales

Soutenu publiquement, le 19/06/2025 , devant le jury composé de :

Mme MOSTEFAOUI Amina
Mme SI CHAIB Amel
Mme OURRAD Soumia

MCB
MAA
MCB

Université de Tlemcen
Université de Tlemcen
Université de Tlemcen

Président
Examineur
Encadreur

Année universitaire : 2024/2025

Remerciements

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

Nous remercions vivement et chaleureusement Madame Ourrad Soumia notre promotrice, D'avoir proposé un sujet de recherche d'actualité, pour sa patience, pour son soutien et pour nous avoir guidés tout au long de ce mémoire.

Nos remerciements vont aux membres de jury qui ont pris soin d'examiner le travail présenté dans ce mémoire.

Nous exprimons aussi nos remerciements pour Mr Bendermel Othman pour sa disponibilité, ses conseils, ses aides précieuses et surtout leurs judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion.

Sans oublier ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail, et ceux qui ont fait l'honneur de jurer ce mémoire.

Nous ne laisserons pas cette occasion passer sans remercier tous les professeurs et personnels de l'Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen qui travaillent dur pour faire de cette Université ce qu'elle est aujourd'hui.

Merci à vous tous.

Je dédie ce travail à

La personne la plus chère et la plus précieuse de ma vie, la femme la plus courageuse du monde, celle dont je ne pourrai jamais assez reconnaître les sacrifices inlassables pour moi et mes frères. Merci pour ton amour infini et pour l'éducation que tu nous as offerte. Tout ce que je suis aujourd'hui, je le dois à toi, maman. J'espère que tu es fière de moi. Je t'aime plus que tout au monde.

Mon cher père Mohamed pour ton soutien, ton encouragement et surtout ton amour. Aucun mot ne serait assez pour témoigner de l'étendue des sentiments que j'approuve à ton égard. Ma chère sœur. Vous êtes mon épaule la plus solide. Puissent nos liens fraternels se consolider et se pérenniser encore plus.

Toute la famille MIMOUNI et DRICITANI.

Mes amis et camarades de promotion spécialement Djalil, Djamal, Abderrafie, Amina, Kader, Reham, Okacha.

Une spéciale dédicace pour mon cher oncle Younes pour tout l'encouragement, le respect, le soutien et optimisme que tu m'as offert.

Mon binôme et mon chère ami Mohamed ainsi qu'à toute sa famille.

Merci à vous.

Rayane

Je dédie ce travail à

À ceux qui ont planté les graines de l'ambition dans mon cœur

et les ont arrosées d'un amour inégalable.

À mes chers parents, mon cœur battant et mon premier

soutien, merci pour chaque instant, chaque prière silencieuse

qui continue de porter ses fruits pour ma réussite.

À mes amis, ma famille de cœur, mes compagnons de route et

ma dose de rire dans les moments difficiles.

Merci d'être la lumière qui illumine mon chemin.

À mon binôme Rayane, merci pour ta complicité, ta patience et ton soutien. Tu as été

un partenaire essentiel, et cette aventure aurait été différente sans toi.

Et à mon encadreur, pour ses connaissances, son temps, et pour m'avoir ouvert les

portes de la réflexion et de l'excellence, Vous avez tout mon respect et ma reconnaissance.

À vous tous...

Je dédie cette réalisation, qui est le fruit de vos cœurs et de

votre soutien

Mohamed

Résumé

Les systèmes de stockage d'énergie sont essentiels pour équilibrer l'offre et la demande d'énergie thermique. Le stockage de chaleur latente, utilisant des matériaux à changement de phase (MCP), est apprécié pour sa grande capacité de stockage et sa température de sortie stable. Cependant, les MCP présentent souvent une mauvaise conduction thermique. Pour optimiser le transfert de chaleur entre les MCP et les fluides caloporteurs, différentes méthodes, telles que les ailettes, les nanoparticules ou les mousses métalliques, sont utilisées pour améliorer les performances thermiques. Cette étude numérique, réalisée en utilisant le logiciel Fluent, analyse la cinétique de fusion du matériau à changement de phase (MCP) RT-82 (température de fusion ≈ 355 K) intégré dans un échangeur tubulaire. L'objectif est d'évaluer l'impact des ailettes et la température du fluide caloporteur sur le temps de fusion.

Mots clé : Matériaux a changement de phase, stockage de l'énergie thermique, échangeur de chaleur

Abstract

Energy storage systems are crucial for balancing thermal energy supply and demand. Latent heat storage, using phase-change materials (PCMs), is popular for its high storage capacity and stable temperature output. However, PCMs often suffer from poor heat conduction. To optimize heat transfer between PCMs and heat transfer fluids, different methods—such as fins, nanoparticles, or metal foams—are used to enhance thermal performance. This numerical study, carried out using Fluent software, analyzes the melting kinetics of the rt-82 phase change material (PCM) (melting temperature ≈ 355 K) integrated in a tubular exchanger. The objective is to evaluate the impact of the fins and the heat transfer fluid temperature on the complete melting time.

Keywords: Phase change materials, thermal energy storage, heat exchanger

ملخص

أنظمة تخزين الطاقة ضرورية لموازنة العرض والطلب على الطاقة الحرارية. يشتهر تخزين الحرارة الكامنة، باستخدام مواد تغيير الطور بسعة تخزينه العالية وثبات درجة حرارته. ومع ذلك، غالباً ما تعاني هذه المواد من ضعف التوصيل الحراري. لتحسين انتقال الحرارة بين هذه المواد وسوائل نقل الحرارة، تُستخدم طرق مختلفة - مثل الزعانف، والجسيمات النانوية، والرغوات المعدنية - لتحسين الأداء الحراري. تُحلل هذه الدراسة العددية، التي أُجريت باستخدام برنامج فليانت، حركية ذوبان مادة تغيير الطور 82-rt درجة حرارة انصهارها ≈ 355 كلفن المدمجة في مبادل أنبوبي الهدف هو تقييم تأثير الأجنحة ودرجة حرارة سائل نقل الحرارة على زمن الانصهار الكامل.

الكلمات المفتاحية: مواد تغيير الطور، تخزين الطاقة الحرارية، المبادل الحراري

Nomenclature

Caractère	Signification	Unité
T	Température	K ou $^{\circ}C$
C_p	Chaleur spécifique	$J/(kg \cdot K)$
L	Chaleur latente de changement de phase	J/kg
ρ	Masse volumique	$Kg \cdot m^{-3}$
μ	Viscosité dynamique	$Kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
β	Coefficient de dilatation thermique	K^{-1}
K	La conductivité thermique.	$W/(m \cdot K)$
t	Variable du temps	Min
u	Vitesse suivant x	$m \cdot s^{-1}$
v	Vitesse suivant y	$m \cdot s^{-1}$
Q	Quantité de la chaleur	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
x, y	Coordonnées cartésiennes	
Δt	Pas de temps	S
h	Coefficient d'échange	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
S_h	Terme de source	
m	La masse	Kg
l	Longueur	cm ou mm
Δh	Variation d'enthalpie	j/kg
∂t	Dérivée partielle par rapport au temps	s^{-1}
∂i	Dérivée partielle par rapport à la coordonnée spatiale	m^{-1}
ρu_i	Flux de masse	$Kg/m^2 \cdot s$
P	Pression	$Pa (N/m^2)$
g	Gravité	m/s^2
ΔH_r	Chaleur de réaction	j/mol

Abréviations	
MCP	Matériau à changement de phase
CFD	Dynamique des fluides Numérique
SCS	Système de stockage de chaleur sensible
SET	Stockage d'énergie thermique
SECL	Stockage d'énergie par chaleur latente
FTC	Fluide de transfert de chaleur

Table des matières

Résumé	
Nomenclature	
Table des matières	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES TABLEAU	
Introduction générale.....	1
Chapitre I Généralités sur les MCP	
I.1 Introduction.....	4
I.2 Définition des MCP.....	4
I.3 Historique.....	5
I.4 Les critères de choix du MCP.....	5
I. 4. 1 Propriétés thermiques.....	5
I. 4. 2 Propriétés physiques.....	5
I. 4. 3 Propriétés cinétiques.....	6
I. 4. 4 Propriétés chimiques.....	6
I. 4. 5 Propriétés économiques.....	6
I.5 Différents types de matériaux à changements de phase.....	6
I. 5. 1 MCP organique.....	7
I. 5. 1. 1 Les paraffines.....	7
I. 5. 1. 2 Non-paraffine.....	8
I. 5. 1. 3 Les avantages des MCP organiques.....	8
I. 5. 1. 4 Les inconvénients des MCP organiques.....	8
I. 5. 2 MCP inorganique.....	9
I. 5. 2. 1 Les hydrates de sel.....	9
I. 5. 2. 2 Les métaux.....	10
I. 5. 2. 3 Les avantages des MCP inorganiques.....	10
I. 5. 2. 4 Les inconvénients des MCP inorganiques.....	11
I. 5. 3 Les eutectiques.....	11
I. 5. 3. 1 Les avantages des eutectiques.....	11
I. 5. 3. 2 Les inconvénients des eutectiques.....	12
I. 5. 4 Caractéristiques De Quelques MCP.....	12
I.6 Le stockage de l'énergie.....	12
I.7 Stockage de l'énergie thermique.....	13
I. 7. 1 Stockage de l'énergie thermique par chaleur sensible.....	14

I. 7. 2 Stockage de l'énergie thermique par chaleur latente :.....	14
I. 7. 3 Stockage thermochimique.....	15
I. 7. 4 Comparaison des différents types de stockage d'énergie thermique.....	16
I.8 Les méthodes d'encapsulation.....	17
I. 8. 1 Macro-encapsulation.....	18
I. 8. 2 La micro-encapsulation	18
I.9 Conclusion	19
Chapitre II : R.B. Amélioration du transfert au sein des MCP	
II.1 Introduction.....	21
II.2 Différentes méthodes pour améliorer le transfert thermique au sein des MCP.....	21
II. 2. 1 Les ailettes	21
II. 2. 2 Combinaison de plusieurs MCP	25
II. 2. 3 Mousses métalliques	28
II. 2. 4 Nano particules.....	32
II. 2. 5 Augmentation du nombre des tubes où circule le fluide caloporteur	35
II. 2. 6 Forme de l'espace contenant le MCP	36
II.3 Conclusion	37
Chapitre III : Problématique	
III.1 Introduction.....	39
III. 1. 1 Géométrie.....	39
III. 1. 2 Les hypothèses	43
III. 1. 3 Modèle mathématique.....	43
III. 1. 4 Conditions initiales et aux limites.....	44
III. 1. 5 Résolution numérique	45
III.2 Conclusion	46
Chapitre IV : Résultats et discussions	
IV.1 Introduction	48
IV. 1. 1 Résolution numérique.....	48
IV. 1. 2 L'effet des ailettes	49
IV. 1. 2. 1 Contours de la fraction liquide.....	49
IV. 1. 2. 2 Contours de température	53
IV. 1. 2. 3 Evolution de la fraction liquide pour l'effet des ailettes	57
IV. 1. 2. 4 Evolution de la température pour l'effet des ailettes	58
IV. 1. 3 L'effet de températures :	60
IV. 1. 3. 1 Contours de la fraction liquide :.....	60
IV. 1. 3. 2 Contours de températures.....	63

IV. 1. 3. 3 Evolution de la fraction liquide pour l'effet de la température	66
IV. 1. 3. 4 Evolution de température en fonction de temps Effet de la température du fluide caloporteur	68
IV.2 Conclusion :	69
Conclusion générale	71
Références bibliographiques	

LISTE DES FIGURES

Figure I-1: Classification des matériaux à changement de phase [4].	7
Figure I-2: Paraffine brutes, en capsulées, en poudre ou en granulées [5].	8
Figure I-3: Profil de changement de phase pour le stockage par chaleur latente (Solide/liquide) [11].	15
Figure I-4: Schéma de principe du stockage thermo-chimique [12].	16
Figure I-5: MCP macro-encapsulé dans un sachet en Polyéthylène [13].	18
Figure I-6: Types de microcapsules.	19
Figure II-1: Dessin 3D pour un échangeur de chaleur à tubes à ailettes MCP [14].	22
Figure II-2: Schéma du modèle 2D [15].	22
Figure II-3: Section transversale du système de stockage [16].	23
Figure II-4: Coupe transversale de la section de test avec ailettes de la hauteur maximale et minimale [17].	24
Figure II-5: Vue 3D des échangeurs de chaleur contenant MCP avec ailettes de 13 et 26 mm. [18].	24
Figure II-6: Configurations des ailettes (Gauche) bifurcation unique. (Droite) Double [19].	25
Figure II-7: Différents agencements étudiés. (a) MCP simple. (b) Multi-MCP en série. (c) Multi-MCP en parallèle [20].	26
Figure II-8: Grille ((a) une couche ; (b) trois couches ; (c) cinq couches ; (d) zoom sur la grille pour trois couches) [21].	27
Figure II-9: (a) du récipient MCP et (b) du tube FTC montrant les emplacements des thermocouples [22].	28
Figure II-10: Le modèle physique pour la simulation bidimensionnelle ($d_1 = 40$ mm et $d_2 = 82$ mm) [23].	28
Figure II-11: Le schéma de la géométrie étudiée (pas à l'échelle) [24].	29
Figure II-12: Comparaison de la forme de l'interface de fusion entre la paraffine pure et le composite paraffine/mousse à 90 min (vue de face) [25].	30
Figure II-13: Coupe transversale d'un pore typique avec la grille finale pour le calcul du transfert de chaleur montrant la taille relative des pores par rapport à l'espacement de la grille [26].	31
Figure II-14: Contours de fraction liquide pour la fusion de MCP pur [27].	32
Figure II-15: Configuration du modèle physique [28].	33
Figure II-16: Photographie de la poudre de nanoparticules Al_2O_3 avant ajout au MCP [29].	33
Figure II-17: Vue schématique du modèle symétrique d'axe installé par MCP avec zone soudaine expansion [30].	34
Figure II-18: Diagrammes schématiques de la géométrie de l'échangeur de chaleur à tube triplex [31].	35
Figure II-19: Système avec un tube (gauche) et multitube (droite) contenant le fluide caloporteur [32].	36
Figure II-20: Schéma du système de stockage thermique [33].	36
Figure II-21: Schéma du domaine de calcul [34].	37
Figure III-1: Configuration étudiée pour le premier cas.	40
Figure III-2: Configuration étudiée pour le deuxième cas.	41
Figure III-3: Configuration étudiée pour le troisième cas.	41
Figure III-4: Configuration étudiée pour le quatrième cas.	42
Figure III-5: Configuration étudiée pour le dernier cas.	42
Figure III-6: Domaine du calcul.	44
Figure III-7: maillage du premier cas.	45
Figure III-8: Géométrie du deuxième cas après maillage.	46

Figure III-9: Géométrie du troisième cas après maillage.....	46
Figure IV-1: Dépendance de la taille de la grille de la solution numérique.	48
Figure IV-2 : contours de la fraction liquide pour un échangeur sans ailette, avec 1 ailette, avec,	51
Figure IV-3: contours de la température de MCP pour 3 cas sans ailette, avec 1 ailette, avec deux ailettes.....	55
Figure IV-4: Evolution la fraction liquide en fonction du temps pour 3 cas sans ailette, avec 1 ailette, avec 2 ailettes.	57
Figure IV-5: Evolution de la température en fonction de temps pour 3 cas sans ailette, avec 1 ailette, avec deux ailettes.....	58
Figure IV-6: contours de la fraction liquide de MCP en 358 k, 363 k, 368 k.	61
Figure IV-7: contours de la température en effet des différentes températures du fluide caloporteur.	64
Figure IV-8: Evolution de la fraction liquide en fonction du temps pour trois différentes températures du fluide 358 k, 363 K, 368 K.	66
Figure IV-9: Evolution de température en fonction de temps Effet de la température du fluide caloporteur.....	68

LISTE DES TABLEAU

Tableau I-1: Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques sels.[....	10
Tableau I-2: Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques métalliques.	10
Tableau I-3: Propriétés de quelques eutectiques.	11
Tableau I-4: Propriétés thermiques de certains MCP.....	12
Tableau I-5: Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur.	17
Tableau III-1: Propriétés thermo-physiques des différents matériaux utilisés.	43

Introduction générale

Introduction générale

Face à l'expansion économique et démographique mondiale, il est essentiel de s'attaquer aux mises de la stabilité énergétique, de l'environnement et des technologies énergétiques durables. Au niveau mondial, la production d'électricité et le chauffage reposent principalement sur l'utilisation de combustibles fossiles. Toutefois, leur emploi n'est pas pérenne et engendre des conséquences nuisibles pour l'environnement.

L'utilisation importante des matériaux à changement de phase nommé MCP dans le chauffage des locaux est l'application des unités de stockage d'énergie thermique à chaleur latente. Un système de chauffage d'ambiance intégrant des MCP peut être conçu pour stocker la chaleur provenant des énergies renouvelables ou de la chaleur résiduelle récupérée, puis la restituer à l'intérieur lors des journées froides. Bien que les MCP offrent des propriétés intéressantes comme une densité énergétique élevée et un fonctionnement quasi isotherme, un défi majeur est leur faible conductivité thermique. Cela peut limiter leur capacité à fondre et se solidifier efficacement, réduisant ainsi leur efficacité dans certains contextes et affectant les performances thermiques des systèmes SECL (stockage d'énergie par chaleur latente). Pour améliorer les performances de stockage d'énergie thermique dans les unités SECL, il est possible d'optimiser les propriétés des MCP et de modifier la conception des unités, par exemple, en intégrant des matériaux poreux à haute conductivité thermique aux MCP.

Une classification détaillée sur les matériaux à changement de phase MCP, en nous intéressant particulièrement aux principales catégories telles que les sels hydratés, les paraffines, et les matériaux composites. Chaque type sera étudié en tenant compte de ses caractéristiques thermiques, de ses performances, de ses avantages spécifiques ainsi que de ses limitations techniques ou économiques

Comme les énergies classiques s'épuisent et polluent la nature et la santé, il devient nécessaire d'utiliser des énergies propres, non polluantes et gratuites, comme les énergies renouvelables.

Lorsqu'un matériau pur subit une fusion (transition solide-liquide), sa température reste constante durant tout le processus de changement de phase, quelle que soit la température de la source thermique.

Le but de notre travail est de faire une simulation bidimensionnelles utilisant un logiciel fluent CFD , pour réduire le temps de fusion , La simulation est effectuée de faire une géométrie à l'aide d'un logiciel "GAMBIT" entre cinq d'échangeur de même épaisseurs et diamètres juste en ajoutant des différents types d' amélioration du transfert au sein de MCP pour voir le développement du changement du phase de solide en liquide en fonction du temps voir la variation thermique en ajoutant des ailettes ou modifier la température du fluide caloporteur .

Pour réaliser les objectifs établis dans le cadre de cette étude, le travail a été structuré en quatre chapitres.

Le premier chapitre présente les principales techniques de stockage de l'énergie thermique, ainsi que les matériaux à changement de phase.

Le deuxième chapitre porte sur des différents types d'amélioration du transfert au sein des MCP à partir des expériences et des études réaliser par des chercheurs pour comparer leurs résultats.

Les deux premiers chapitres présentent la première partie de cette étude, qui résume les bases théoriques du stockage de chaleur avec changement de phase.

Pour le troisième chapitre il présente une approche numérique utilisée pour étudier les transferts thermiques impliqués dans la fusion d'un matériau à changement de phase (MCP) sous l'effet d'un fluide caloporteur circulant dans un tube intérieur en cuivre améliorer par des ailettes ou un changement de température de ce dernier fluide en affichant les maillages et les géométries utilisées. Il contient aussi une courte présentation des logiciels comme, Fluent6.3.26 utilisés pour la simulation.

Le quatrième chapitre présente les résultats de la simulation numérique, en analysant l'évolution des paramètres clés tels que le front de fusion, la distribution de la fraction liquide et de la température.

Enfin, la conclusion résume les résultats importants de l'étude et propose des idées pour des recherches futures.

Chapitre I : Généralités sur les MCP

I.1 Introduction

Ce chapitre présente les bases du stockage de l'énergie thermique. Nous comparerons les différentes technologies disponibles et étudierons les matériaux à changement de phase (MCP), qui sont une solution intéressante pour le stockage de chaleur. L'objectif est de comprendre les avantages de ces technologies et de déterminer les options les plus adaptées aux besoins énergétiques.

I.2 Définition des MCP

Les matériaux à changement de phase sont des substances capables de stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente pendant leur fusion et de la restituer lors de leur solidification, tout en maintenant une température constante. Ces matériaux sont caractérisés par une grande capacité de stockage d'énergie et la capacité de maintenir une température stable, en absorbant la chaleur pendant la phase de fusion et en la libérant lors de la solidification.

Cet intérêt s'est développé dans le domaine de la gestion thermique et des systèmes d'énergie solaire des bâtiments et des serres.

Les MCP peuvent fondre et se solidifier sur une large gamme de températures, ce qui les rend adaptés à de nombreuses applications. Parmi ces matériaux, les cires de paraffine sont économiques, offrent une densité de stockage thermique modérée et possèdent une faible conductivité thermique. En revanche, les sels hydratés présentent une densité de stockage d'énergie plus élevée et une meilleure conductivité thermique, bien qu'ils souffrent de phénomènes tels que le super-refroidissement et la ségrégation de phase.

Lorsque la température baisse, le matériau à changement de phase passe de l'état liquide à l'état solide, libérant de la chaleur de manière exothermique. Ce processus aide à stabiliser les variations thermiques extrêmes, permettant aux fluctuations de température dans le bâtiment de se produire plus lentement. Cela réduit ainsi le besoin en chauffage ou en refroidissement, ce qui diminue la consommation de carburant et les émissions de CO₂[1].

I.3 Historique

Une des premières descriptions des matériaux à changement de phase et des dispositifs de mémoire a été réalisée par un groupe des Bell Telephone Laboratories. Ce groupe a présenté des alliages As-Te-I et des dispositifs fabriqués à partir de ces alliages, qui possédaient deux états de résistance stables, ainsi qu'une zone de résistance différentielle négative, propre à la commutation de seuil des matériaux à changement de phase. Ce phénomène de commutation est d'une importance capitale pour les applications de mémoire à semi-conducteurs, et sera détaillé par la suite. Les variations de résistance observées ont été attribuées au fait que ces matériaux étaient soit amorphes, soit cristallins. Ovshinsky a compris que cette différence de propriétés pouvait être exploitée pour stocker de l'information, et il a breveté et publié cette idée dans les années 1960.

Au XIXe siècle, l'idée des matériaux à changement de phase a commencé à se clarifier avec l'avancée de la compréhension des principes thermodynamiques. Les scientifiques ont observé que certaines substances, telles que l'eau, la cire ou certains sels, pouvaient absorber ou libérer d'importantes quantités de chaleur lorsqu'elles changeaient de phase. Ce phénomène de changement de phase a été identifié comme un moyen efficace de stocker et de libérer de l'énergie thermique sans variation significative de température, une notion qui serait plus tard exploitée dans des matériaux spécialement conçus pour ces propriétés, tels que les MCP [2].

I.4 Les critères de choix du MCP

Les caractéristiques recherchées dans un MCP varient selon son utilisation, mais elles incluent généralement :

I. 4. 1 Propriétés thermiques

Les MCP doivent posséder une chaleur latente de fusion élevée, ce qui signifie qu'ils peuvent absorber ou émettre une grande quantité d'énergie lors du changement de phase. Une plage étroite de température de fusion et de congélation, ainsi qu'une conductivité thermique élevée, sont également des critères essentiels pour garantir que le MCP fonctionne rapidement et efficacement, avec des variations de température minimales.

I. 4. 2 Propriétés physiques

Il est crucial que le MCP soit thermiquement stable, non inflammable et non toxique. Il doit maintenir sa structure chimique et ses propriétés de changement de phase pendant

plusieurs cycles sans se dégrader. De plus, il doit être sans danger pour la santé humaine et l'environnement.

I. 4. 3 Propriétés cinétiques

La rapidité du changement de phase est importante pour assurer un transfert thermique efficace. Un MCP doit afficher une faible hystérésis (c'est-à-dire une petite différence de température entre la charge et la décharge) et minimiser les risques de surfusion ou de surchauffe, de sorte qu'il puisse fondre ou se solidifier à sa température prévue sans nécessiter d'énergie supplémentaire.

I. 4. 4 Propriétés chimiques

Les caractéristiques chimiques du MCP doivent être compatibles avec les matériaux avec lesquels il pourrait entrer en contact. Il doit être stable chimiquement et ne pas réagir avec les autres matériaux ou substances, y compris les contenants ou les encres dans lesquels il est stocké.

I. 4. 5 Propriétés économiques

Le coût, la disponibilité et la facilité de fabrication du MCP sont des critères déterminants. Il doit être abordable, facilement accessible et possible à fabriquer efficacement, tout en permettant des économies d'énergie et des gains d'efficacité qui justifient son coût initial[3].

I.5 Différents types de matériaux à changements de phase

On distingue trois types de MCP : organiques, inorganiques et eutectiques. La caractéristique la plus cruciale pour un matériau destiné à être utilisé comme MCP est sa capacité à stocker une grande quantité d'énergie thermique. En général, les matériaux inorganiques présentent une capacité de stockage thermique plus élevée que les matériaux organiques, cependant, d'autres facteurs doivent également être pris en compte lors du choix de ces matériaux.

Ces matériaux doivent avoir une chaleur latente de fusion importante. Afin de faciliter et accélérer les charges et de décharges, il est intéressant de choisir une bonne conductivité thermique[4].

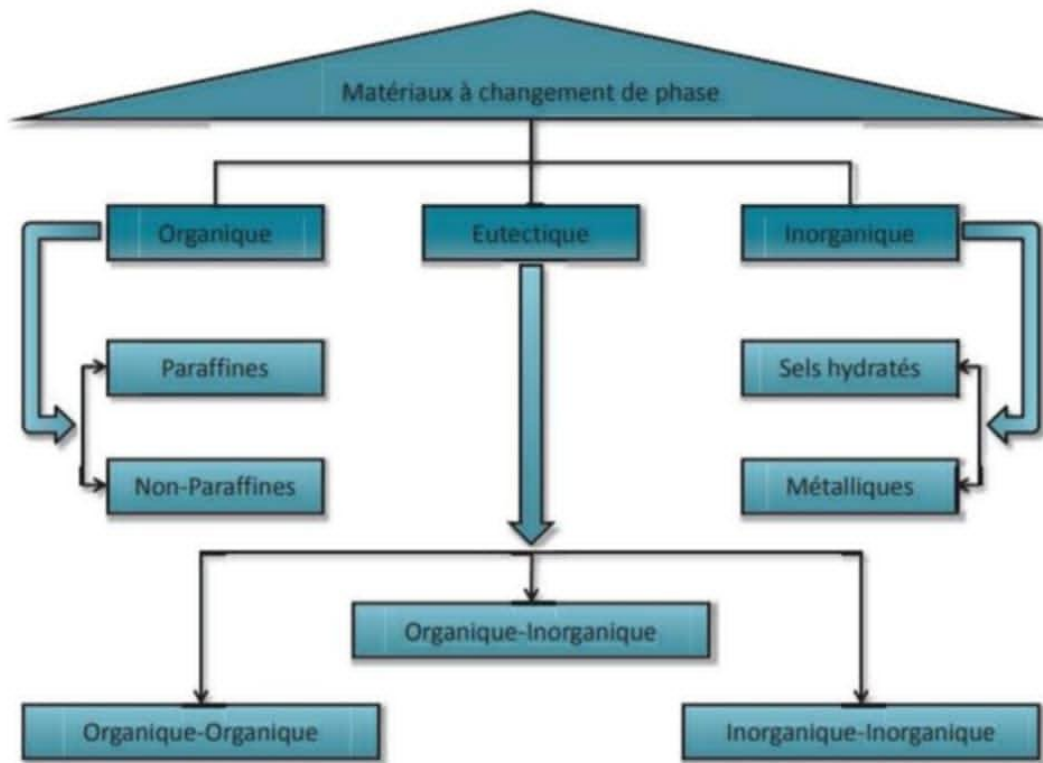


Figure I-1: Classification des matériaux à changement de phase [4].

I. 5. 1 MCP organique

On distingue deux types de matériaux à changement de phase organiques : les paraffines et les non-paraffines. Généralement, ces matériaux ne montrent pas de ségrégation de phase et se cristallisent avec un super-refroidissement minimal ou inexistant. Il existe une vaste sélection de MCP organiques disponibles dans un intervalle de température allant de -5 °C à 190 °C [5].

I. 5. 1. 1 Les paraffines

La paraffine, qui couvre une large plage de températures, a une densité d'environ 900 kg/m^3 , ce qui permet son utilisation dans une variété de secteurs, au-delà des applications liées aux bâtiments. Les paraffines normales de formule générale C_nH_{2n+2} constituent une famille d'hydrocarbures saturés présentant des propriétés physiques relativement similaires. La chaleur latente des MCP organiques est fonction de leur masse, et ces matériaux ne présentent aucun signe de séparation de phase même après de nombreux cycles de transition entre les

états solide et liquide. De plus, ils ont une faible pression de vapeur, ce qui les rend stables et efficaces pour un usage à long terme [5].



Figure I-2: Paraffine brutes, en capsulées, en poudre ou en granulées[5].

I. 5. 1. 2Non-paraffine

Les matériaux à changement de phase non-paraffines, tels que les acides gras, leurs esters, alcools et les glycols, possèdent des températures de fusion allant de 5 à 70°C et une chaleur latente importante, généralement autour de 150 J/g. Ils peuvent supporter des milliers de cycles thermiques et chimiques sans dégradation notable de leurs propriétés. Bien que les MCP organiques soient polyvalents et adaptés à diverses applications, certains sont inflammables, ce qui constitue un inconvénient majeur, notamment en ce qui concerne la sécurité des applications dans le domaine du bâtiment[5].

I. 5. 1. 3Les avantages des MCP organiques

Les MCP organiques ont attiré plus d'attention que les MCP inorganiques en raison de leur absence de corrosivité, de leur faible surfusion et de meilleures propriétés de réversibilité. Les acides gras, en particulier, sont largement utilisés en raison de leur grande capacité de stockage de chaleur latente, de leur température de changement de phase ajustable, de leur faible pression de vapeur, de leur comportement auto-nucléon et de leur stabilité chimique et physique [6].

I. 5. 1. 4Les inconvénients des MCP organiques

En dehors de ces avantages, plusieurs défauts inhérents, tels que :

- Les fuites, phase élevée

- Température de transition
- Faible conductivité thermique et inflammabilité
- Limiter leur application commerciale.
- Plusieurs enquêtes ont été utilisées pour améliorer la stabilité thermique,
- La durabilité et la capacité de stockage et les problèmes de fuite des MCP vierges, parmi eux, l'imprégnation.
- La technologie de support des MCP pour les solides poreux inertes est une pratique prometteuse [7].

I. 5. 2 MCP inorganique

Les matériaux à changement de phase inorganiques comprennent les hydrates de sels et les métaux. Cependant, pour les applications de construction, les métaux ne conviennent pas car leur température de fusion est trop élevée et leur poids trop important, ce qui les rend difficiles à utiliser.

En général, les matériaux inorganiques à changement de phase ont deux fois plus de chaleur capacité de stockage par unité de volume par rapport aux matières organiques [7].

I. 5. 2. 1 Les hydrates de sel

Les hydrates de sel sont composés d'un mélange de sels inorganiques et d'eau, ce qui en fait des matériaux à changement de phase économiques grâce à leur facilité d'approvisionnement et leur faible coût. Le processus de changement de phase consiste en l'hydratation ou la déshydratation des sels, un phénomène similaire à la fusion et à la congélation. Lors de ce processus, l'hydrate de sel peut fondre pour devenir un hydrate contenant moins d'eau, ou se transformer en une forme anhydre, où le sel et l'eau sont totalement séparés.

Les hydrates de sel offrent une grande capacité de stockage thermique et subissent une transition de phase à température ambiante. Leur densité, d'environ 1700 kg/m^3 , est deux fois supérieure à celle de la paraffine. Avec une chaleur latente pouvant atteindre 200 J/g , leur capacité de stockage de chaleur par volume est d'environ 350 MJ/m^3 [6].

Tableau I-1: Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques sels [6].

Matériau	Température de mélange (°C)	Chaleur latente de fusion (kJ · kg ⁻¹)
CaCl ₂ .12H ₂ O	29,8	174
LiNO ₃ .2H ₂ O	30	296
FeCl ₃ .6H ₂ O	37	223

I. 5. 2. 2 Les métaux

Pour les MCP métalliques, ils ont généralement une grande conductivité thermique, une grande densité de stockage de chaleur et bonne stabilité des cycles thermiques. Le métal à changement de phase est l'un des MCP les plus prometteurs du monde.

Cette catégorie n'a pas encore été considérée pour les technologies de MCP en raison de leur poids. Leurs principales caractéristiques sont : une faible chaleur de fusion par unité de poids, une chaleur de fusion élevée par unité de volume, une conductivité thermique élevée, une faible chaleur spécifique et une pression de vapeur relativement élevée. Parmi eux, les matériaux métalliques semblent les plus prometteurs [8].

Tableau I-2: Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques métalliques[8].

Matériau	Température de mélange (°C)	Chaleur latente de fusion (kJ · kg ⁻¹)
Gallium	30	80.3
Cerro Bend eutectique	70	32.6

I. 5. 2. 3 Les avantages des MCP inorganiques

Les MCP inorganiques sont souvent préférés pour le stockage d'énergie, car ils offrent presque deux fois plus de capacité de stockage thermique par unité de volume que les MCP organiques. De plus, ils présentent une conductivité thermique plus élevée, une chaleur latente de fusion importante et sont ininflammables, ce qui les rend plus sûrs et efficaces pour certaines applications [9].

Chapitre I : Généralités sur les MCP

I. 5. 2. 4 Les inconvénients des MCP inorganiques

Mais, malgré leurs avantages, les MCP inorganiques présentent également certains inconvénients. Les sels hydratés en particulier sont corrosifs pour conteneurs de stockage métalliques, ce qui entraîne une durée de vie plus courte du système et des problèmes de fuite. Ils aussi montrent les phénomènes de ségrégation de phases et de surfusion qui affectent leur capacité de stockage de chaleur. Ils ont également une pression de vapeur plus élevée, un changement de volume plus élevé et leur stabilité chimique est variable [10].

I. 5. 3 Les eutectiques

Les eutectiques constituent des combinaisons de deux ou plusieurs substances présentant des points de fusion spécifiques. Ils présentent un comportement analogue à celui des hydrates salins à fusion congruente, donc comparable à une substance pure, c'est-à-dire que leur température de transition d'état est unique. Les eutectiques présentent un potentiel significatif pour les applications de stockage thermique de l'énergie. Certains d'entre eux sont utilisés pour le refroidissement et dans les systèmes passifs de stockage d'énergie solaire[9].

Tableau I-3: Propriétés de quelques eutectiques[9].

Eutectique inorganique	Point de fusion [°C]	Chaleur latente de fusion [kJ.kg⁻¹]
49.3% MgCl ₂ .6H ₂ O+50.7%Mg(NO ₃).6H ₂ O	58	132.3
61.5%Mg(NO ₃).6H ₂ O+38.5%NH ₄ NO ₃	51	131.1
58.3%Mg(NO ₃).6H ₂ O+41.7%MgCl ₂ .6H ₂ O	58	106
CaCl ₂ .6H ₂ O+CaBr ₂ .H ₂ O	14	140
Eutectique organique		
Acides Caprique-Laurique	18	120
Acides Palmitique-Laurique	33	145
Acides Stéarique-Laurique	34	150

I. 5. 3. 1 Les avantages des eutectiques

- Point de fusion nette similaire à une substance pure.
- Leur disponibilité dans une large plage de températures,
- Chaleur latente de fusion élevée et bonne stabilité chimique et thermique.

I. 5. 3. 2 Les inconvénients des eutectiques

- Disponibilité dans la plage de température souhaitée et requise pour l'application.
- Immiscibilité en phase solide.
- Non réactif parmi les composants de l'eutectique [10].

I. 5. 4 Caractéristiques De Quelques MCP

Les propriétés de certains matériaux à changement de phase (MCP) sont présentées dans les tableaux suivants :

Tableau I-4: Propriétés thermiques de certains MCP [10].

Matériau (MCP)	Temp. de fusion (°C)	Chaleur latente (kJ/kg)	Conductivité thermique (W/m·K)	Densité (kg/m³)	Type (Organique/I norganique)
Paraffine (C18-C28)	20 - 28	150 - 250	~0.2	750 - 900	Organique
Acide stéarique	69 - 70	~200	~0.17	~850	Organique
Eau (Glace → Eau)	0	334	0.6 (glace) / 0.6 (eau)	917 (glace)	Inorganique
Sels hydratés (CaCl₂·6H₂O)	29 - 30	~190	~0.5	~1800	Inorganique
Erythritol	118 - 120	~340	~0.7	~1300	Organique
Gallium	29.8	80	~40	~5900	Métallique

I.6 Le stockage de l'énergie

Le stockage d'énergie consiste à conserver de l'énergie pour l'utiliser plus tard, lorsque c'est nécessaire. Cela permet de mieux gérer l'approvisionnement en énergie, surtout avec les énergies renouvelables comme le solaire ou l'éolien étant donné son rôle crucial dans notre société fortement consommatrice d'énergie, le stockage de l'énergie est une priorité économique.

Des facteurs économiques, environnementaux, géopolitiques et techniques contribuent tous à la nécessité de stockage.

Les différentes technologies de stockage d'énergie peuvent inclure des batteries, qui stockent l'énergie sous forme chimique, des systèmes qui stockent l'énergie sous forme de chaleur, ou encore des réservoirs d'air comprimé. Le stockage d'énergie joue un rôle clé dans l'amélioration de la flexibilité et de la fiabilité des réseaux électriques modernes, en permettant une utilisation plus efficace des sources d'énergie renouvelables tout en réduisant la dépendance aux énergies fossiles.

Cela facilite une gestion plus efficace de l'équilibre entre la production et la consommation d'énergie[10].

I.7 Stockage de l'énergie thermique

Le stockage d'énergie thermique (SET, pour stockage d'énergie thermique) est une technologie qui permet de stocker de l'énergie sous forme de chaleur ou de froid pour une utilisation ultérieure. Ce processus consiste à utiliser un matériau ou un fluide de stockage qui peut être chauffé ou refroidi à une température spécifique. Une fois l'énergie stockée, elle peut être libérée et utilisée quand cela est nécessaire, par exemple pour des applications de chauffage, de climatisation ou même pour la production d'électricité.

Le stockage thermique joue un rôle essentiel dans la gestion de l'énergie, notamment dans les systèmes utilisant des énergies renouvelables comme le solaire, car il permet de lisser la production d'énergie et de la rendre disponible à tout moment, même lorsque les conditions météorologiques ne sont pas favorables. Par exemple, un système de de stockage d'énergie thermique dans une maison pourrait accumuler de la chaleur pendant la journée en utilisant des panneaux solaires thermiques et la restituer la nuit pour chauffer la maison, réduisant ainsi la dépendance aux énergies fossiles et améliorant l'efficacité énergétique globale.

Les systèmes de stockage d'énergie thermique offrent des avantages à la fois environnementaux et économiques en réduisant le besoin de combustion carburants. Ils ont un simple but. Cela évite la perte d'énergie thermique en stockant l'excès de chaleur jusqu'à ce qu'il soit consommé. Dans presque toutes les activités humaines, de la chaleur est produite.

Nos activités en cuisine, automobile etc. quand vus à une échelle macro, génèrent collectivement une énorme quantité de chaleur qui est gaspillé tout le temps [10].

I. 7. 1 Stockage de l'énergie thermique par chaleur sensible

Le système de stockage de chaleur sensible (SCS) est une méthode simple qui consiste à stocker de l'énergie thermique en chauffant ou en refroidissant des matériaux comme de l'eau, du sable, des sels fondus ou des roches. L'eau est l'option la plus économique et couramment utilisée, notamment dans les applications résidentielles et industrielles. Le stockage souterrain de la chaleur sensible est également utilisé à grande échelle. Le SCS présente deux principaux avantages : il est peu coûteux et n'utilise pas de matériaux toxiques. La quantité de chaleur stockée dépend de la capacité thermique du matériau, du changement de température et de la quantité de matériau stocké[10].

I. 7. 2 Stockage de l'énergie thermique par chaleur latente :

Le stockage de la chaleur latente consiste à chauffer un matériau jusqu'à ce qu'il subisse un changement de phase, que ce soit de l'état solide à l'état liquide, de l'état liquide à l'état gazeux, ou même lors d'une transition entre différentes phases solides. Lorsque le matériau atteint la température de changement de phase, il absorbe de la chaleur pour réaliser cette transformation, ce qui correspond à la chaleur latente de fusion ou de vaporisation, selon le cas. En revanche, lorsque le matériau liquide ou gazeux est refroidi, il revient à l'état solide ou liquide en libérant la chaleur latente qu'il avait absorbée.

Lorsqu'un matériau est chauffé, il absorbe d'abord de l'énergie pour atteindre la température de changement de phase. À ce moment, l'énergie ne sert plus à chauffer le matériau, mais à réaliser le changement de phase. La chaleur est stockée de façon constante tant que la transformation n'est pas terminée. Une fois le changement de phase terminé, la température du matériau augmente à nouveau, proportionnellement à l'énergie reçue, jusqu'à atteindre celle de la source de chaleur.

Bien que la chaleur latente de fusion soit inférieure à celle de vaporisation, la transition solide-liquide est plus avantageuse car elle permet de limiter l'expansion volumique et par conséquent, l'augmentation de la pression lors du changement de phase. En effet, lors d'une fusion, l'expansion volumique ne dépasse généralement pas 10 %. Si un espace d'expansion est prévu dans le réservoir, le solide comme le liquide peuvent être contenus dans le système de stockage, ce qui permet de limiter la pression exercée sur le réservoir [11].

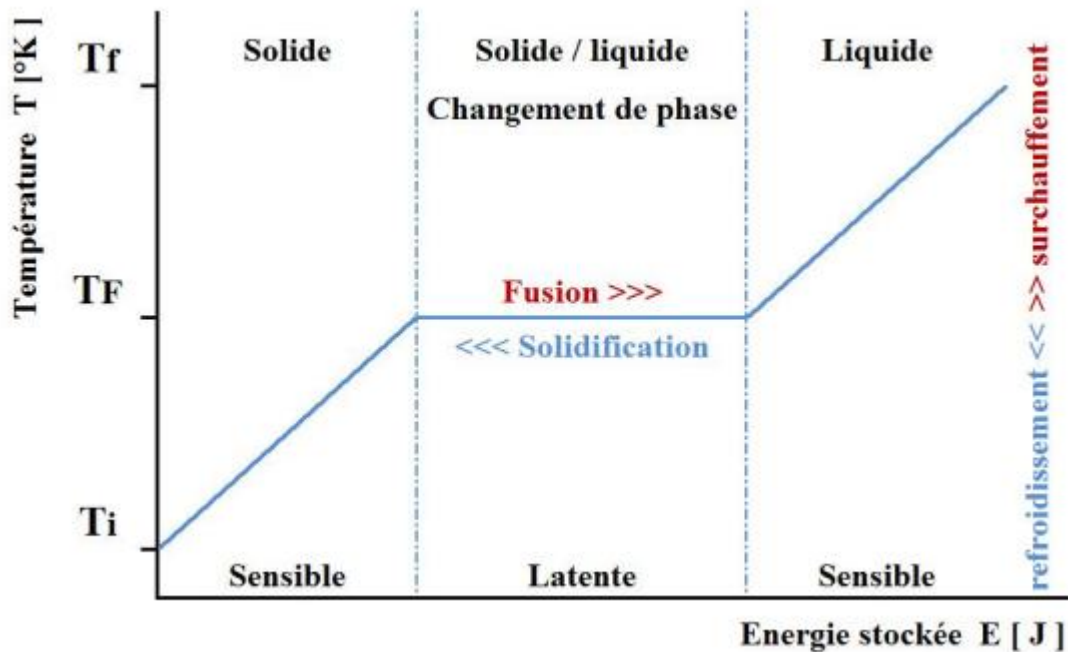


Figure I-3: Profil de changement de phase pour le stockage par chaleur latente (Solide/liquide)[11].

I. 7. 3 Stockage thermochimique

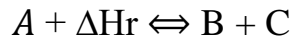
La dernière catégorie le stockage thermochimique de l'énergie repose sur l'utilisation de réactions chimiques réversibles pour emmagasiner et libérer de l'énergie. Lors de la charge, une réaction chimique est déclenchée, absorbant de l'énergie sous forme de chaleur, ce qui permet de rompre ou de former des liaisons chimiques dans les molécules impliquées. Cette énergie est alors stockée sous forme d'énergie chimique potentielle dans ces liaisons, ce qui permet de la conserver jusqu'à ce qu'elle soit nécessaire.

Lors de la décharge, la réaction chimique se renverse, libérant l'énergie chimique stockée. Cette énergie est alors convertie en chaleur ou en travail, selon l'application. La particularité du stockage thermochimique réside dans le fait que l'énergie est captée et restituée via des changements dans les structures moléculaires, ce qui permet un stockage à long terme avec une densité énergétique potentiellement élevée.

Cette technologie présente l'avantage de pouvoir stocker de l'énergie de manière stable pendant de longues périodes, sans risque de perte d'énergie significative, contrairement à d'autres formes de stockage qui peuvent souffrir de dégradation ou de fuites d'énergie au fil du

Chapitre I : Généralités sur les MCP

temps. Les systèmes thermochimiques peuvent être utilisés dans des applications de grande envergure, comme le stockage d'énergie à l'échelle industrielle ou pour les énergies renouvelables intermittentes[12].



Avec :

A : Réactif solide ou liquide

ΔH_r : Chaleur de réaction en J/mol

B et C : Produits sous forme gaz, liquide ou solide

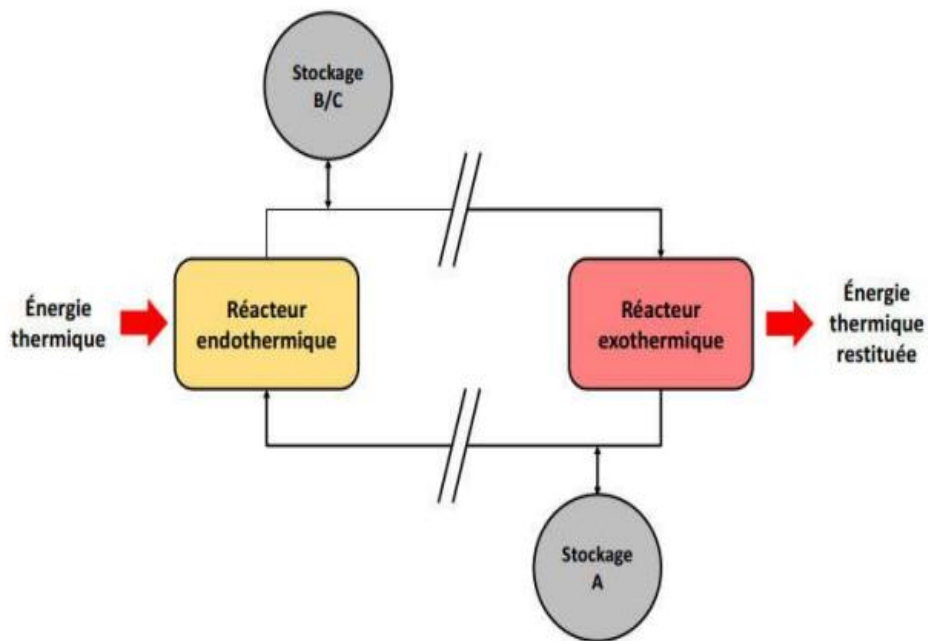


Figure I-4: Schéma de principe du stockage thermochimique[12].

I. 7. 4 Comparaison des différents types de stockage d'énergie thermique

Tableau I-5: Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur.

		Stockage par Chaleur sensible	Stockage par chaleur latente	Stockage par voie Thermochimique
Densité D'énergie	Volumétrique	Faible~ 15- 60kWh.m ⁻³	Moyenne ~ 50 -100 kWh.m ⁻³	Elevée ~ 100- 500kWh.m ⁻³
	Massique	Faible ~ 0,02- 0,03kWh.kg ⁻¹	Moyenne~ 0,05-0,1kWh.kg ⁻¹	Haute~ 0,5-1 kWh.kg ⁻¹
Température De stockage		Température de l'étape de Charge	Température de l'étape de Charge	Température de l'étape de charge ou ambiante
Durée de Stockage		Limitée (Pertes thermiques)	Limitée (Pertes Thermiques)	Théoriquement Illimitée
Transport de L'énergie		Faible distance	Faible distance	Distance Théoriquement Illimitée
Maturité		Echelle industrielle (20 MW _e)	Echelle pilote (100 kW _{th})	Echelle laboratoire (1-5 kW _{th})

I.8 Les méthodes d'encapsulation

Pour éviter les fuites lorsque le MCP est liquide et pour augmenter la surface d'échange, il est nécessaire de le conditionner. Ce conditionnement peut aussi avoir d'autres rôles : protéger le MCP de l'environnement, améliorer ses performances thermiques, agir comme barrière contre le feu ou modifier ses propriétés radiatives. Les deux principales techniques de conditionnement, la macro-encapsulation et la micro-encapsulation, sont présentées dans les paragraphes suivants[13].

I. 8. 1 Macro-encapsulation

La macro-encapsulation consiste à enfermer une grande quantité de MCP dans des capsules de formes variées comme des tubes, des poches, des blocs ou des sphères. On utilise souvent des matériaux plastiques, car ils sont peu coûteux et faciles à fabriquer. Plus la capsule n'est grande, plus le changement de phase prend du temps. C'est pourquoi on préfère utiliser des poches fines ou de petites billes pour que le transfert de chaleur soit plus rapide.

On peut envelopper le matériau à changement de phase MCP avec un film plastique ou métallique pour former une poche fine et de grande surface. Cette méthode est économique, car elle est déjà bien utilisée dans les domaines de l'alimentaire et de la santé. Cependant, quand le MCP passe de l'état solide à liquide, il augmente de volume, ce qui peut poser problème si l'enveloppe est sous vide. De plus, la macro-encapsulation peut causer de la corrosion, surtout en contact avec certains métaux : par exemple, les acides gras peuvent corroder le cuivre et les sels hydratés peuvent abîmer l'aluminium [13].



Figure I-5: MCP macro-encapsulé dans un sachet en Polyéthylène[13].

I. 8. 2 La micro-encapsulation

La micro-encapsulation consiste à enfermer le MCP dans de toutes petites capsules ou sphères, de taille micrométrique. Ces microcapsules protègent le MCP en le recouvrant d'une fine couche. Selon la façon dont le MCP est réparti à l'intérieur, les capsules peuvent être de trois types : avec un seul noyau (mononucléaires), plusieurs noyaux (polynucléaires) ou bien réparti de façon uniforme dans toute la capsule (matricielles).

Chapitre I : Généralités sur les MCP

Dans le domaine des MCP, la micro-encapsulation offre plusieurs avantages. Elle permet au MCP de fondre à l'intérieur de la capsule, ce qui limite le changement de volume pendant la transition de phase. La capsule protège aussi le MCP de l'environnement. Grâce à leur petite taille, ces microcapsules peuvent être facilement mélangées à d'autres matériaux, sans risque de fuite. Par exemple, on peut les ajouter dans des isolants comme la cellulose. En plus, comme les capsules sont très petites, cela améliore le transfert de chaleur [13].

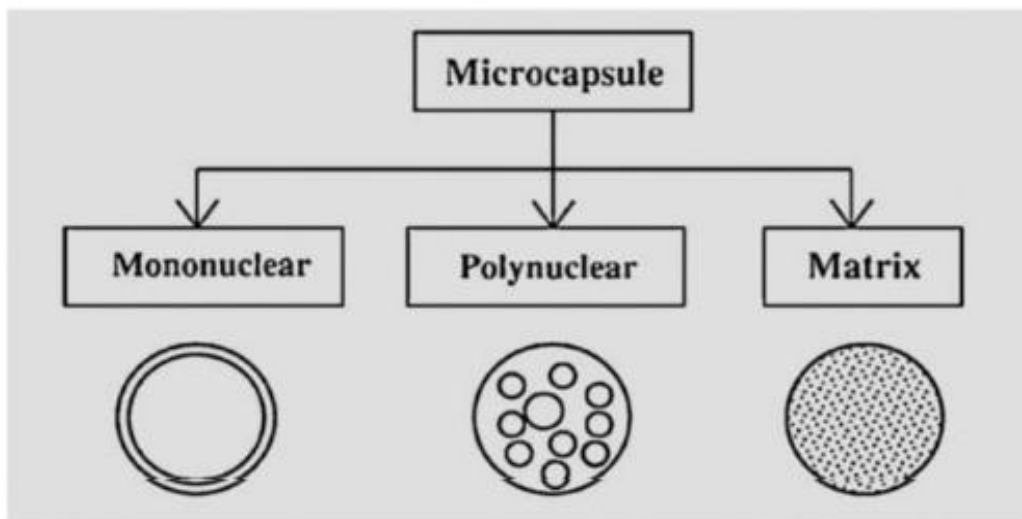


Figure I-6: Types de microcapsules.

I.9 Conclusion

Ce chapitre nous a donné l'occasion de réitérer le concept de stockage d'énergie thermique via la chaleur latente et la chaleur sensible. Les divers genres de matériaux à changement de phase et leurs modes d'emballage. Nous avons également mis en Ce chapitre Un aperçu des concepts du stockage de l'énergie thermique, avec une comparaison de ses différents types, a été présenté.

Chapitre II : R.B. Amélioration du
transfert au sein des MCP

II.1 Introduction

L'objet de ce chapitre est d'afficher les différents types d'amélioration du transfert au sein des MCP. Ces méthodes sont essentielles pour améliorer leur efficacité dans les applications réelles, les recherches récentes se concentrent sur plusieurs façons d'améliorer ces matériaux, comme l'optimisation de leurs propriétés thermiques, l'amélioration de leur conductivité thermique, et la modification de leur composition pour mieux contrôler les transitions de phase.

II.2 Différentes méthodes pour améliorer le transfert thermique au sein des MCP

D'après notre analyse bibliographique, plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour améliorer la conductivité des matériaux à changement de phase. Parmi elles, on peut citer l'ajout d'ailettes, la combinaison de différents MCP aux caractéristiques complémentaires, l'utilisation de matériaux poreux très conducteurs, ou encore l'ajout de poudres à haute conductivité thermique.

II. 2. 1 Les ailettes

Une des techniques consiste à utiliser des échangeurs de chaleur avec des ailettes fixées sur le tube où circule le fluide caloporteur. En effet, **X.Y. Zhang et al. [14]** ont fait une étude expérimentale sur le stockage et le déstockage de l'énergie. Pendant le processus de charge thermique, la température du laboratoire était d'environ 21°C, ce qui a maintenu le MCP à l'état solide. Les radiateurs électriques ont été activés pour augmenter la température de l'air à environ 35°C, ce qui a initié le processus de charge du MCP. Les résultats trouvés en améliorant la conductivité thermique du MCP, il est possible de réduire de 46 % le temps de fusion et de 35 % le temps de solidificatio

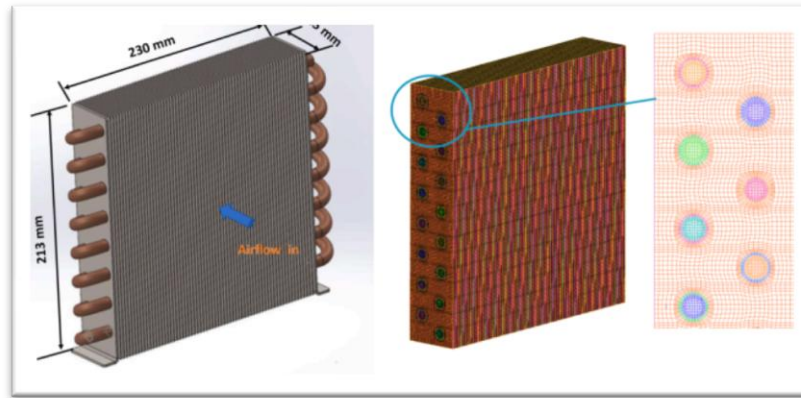


Figure II-1: Dessin 3D pour un échangeur de chaleur à tubes à ailettes MCP[14].

Par ailleurs, **Weidong Liu et al.**[15]. Dans cette étude, la surface et le nombre d'ailettes sont restés constants, tandis que seule la forme de l'ailette, maintenue à la même épaisseur et à la même longueur, a été modifiée. Il a examiné l'emplacement des ailettes sur 13 modèles affectait le transfert de chaleur de l'acide laurique en tant que MCP. La température de l'ailette a augmenté progressivement de 300 K à 318 K en raison d'un chauffage sensible. Par la suite, l'augmentation de la température a ralenti en raison de la fusion du MCP dans la zone de transition de phase, entre 316,5 K et 321,2 K. Une fois le changement de phase terminé, la température du MCP a à nouveau augmenté de manière régulière, passant de 324 K à 340 K.

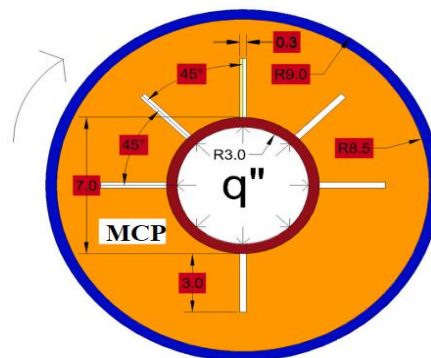
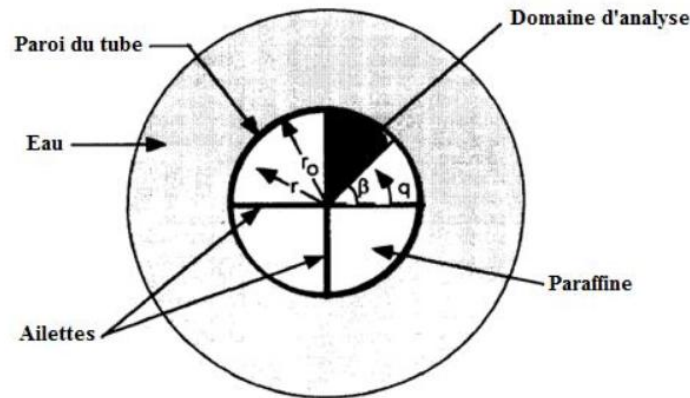


Figure II-2: Schéma du modèle 2D [15].

D'un autre côté, l'auteur **R.Velraj et al.** [16] ont étudié un système de stockage thermique composé d'un tube cylindrique vertical équipé d'ailettes internes disposées longitudinalement. Cette configuration, formant une sorte de chambre en forme de V pour le

matériau à changement de phase MCP, optimise l'agencement des ailettes. Ils ont également développé une relation entre l'enthalpie et la température, applicable aussi bien aux matériaux ayant une température de changement de phase constante qu'à ceux ayant une plage de température. En conclusion, le système avec ailettes offre un transfert de chaleur plus efficace que celui sans ailettes.



FigureII-3: Section transversale du système de stockage[16].

Toujours en relation avec l'influence des ailettes, **Ravikumar et al. [17]** ont étudié expérimentalement la solidification d'un matériau à changement de phase (MCP) avec huit ailettes longitudinales de différentes hauteurs, réparties de façon uniforme dans l'espace annulaire figure II.4. Ils ont observé que l'ajout des ailettes ralentit le refroidissement du MCP liquide, principalement à cause de l'absence de convection naturelle. Ainsi, les conditions de refroidissement et la présence des ailettes influencent la vitesse de solidification. Les résultats montrent que plus la température du fluide caloporteur est basse, plus le MCP se solidifie rapidement. Cet effet est encore plus marqué lorsque la vitesse du fluide est élevée.

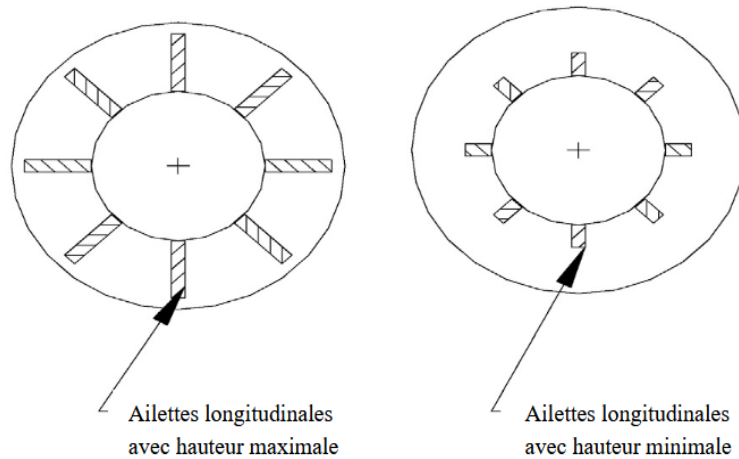


Figure II-4: Coupe transversale de la section de test avec ailettes de la hauteur maximale et minimale[17].

Hosseini et al. [18], ont montré que l’ajout d’ailettes permet de réduire le temps de fusion et d’améliorer la pénétration de la chaleur. De plus, augmenter la hauteur des ailettes est plus efficace quand le nombre de Stefan est faible.



Figure II-5: Vue 3D des échangeurs de chaleur contenant MCP avec ailettes de 13 et 26 mm.[18].

Contrairement aux études évoquées précédemment, **Sciacovelli et al. [19]** ont exploré un nouvel aspect lié à la géométrie des ailettes, en comparant la forme en Y à celle en double bifurcation figureII-6. Grâce à une étude numérique, ils ont mis en évidence l’avantage de la configuration à double bifurcation, qui permet une amélioration de l’efficacité du système de 24 % par rapport à la forme en Y.

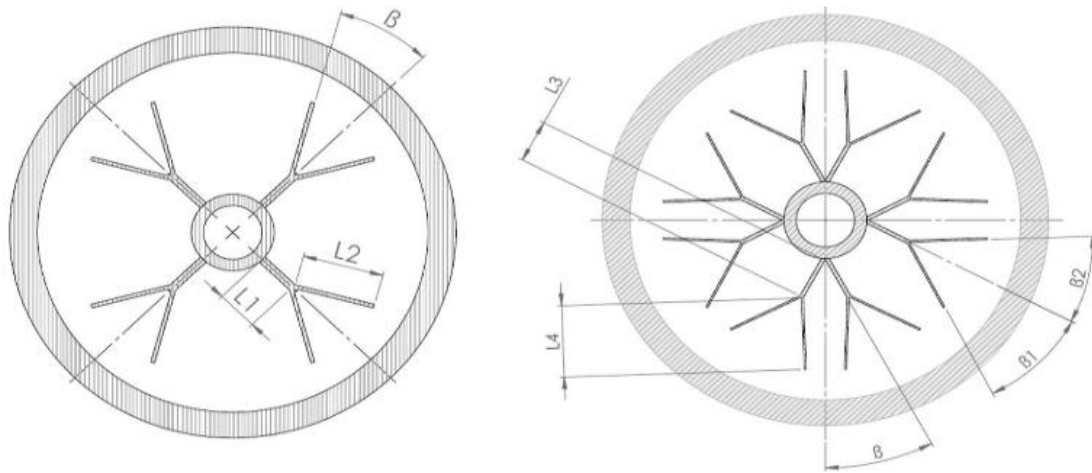


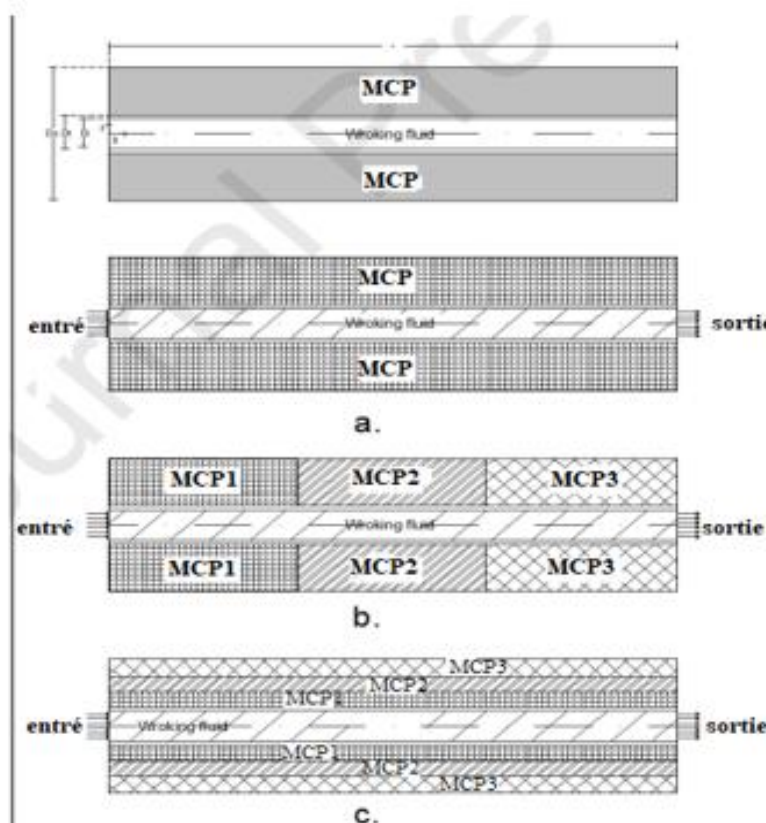
Figure II-6: Configurations des ailettes (Gauche) bifurcation unique. (Droite) Double [19].

II. 2. 2 Combinaison de plusieurs MCP

Une autre méthode efficace, déjà citée, est d'utiliser plusieurs matériaux à changement de phase au lieu d'un seul. On peut par exemple citer l'étude d'Omer S et al [20] ; Cette étude a analysé les performances de l'utilisation de différentes familles de MCP, présentant des températures de fusion variées, dans divers segments d'un échangeur de chaleur disposé horizontalement. La méthode repose sur le principe selon lequel le transfert de chaleur est proportionnel à la différence de température.

Ils ont trouvé que la disposition parallèle améliore légèrement le transfert de chaleur par conduction, mais réduit le transfert par convection naturelle par rapport à une configuration simple.

Les configurations et en série favorisent deux le de chaleur par convection

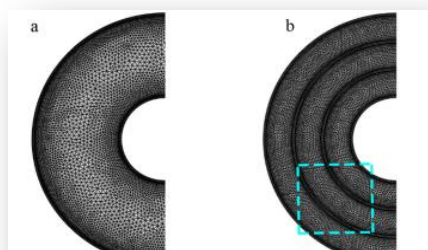


MCP
simples
toutes
transfert
naturelle.

Figure II-7: Différents agencements étudiés. (a) MCP simple. (b) Multi-MCP en série. (c) Multi-MCP en parallèle [20].

Hadi Mohammad jafari Sadeghi et al [21] ; Cette étude explore l'impact de l'utilisation de différentes couches de MCP, avec des épaisseurs variées, sur les caractéristiques thermiques des processus de solidification et de fusion dans un échangeur de chaleur annulaire sur trois cycles consécutifs. Afin d'examiner une large plage de températures de fusion (31–70 °C) et de capacités de chaleur latente (150 000–260 000 J/kg), sept MCP distincts sont utilisés. De plus, l'influence des épaisseurs et des configurations des couches de MCP est analysée pour des systèmes comportant trois et cinq couches.

L'utilisation de MCP avec les températures de fusion les plus basses près des limites froides et les plus élevées près des limites chaudes favorise une augmentation significative de la fraction liquide tout au long du processus.



FigureII-8: Grille ((a) une couche ; (b) trois couches ; (c) cinq couches ; (d) zoom sur la grille pour trois couches) [21].

Idris Al Siyabia et al [22] ; a fait une étude numérique sur le stockage multiple de MCP. Ce dernier apporte une contribution significative au domaine en adoptant une approche numérique pour analyser diverses organisationsde MCP et les conditions de fonctionnement du fluide caloporteur. Le modèle CFD, validé à l'aide de résultats expérimentaux, permet d'explorer un plus large éventail de géométries et de configurations de systèmes de stockage thermique pour l'organisation de plusieurs MCP.

Les résultats montrent que l'augmentation du rayon de stockage de 50 % conduit à une fraction de fusion plus élevée tandis que le doublement du rayon diminue la fraction de fusion du MCP.



Figure II-9: (a) du récipient MCP et (b) du tube FTC montrant les emplacements des thermocouples[22].

II. 2. 3 Mousses métalliques

Parmi les techniques visant à améliorer la conductivité des MCP, l'utilisation de mousses métalliques se distingue comme l'une des plus efficaces. D'ailleurs, **Zhenyu Liu et al.** [23] ont démontré sur le plan théorique que l'utilisation d'une mousse métallique peut améliorer le transfert de chaleur jusqu'à un facteur 7 par rapport à celui obtenu avec un matériau à changement de phase MCP pur.

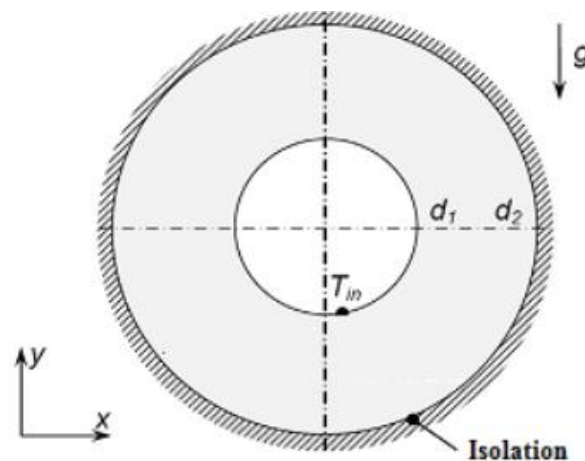
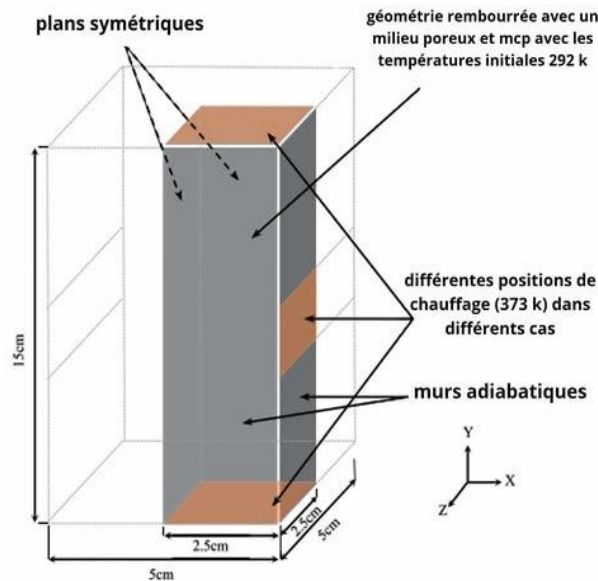


Figure II-10: Le modèle physique pour la simulation bidimensionnelle ($d_1 = 40$ mm et $d_2 = 82$ mm)[23].

Sardari et al [24] On étudie l'analyse de manière numérique les performances du processus de fusion pour un stockage de chaleur utilisant un MCP dans un système placé dans un conteneur vertical, avec une mousse métallique en cuivre. L'utilisation d'une mousse

métallique à segments multiples, ainsi que l'influence de la position du chauffage dans le système. Les résultats sont présentés sous forme de courbes de contours et de diagrammes, mettant en évidence l'évolution de la fraction liquide et de la température.

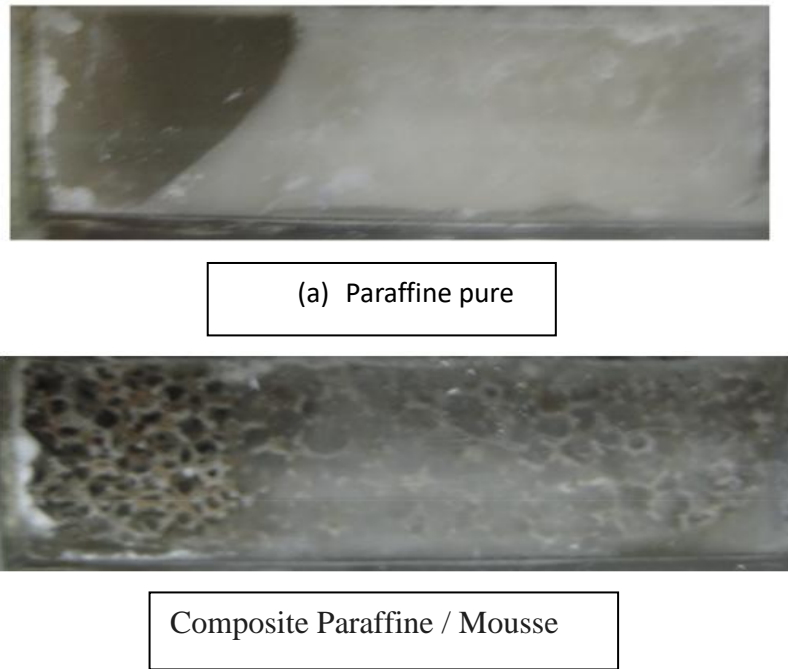
Ils ont trouvé que pour réduire le temps de fusion de près de 85 %. En changeant l'emplacement du chauffage à température constante de du bas vers la surface latérale et



supérieure, le temps de fusion diminue respectivement de 70,5 % et 4,7 %.

Figure II-11: Le schéma de la géométrie étudiée (pas à l'échelle)[24].

Z. Chen et al. [25] ont présenté un système où les dimensions sont de 25 cm × 25 cm × 25 cm. La face inférieure du système est maintenue à 353 K, tandis que toutes les autres faces sont considérées comme adiabatiques. La température initiale du système est de 298 K. L'espacement de la grille initiale pour la création de la géométrie est de 0,25 mm, et pour la résolution de l'équation énergétique, un espacement final de 2,5 mm est adopté. Le pas de temps est fixé à 0,01 s. D'après la figure II.12, le modèle de fusion de la paraffine avec et sans la mousse métallique a été représenté. Les photos ont été prises à 90 min. Contrairement à la paraffine pure sans mousse métallique, le comportement de fusion avec la mousse métallique montre une progression presque parallèle au mur chaud, ce qui indique que la fusion est principalement due à la conduction. Cela s'explique par la conductivité élevée du système MCP/mousse et la réduction des effets de la convection naturelle.



FigureII-12: Comparaison de la forme de l'interface entre la paraffine pure et le composite paraffine/mousse à 90 min (vue de face)[25].

B.V.S. Dinesh et al. [26] on fait une étude numérique sur les caractéristiques d'absorption d'énergie d'un matériau à changement de phase MCP systèmes de stockage d'énergie améliorés avec une structure en mousse métallique. En particulier, l'effet de La géométrie de la mousse métallique sur l'absorption d'énergie totale et la fusion du MCP est analysé.

Les simulations montrent que le taux de stockage d'énergie augmente lorsque la taille des pores diminue, grâce à une plus grande surface de transfert de chaleur entre la mousse métallique et le MCP. Ils ont trouvé que pour une courte durée, une porosité plus faible et un chevauchement des pores sont avantageux, tandis que pour une durée plus longue, l'effet inverse est observé.

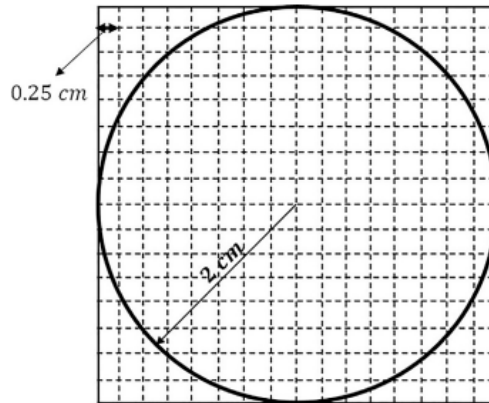


Figure II-13: Coupe transversale d'un pore typique avec la grille finale pour le calcul du transfert de chaleur montrant la taille relative des pores par rapport à l'espacement de la grille[26].

M. Esapour et al. [27] ont fait une analyse numérique sur les processus de fusion et de solidification de matériaux à changement de phase intégrés dans une mousse poreuse métallique figure II.14, au sein d'un échangeur de chaleur multitubes, sous des conditions thermiques locales de non-équilibre. Le RT35 est utilisé comme matériau à changement de phase dans la coque centrale de l'échangeur 3D, tandis que l'eau circule dans les tubes internes et externes comme fluide caloporteur.

Lors de la fusion et de la solidification du MCP pur, en raison de la diminution du gradient de température entre le fluide caloporteur et le MCP dans la direction axiale, les quantités de MCP fondu et solidifié à l'entrée des échangeurs de chaleur sont supérieures à celles de la section finale.

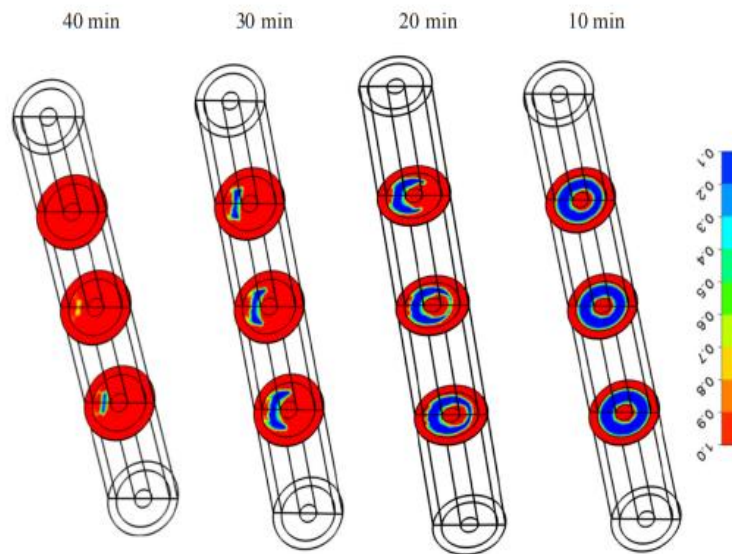


Figure II-14: Contours de fraction liquide pour la fusion de MCP pur[27].

II. 2. 4 Nano particules

Y. Pahamli et al.[28] On fait une étude numérique et expérimentale figure II-15. Cette étude explore la fusion d'un MCP dans un échangeur de chaleur à coque et tube. Le MCP utilisé est la paraffine RT-50, située dans un espace annulaire entre la coque et le tube interne. Différentes fractions massiques de nanoparticules et angles d'inclinaison de l'échangeur de chaleur sont considérés. L'impact de ces deux facteurs (fraction massique de nanoparticules et angles d'inclinaison) sur la distribution de la température, les lignes de courant, le front de fusion et le temps de fusion a été étudié.

En augmentant la fraction massique de nanoparticules, la conductivité thermique augmente, ce qui permet aux tourbillons de pénétrer plus profondément dans les zones inférieures de l'échangeur de chaleur et accélère la fusion. Augmenter l'angle d'inclinaison et ajouter des nanoparticules au MCP améliore le transfert de chaleur et les performances du système.

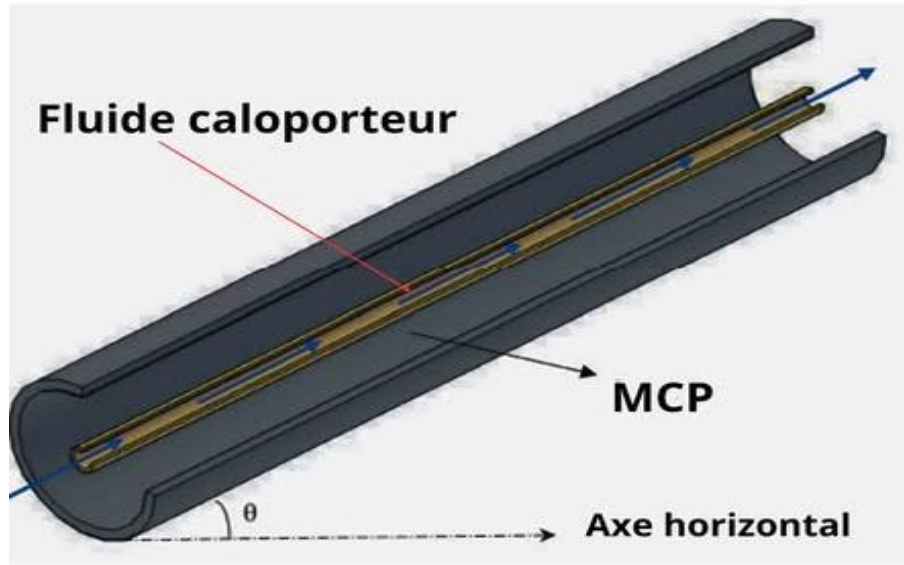


Figure II-15: Configuration du modèle physique[28].

D'un autre côté, le même auteur **M. Nitsas et al.** [29] on fait une analyse expérimentale du MCP RT50 dans trois cas : pur, composite et MCP hybride. Une plateforme expérimentale est construite, et l'eau est utilisée comme fluide caloporteur figureII-16. Deux types de nanoparticules, cuivre et Al_2O_3 , sont utilisés. Les performances thermiques du MCP dans l'échangeur de chaleur sont étudiées lors des processus de charge thermique et de solidification. Le MCP RT50, de type paraffine, fond complètement entre $45,3^{\circ}C$ et $50,8^{\circ}C$. Cette plage de température, déterminée par les tests expérimentaux, correspond aux



spécifications fournies par le fabricant.

FigureII-16: Photographie de la poudre de nanoparticules Al_2O_3 avant ajout au MCP[29].

F. Selimefendigil et al [30] ont réalisé une étude numérique (figure II.17), à l'aide de la méthode des éléments finis, l'impact de la séparation des flux sur les performances d'une configuration thermo fluide intégrée au MCP. Différentes formes de nanoparticules d'alumine (sphériques, en lame, en brique et cylindriques) sont considérées, avec de l'eau comme fluide caloporteur.

Les performances du système intégré MCP se dégradent avec l'expansion de la zone, mais cela peut être compensé en ajoutant des nanoparticules au fluide caloporteur. Le facteur de forme des nanoparticules peut également améliorer davantage les performances.

Parmi les différentes formes de particules, les cylindriques offrent les meilleures performances. Le temps de charge est réduit de 23,8 %, 16,6 %, 10,7 % et 8,3 % pour les nano fluides à particules cylindriques, en lame, en brique et sphériques, respectivement, par rapport à l'eau pure à la fraction volumique la plus élevée.

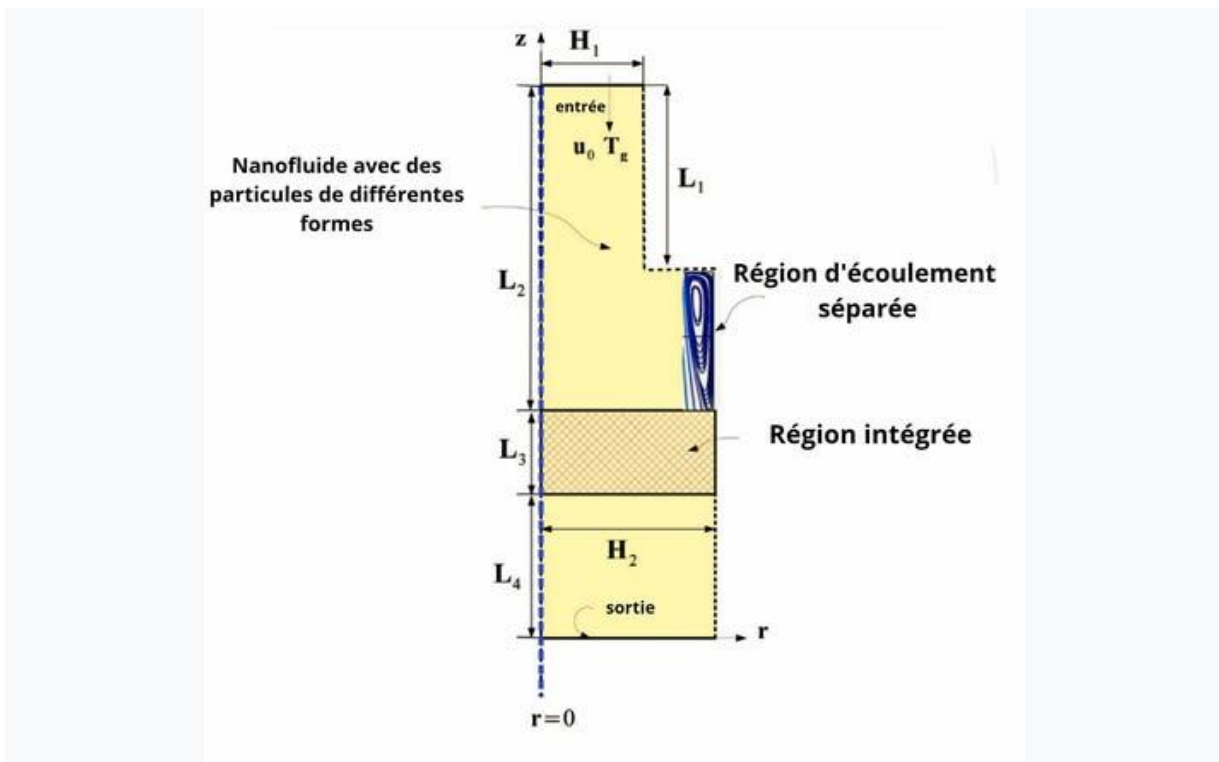


Figure II-17: Vue schématique du modèle symétrique d'axe installé par MCP avec zone soudaine expansion[30].

Toujours en relation avec l'influence des nanoparticules **J.M. Mahdi et al [31]**. Ont analysé numériquement l'impact de la dispersion de particules de nano alumine (Al_2O_3) sur les performances de solidification de la paraffine RT-82, utilisée comme matériau à

changement de phase, dans un échangeur de chaleur à tubes triplex. Dans la figure II-18, le MCP se trouve dans l'espace annulaire entre le tube intérieur et le tube intermédiaire, tandis que le fluide caloporteur circule dans les tubes intérieur et extérieur. Ils ont trouvé la présence de nanoparticules d'alumine améliore les performances thermiques de la paraffine et permet d'accélérer son taux de solidification et la dispersion des nanoparticules accélère la solidification, avec un gain de temps observé pour toutes les fractions volumiques étudiées. Le plus grand gain (environ 20 %) se produit avec une fraction volumique de 8 % de nanoparticules.

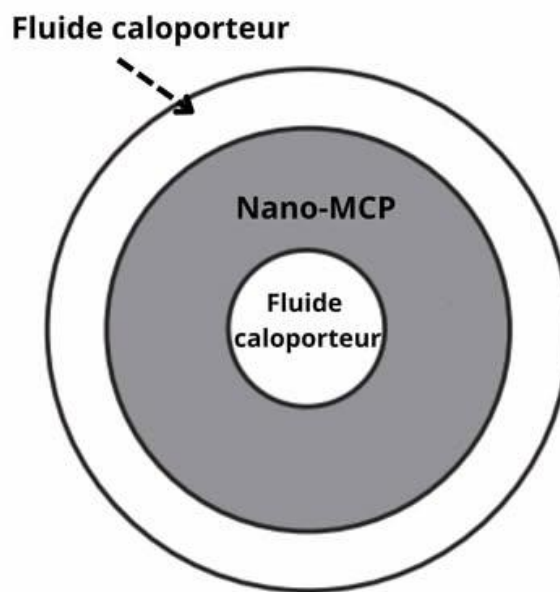


Figure II-18: Diagrammes schématiques de la géométrie de l'échangeur de chaleur à tube triplex[31].

II. 2. 5 Augmentation du nombre des tubes où circule le fluide caloporteur

Francis et al [32] ont comparées expérimentalement deux configurations figure II-19 l'une composée d'un seul tube, et l'autre d'un ensemble de quatre tubes. Le système multitubulaire s'est révélé plus performant en matière de transfert de chaleur lors de la phase de charge, tout en fournissant une température de sortie compatible avec les exigences d'un système de refroidissement par absorption.

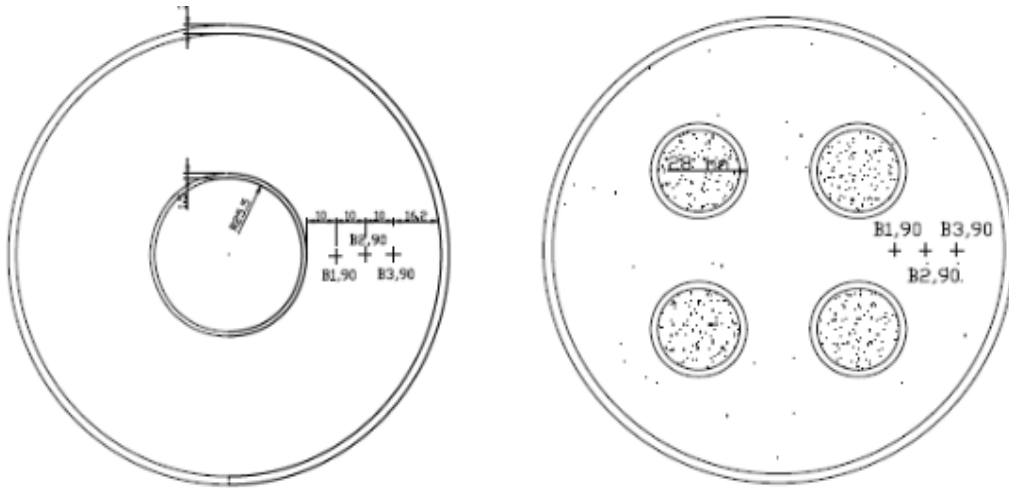
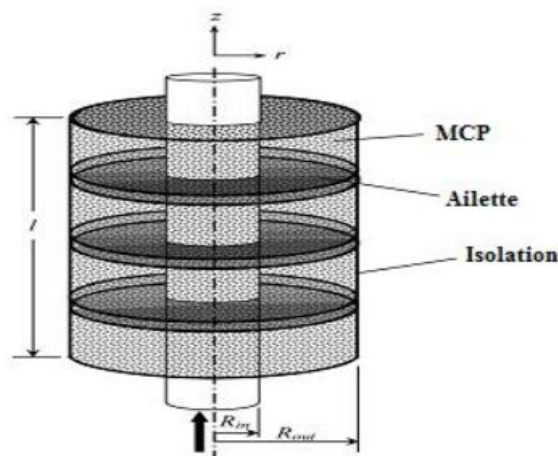


Figure II-19: Système avec un tube (gauche) et multitube (droite) contenant le fluide caloporteur[32].

II. 2. 6 Forme de l'espace contenant le MCP

La géométrie de l'enveloppe contenant le matériau à changement de phase influence également le transfert de chaleur. **A.H. Mossffa and al. [33]** Un modèle analytique approximatif a été amélioré pour étudier le processus de solidification dans une enceinte de stockage de chaleur. Une étude comparative a été réalisée sur la solidification du matériau à changement de phase MCP dans deux types d'enveloppes : l'une cylindrique figureII-20 et l'autre rectangulaire présentant le même volume et la même surface d'échange thermique. Les résultats ont montré que la vitesse de solidification du MCP est plus élevée dans l'enveloppe cylindrique est supérieur à celle de l'enveloppe rectangulaire.



FigureII-20: Schéma du système de stockage thermique[33].

D'autre part **Ahmad Ali et al. [34]** ont analysé le processus de fusion d'un matériau à changement de phase MCP entre deux cylindres disposés de manière concentrique et excentrique figureII-21. Ils ont conclu que le déplacement du tube intérieur en dessous de l'axe central entraîne une augmentation significative du taux de fusion.

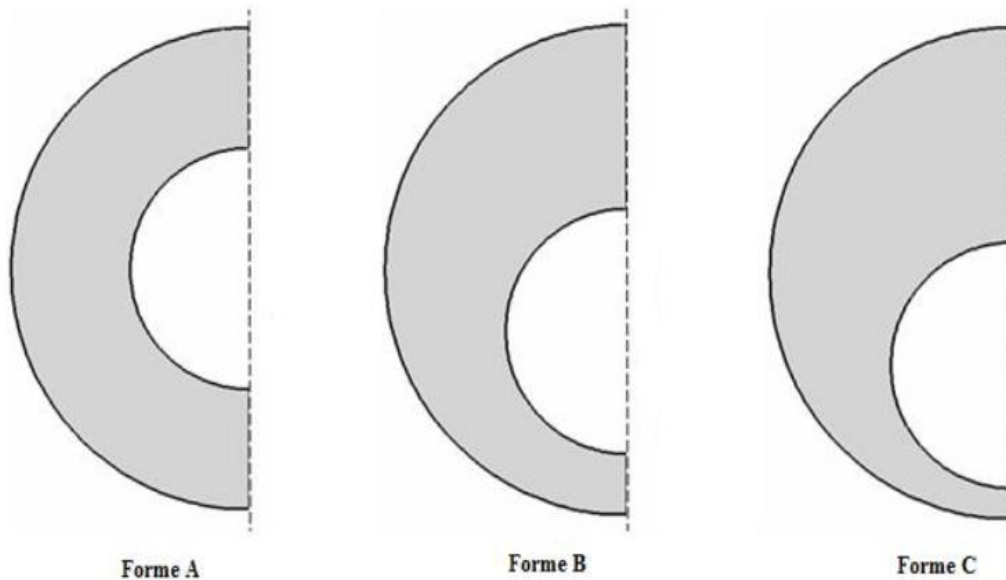


Figure II-21: Schéma du domaine de calcul[34].

II.3 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de reconnaître de plusieurs types d'améliorations du transfert thermique dans les seins des MCP. Cette amélioration est importante pour optimiser leur utilisation dans différentes applications, et aider à développer des technologies plus durables et efficaces pour la gestion thermique et le stockage d'énergie.

Chapitre III : Problématique

III.1 Introduction

L'utilisation des matériaux à changement de phase pour le stockage est un moyen efficace si on peut améliorer le transfert de chaleur entre le fluide caloporteur et le matériau à changement de phase. Dans ce chapitre on va présenter notre travail et les différentes étapes et les dimensions de la géométrie. Nous exprimons ainsi l'équation de continuité, de mouvement et de l'énergie.

III. 1. 1 Géométrie

Le système de stockage dans notre travail est un échangeur de chaleur à double tube en ajoutant des ailettes longitudinales. L'importance d'utiliser les échangeurs est d'augmenter la surface d'échange thermique entre le matériau à changement de phase et le fluide caloporteur. Ce dernier circule dans tubes intérieur. Le tube extérieur est utilisé pour le matériau à changement de phase.

Pour cela on a utilisé un logiciel GAMBIT qui permet de créer des géométries, de définir des conditions aux limites et de générer des maillages pour des simulations de dynamique des fluides numériques (CFD). Il est souvent utilisé en combinaison avec le logiciel FLUENT6.3.26, qui réalise ensuite les calculs de simulation.

Dans notre étude, nous avons pris les paramètres géométriques d'**A. Abduljalil et al. [35]** qui ont fait une étude numérique modélisé en 2D sur la fusion de MCP dans échangeur de chaleur avec ailettes internes.

La figure III.1 représente le modèle physique. Le rayon du tube intérieur est de 25,4 mm et une épaisseur de 1,2 mm, et le rayon du tube extérieur est de 75 mm pour une épaisseur de 2 mm.

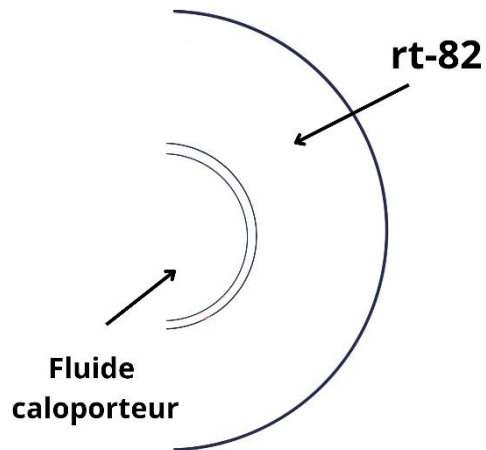


Figure III-1: Configuration étudiée pour le premier cas.

Pour l'amélioration dans le deuxième cas figure III.2 on a ajouté une ailette en cuivre de longueur 33.4 mm et de 1 mm d'épaisseur inclinai de 60 ° par rapport à l'origine.

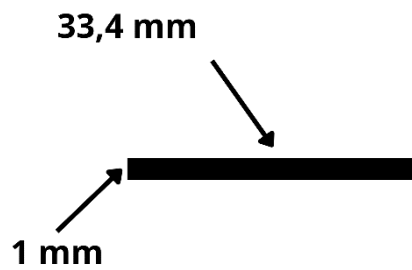


Figure III-2: Géométrie de l'ailette

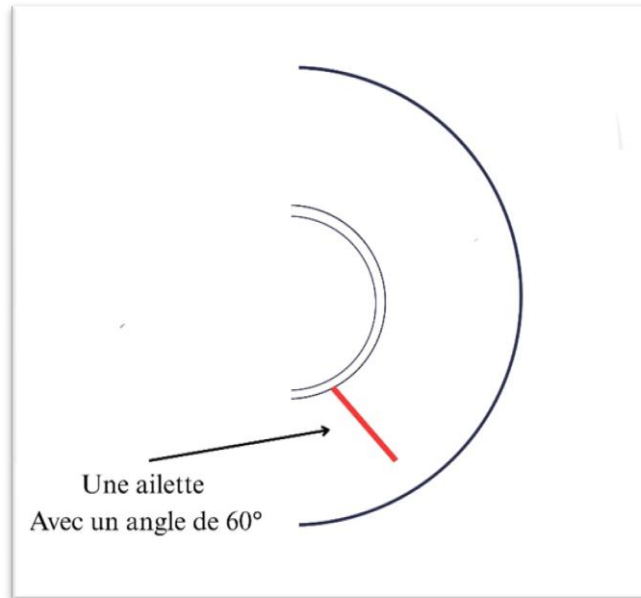


Figure III-3: Configuration étudiée pour le deuxième cas.

Dans le troisième cas, une seconde ailette de même épaisseur a été ajoutée, inclinée à 30° , comme le montre la figure III.3.

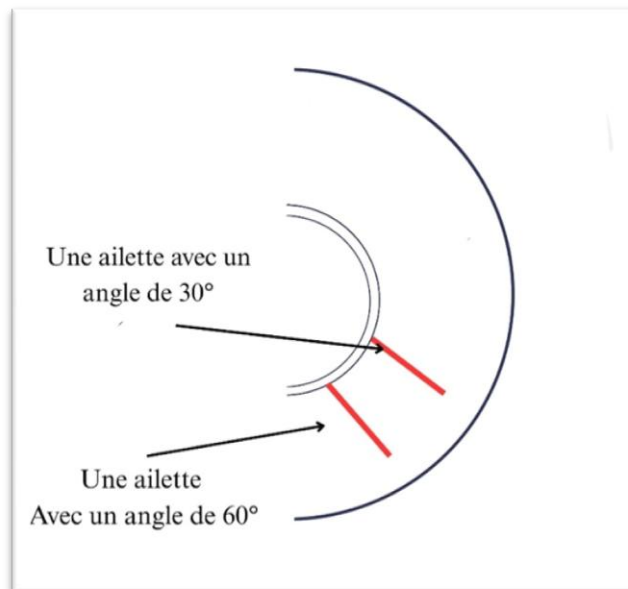


Figure III-4: Configuration étudiée pour le troisième cas.

Dans le quatrième cas, les deux ailettes ont été conservées, mais la température du fluide caloporteur a été réduite à 358 K.

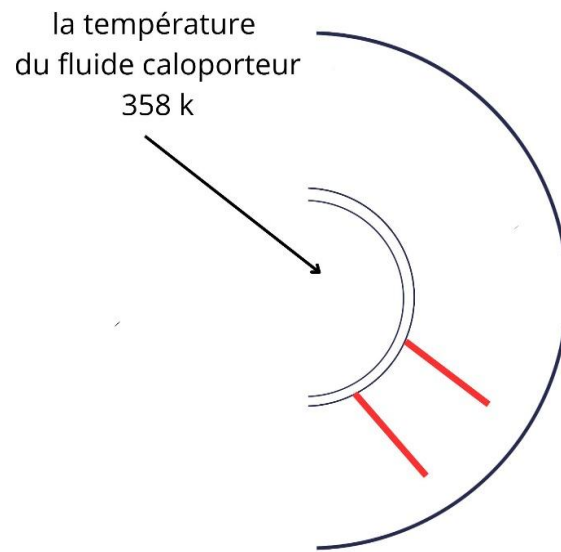


Figure III-5: Configuration étudiée pour le quatrième cas.

Pour la dernière simulation on change la température du fluide mais cette fois en 368 k.

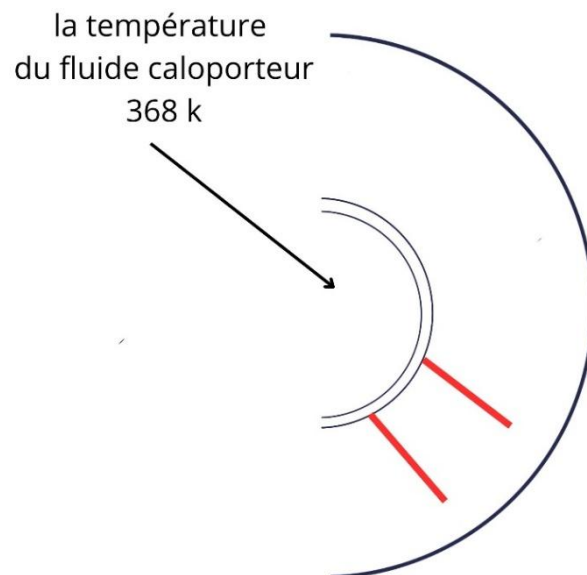


Figure III-6: Configuration étudiée pour le dernier cas.

Le MCP utilisé dans cette étude est le RT82. Il s'agit d'un MCP commercial fabriqué par RUBITHERM (www.rubitherm.de) de famille organique type paraffine purifiée sa nature est un mélange d'alcane linéaires (hydrocarbures saturés).

Les paramètres thermo-physiques de ce MCP est cité dans le tableau III.1.

Tableau III-1: Propriétés thermo-physiques des différents matériaux utilisés.

	Masse volumique (kg/m ³)	Chaleur spécifique (J/kg.K)	Chaleur latente (J/kg)	Température de fusion (K)	Conductivité thermique (W/m.K)	Coefficient d'expansion thermique (1/K)	Viscosité dynamique (kg/m.s)
RT82	950 (solide) 770 (liquide)	2000	176000	350-358	0.2	0.001	0.03499
Cuivre	8978	381	-	-	387.6	-	-

III. 1. 2 Les hypothèses

- L'écoulement est bidimensionnel, incompressible, laminaire et instationnaire.
- Le MCP liquide est supposé Newtonien.
- L'effet de la convection naturelle est considéré.
- Le changement du volume au cours du changement de phase est négligé.
- L'extérieur de tube est supposé adiabatique.

III. 1. 3 Modèle mathématique

- L'équation de continuité :

$$\partial_t(\rho) + \partial_i(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

- Equations de mouvement :

$$\partial_t(\rho u_i) + \partial_j(\rho u_i u_j) = \mu \partial_{jj} u_i - \partial_i p + \rho g_i + S_i \quad (2)$$

- Equations de l'énergie :

$$\partial_i(\rho h) + \partial_i(\rho \Delta H) + \partial_i(\rho u_i h) = \partial_i(k \partial_i T) \quad (3)$$

Où ρ est la densité du PCM (RT82), u_i est la vitesse du fluide, μ la viscosité dynamique, p la pression, g l'accélération de la gravité, k est la conductivité thermique et h est l'enthalpie sensible.

III. 1. 4 Conditions initiales et aux limites

A $t = 0$, le matériau à changement de phase a une température de 300 K.

Le tube intérieur est mis à une température constante de 363 K. La Paroi extérieure est considérée comme adiabatique.

A cause de la symétrie, seule la moitié du système sera étudié. La figure III.6 représente les conditions aux limites et le domaine de calcul.

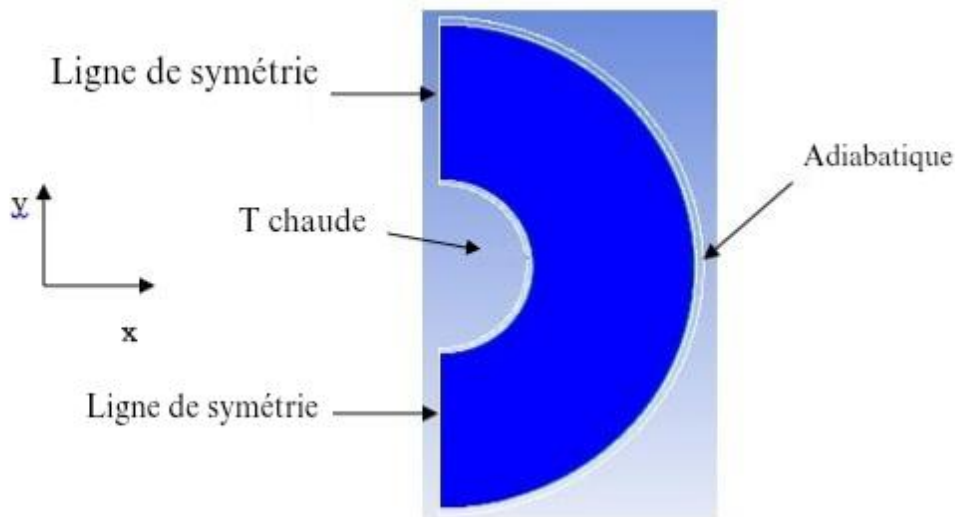


Figure III-7: Domaine du calcul.

III. 1. 5 Résolution numérique

Le modèle mathématique présenté précédemment par des équations différentielles est transformé à un système d'équations algébriques à l'aide de la méthode des volumes finis c'est une méthode numérique utilisée principalement pour résoudre les équations aux dérivées partielles, notamment dans le domaine de la mécanique des fluides, transfert de chaleur, électromagnétisme, et problèmes de transport. Cette méthode consiste à Diviser le domaine physique en un ensemble de petits volumes et Intégrer les équations de conservation (masse, énergie, quantité de mouvement, etc.) sur chaque petit volume [36].

Le calcul numérique est fait en utilisant un code commercial Fluent 6.3.26, c'est un code de simulation en mécanique des fluides numériques (CFD). Il permet de modéliser et de résoudre des écoulements de fluides, des transferts de chaleur, des réactions chimiques, et d'autres phénomènes physiques complexes à l'aide de méthodes numériques.

Pour faire ce calcul, Une géométrie de deux dimensions est dessinée et maillée dans le logiciel Gambit. Ce logiciel nous permet aussi de définir les couches limites et les types des zones. Le maillage est ensuite exporté vers Fluent.

Pour une meilleure précision et une meilleure stabilité, nous avons utilisé un maillage quadratique régulier structuré.

La figure III.7 montre un maillage utilisé dans la première simulation.

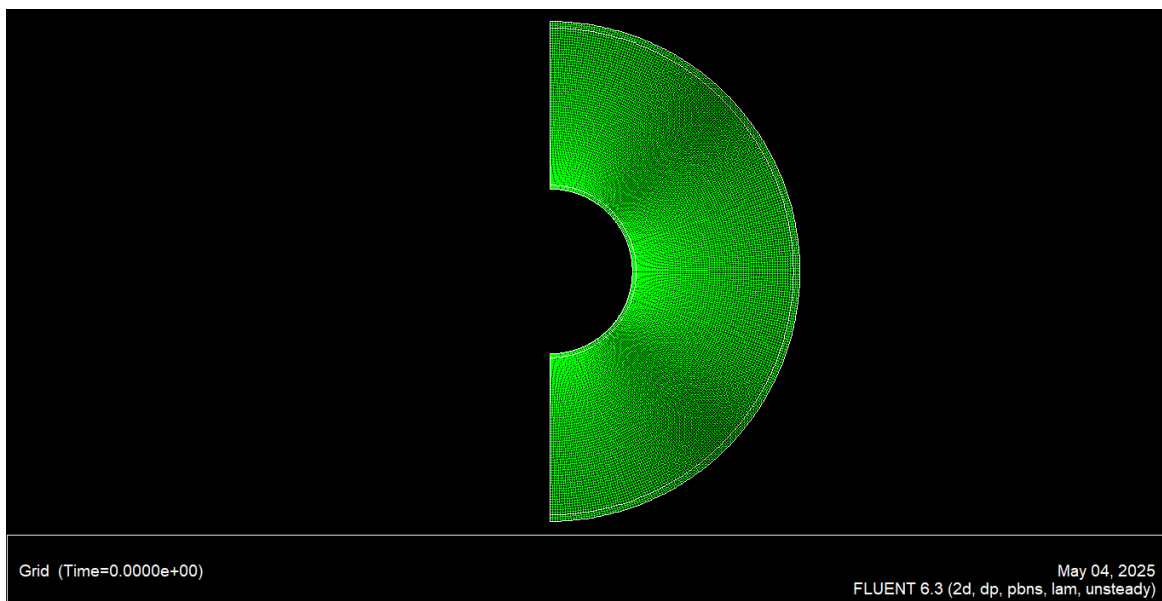


Figure III-8: maillage du premier cas.

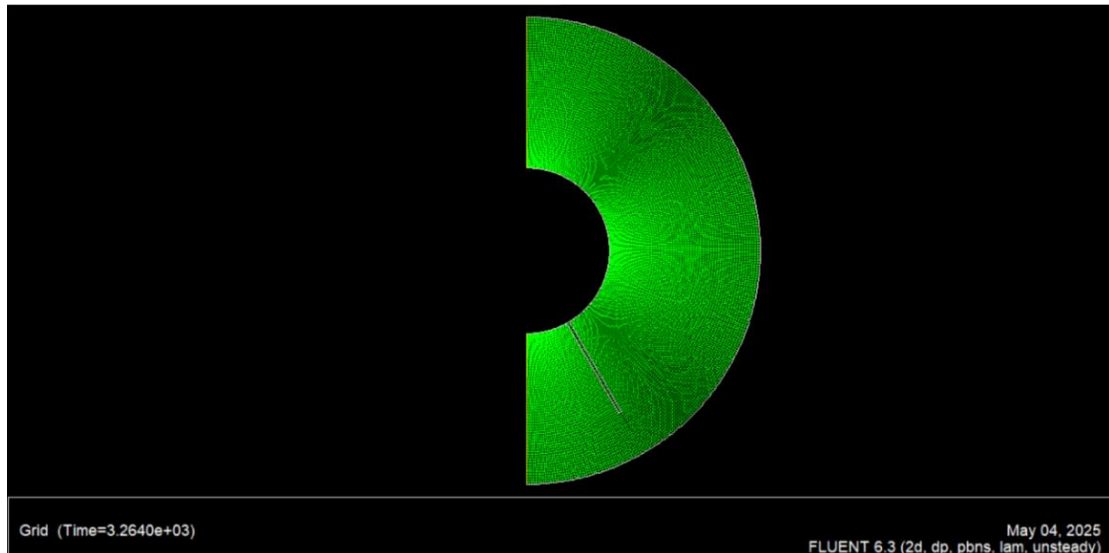


Figure III-9: Géométrie du deuxième cas après maillage.

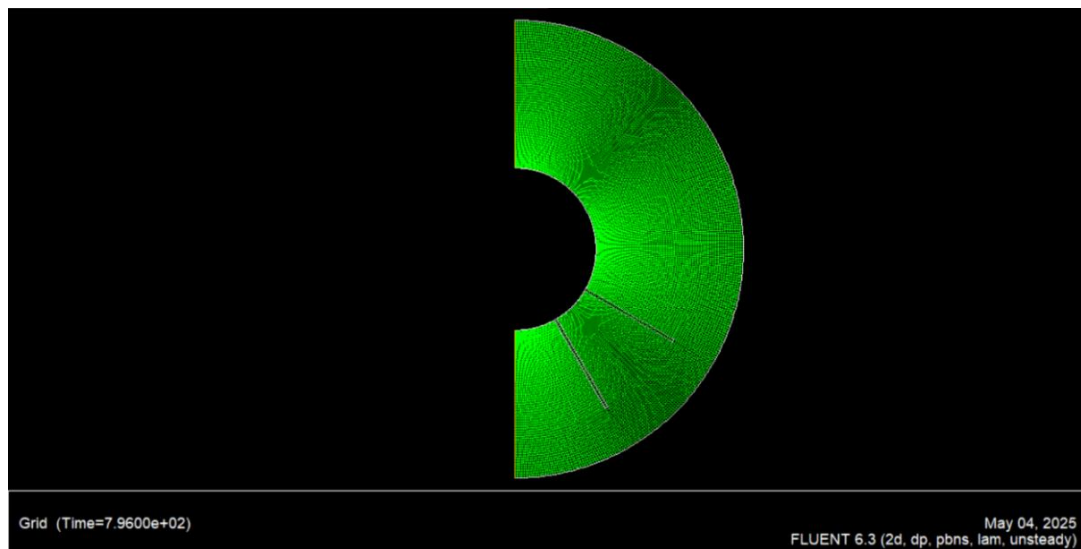


Figure III-10: Géométrie du troisième cas après maillage.

Pour la géométrie utiliser dans les dernières simulations sont les mêmes que dans le troisième cas.

III.2 Conclusion

Cette étude a porté sur la simulation numérique d'un échangeur de chaleur à ailettes longitudinales en géométrie bidimensionnelle, dans le but d'analyser le changement de phase et améliorer la conductivité thermique, le caractère adiabatique de l'extérieur de cette surface a permis de mieux cerner l'impact des ailettes et la température du fluide caloporteur sur la distribution de température dans la surface d'échange.

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1 Introduction

Nous exposons dans ce chapitre les principaux résultats issus de notre modélisation numérique en 2D. Nous avons étudié l'évolution de fusion de MCP, l'évolution de la température et le pourcentage de la fraction liquide en fonction du temps ainsi que l'effet des ailettes et de la température du fluide caloporteur sur la fusion. La géométrie et les conditions aux limites sont présentées au chapitre III.

IV. 1. 1 Résolution numérique

Afin de déterminer un maillage optimal, plusieurs simulations ont été réalisées en variant le nombre de cellules : 12 642, 14 994, 18 522, 21 168 et 24 696. La figure IV.1 présente l'évolution de la fraction liquide en fonction du temps pour ces différentes résolutions. On observe que les résultats obtenus avec 21 168 et 24 696 cellules se superposent, indiquant une convergence de la solution. Ainsi, le maillage optimal a été fixé à 21 168 cellules, offrant une précision suffisante tout en limitant les coûts de calcul.

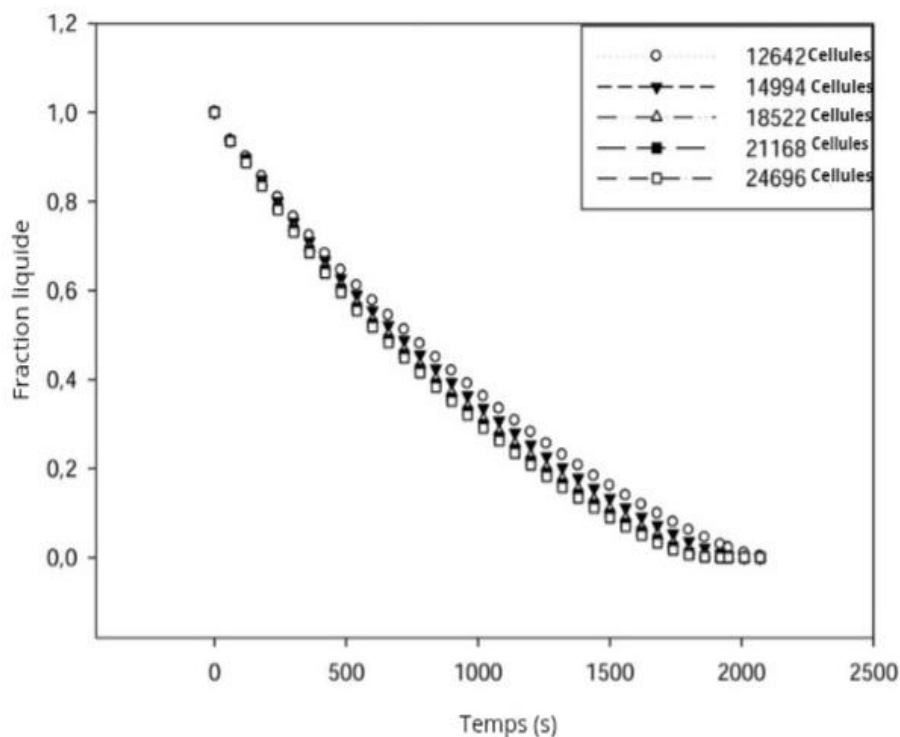
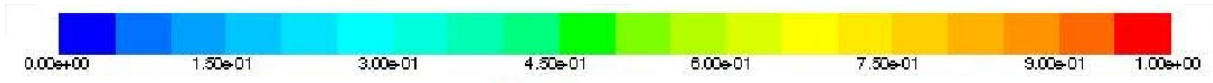


Figure IV-1:Dépendance de la taille de la grille de la solution numérique.

IV. 1. 2 L'effet des ailettes

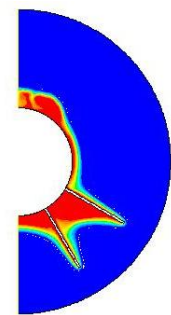
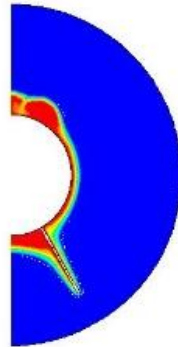
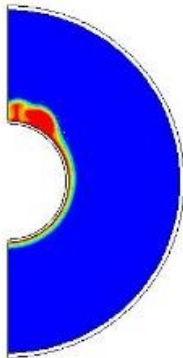
IV. 1. 2. 1 Contours de la fraction liquide



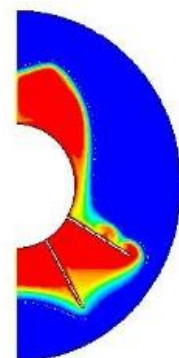
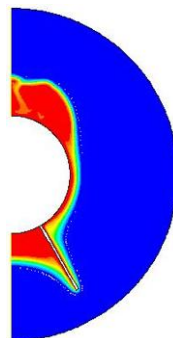
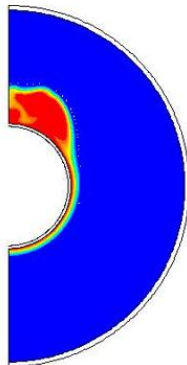
Sans ailette

avec 1 ailette

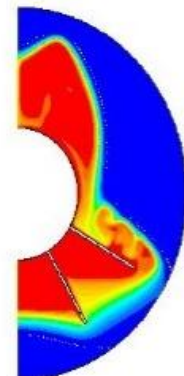
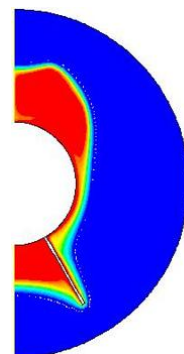
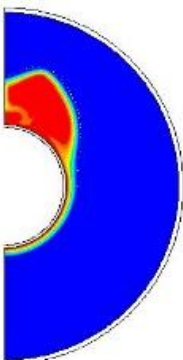
avec 2 ailettes



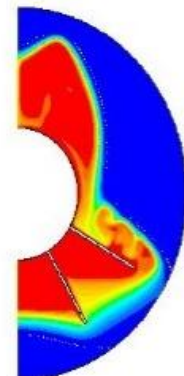
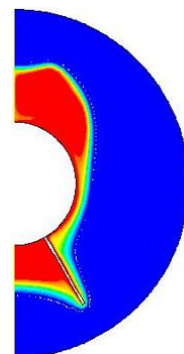
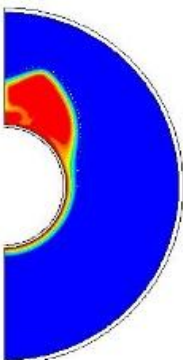
30 min

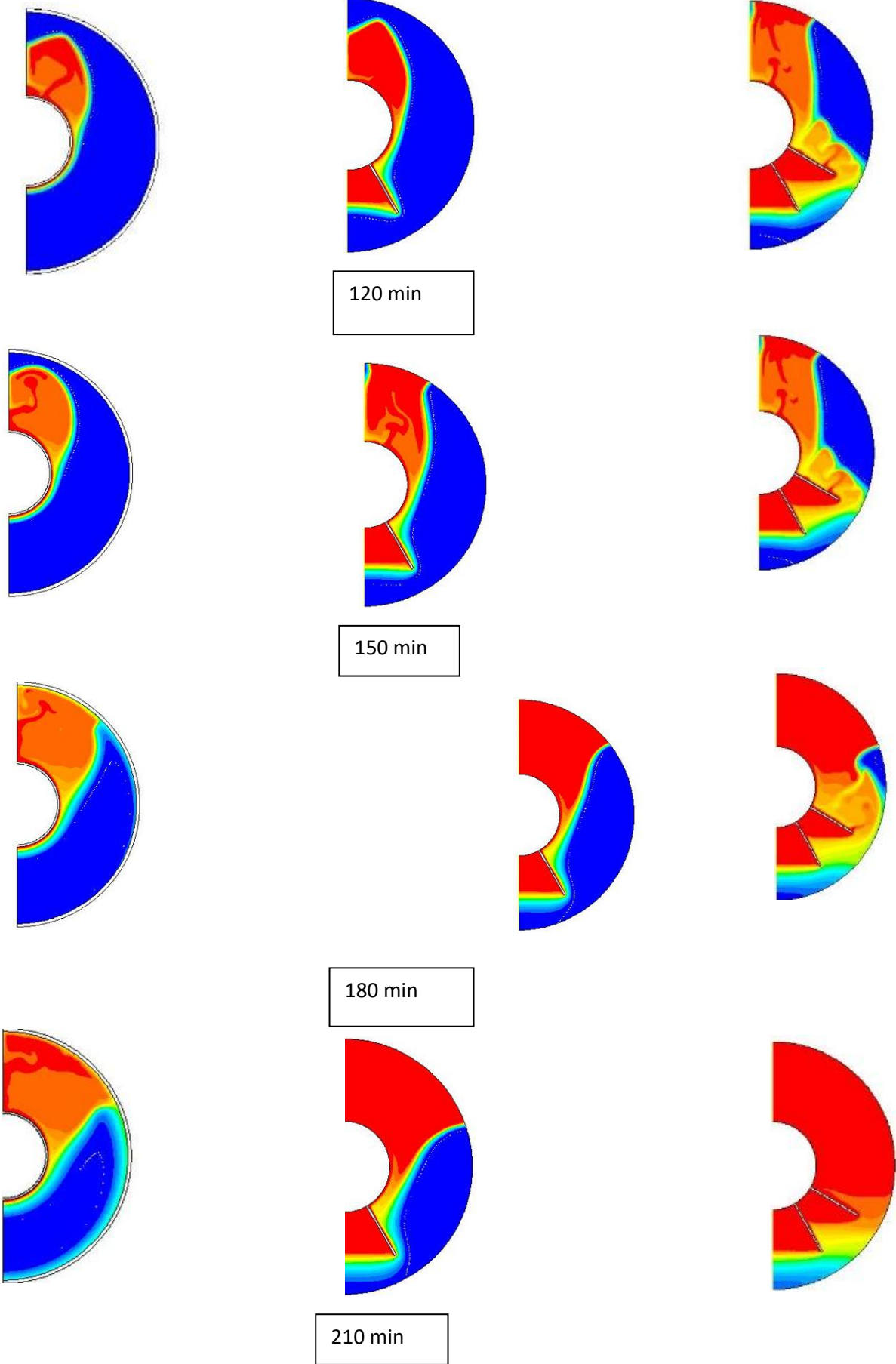


60 min



90 min





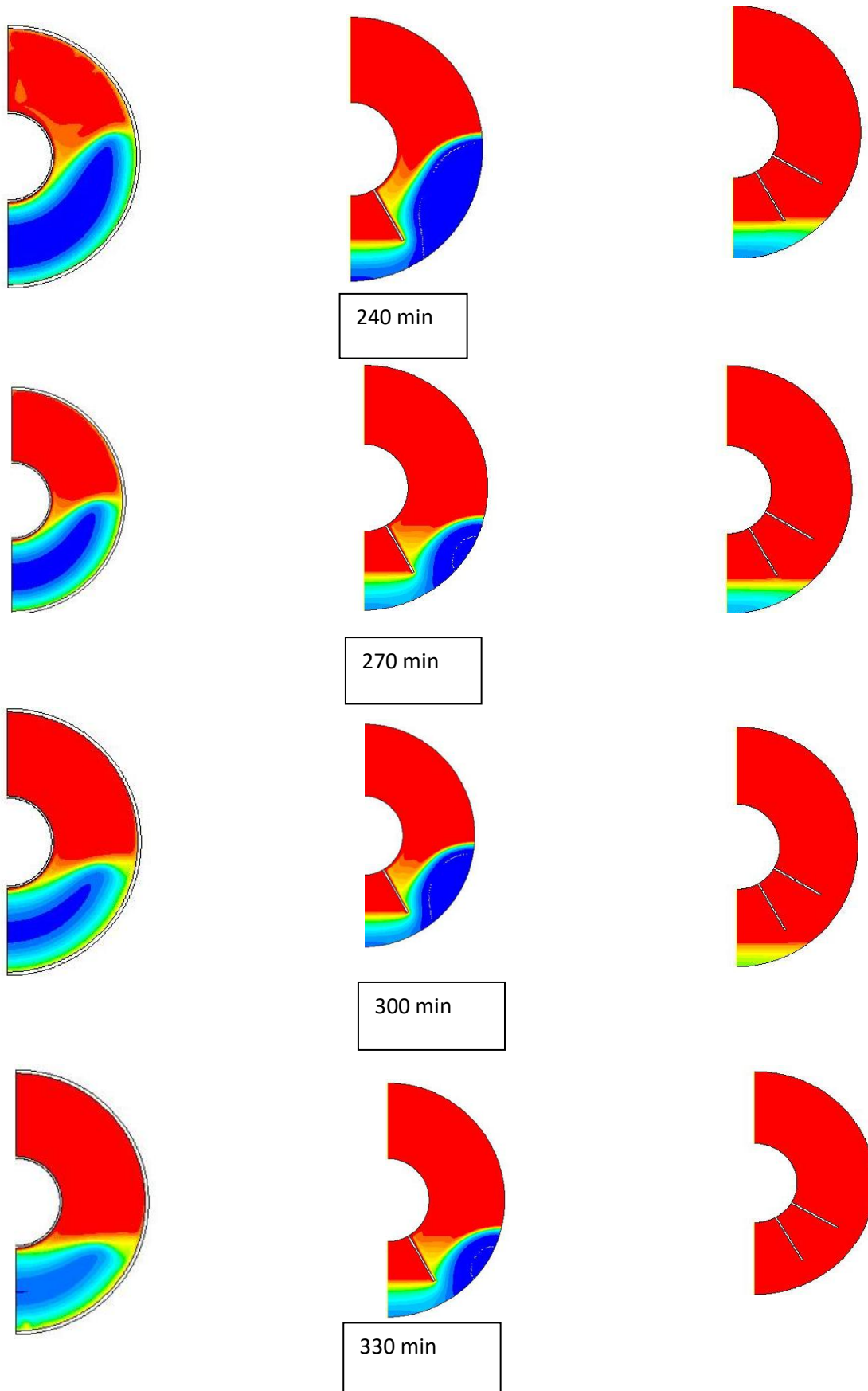


Figure IV-2 : contours de la fraction liquide pour un échangeur sans ailette, avec 1 ailette, avec,

D'après la figure IV.2 :

Bleu : MCP entièrement solide (fraction liquide = 0).

Rouge : MCP entièrement liquide (fraction liquide = 1).

Dégradé (bleu → rouge) : Transition solide/liquide (gradient de fusion).

Dans la configuration sans ailette, la zone de MCP liquide (en rouge) reste concentrée près du tube intérieur, où le transfert thermique est le plus intense. La fusion progresse lentement et de manière inhomogène, suivant un mécanisme en "couches" successives autour du tube. Cette progression est principalement dominée par la conduction pure, ce qui explique la lenteur du processus. En effet, en l'absence d'ailette, la chaleur se propage uniquement par conduction radiale, sans convection naturelle significative pour homogénéiser la distribution thermique. Cela crée un gradient de température marqué entre la région proche du tube (liquide) et la zone éloignée (solide), limitant l'efficacité globale du stockage.

Pour le deuxième cas (avec 1 ailette) :

L'ajout d'une ailette en cuivre modifie radicalement le comportement thermique du système. On observe que la chaleur se diffuse beaucoup plus efficacement le long de cette structure conductrice, créant une zone de fonte nettement plus étendue autour de l'ailette. Cependant, cette amélioration reste localisée - tandis que le côté équipé de l'ailette présente une fusion accélérée, la zone opposée conserve une teinte bleue caractéristique d'un matériau encore solide, avec une fonte qui progresse plus lentement.

Avec 2 Ailettes :

La configuration à deux ailettes démontre une nette amélioration des performances thermiques. Les ailettes agissent comme des chemins privilégiés pour la chaleur, créant entre elles un couloir de fusion accélérée. Cette zone intermédiaire, marquée par une dominante rouge sur les visualisations thermiques, atteint un état de fonte quasi-complète bien plus rapidement que le reste du système.

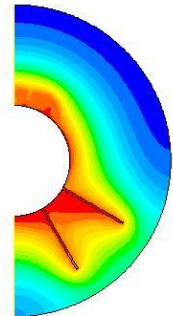
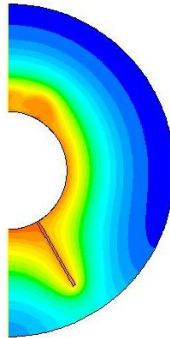
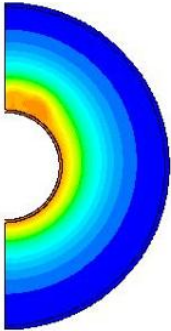
IV. 1. 2. 2 Contours de température



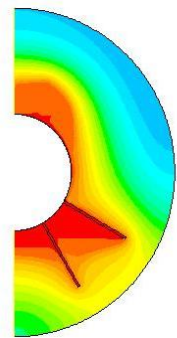
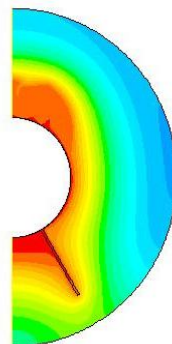
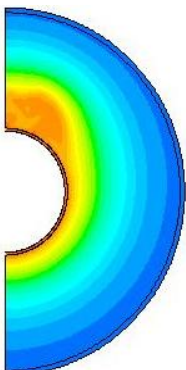
Sans ailettes

1 ailettes

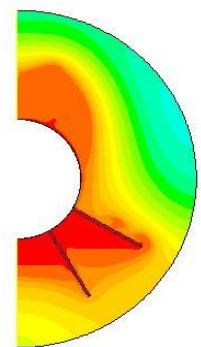
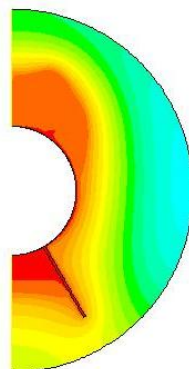
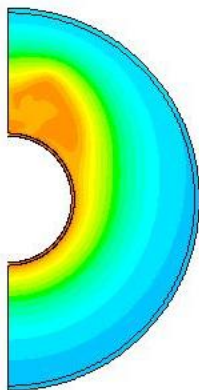
2 ailettes



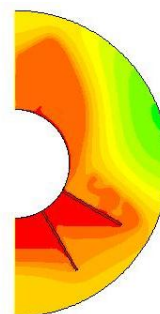
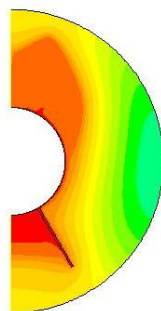
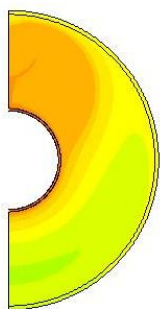
30 min



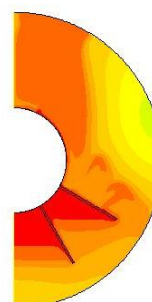
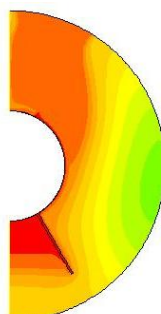
60 min



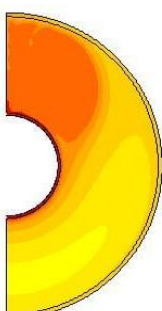
90 min



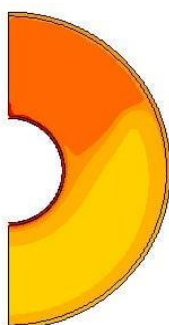
120 min



150 min



180 min



210 min

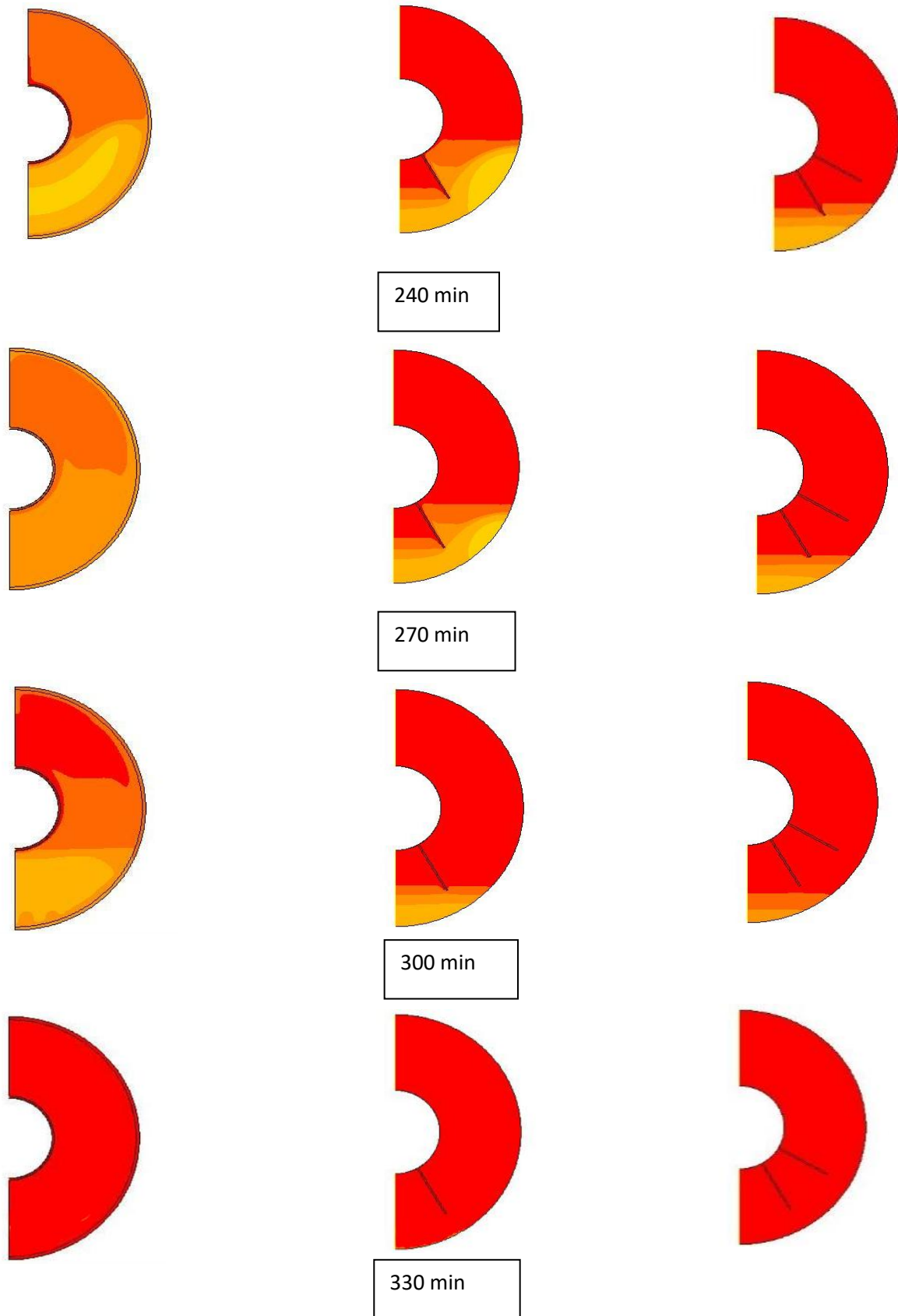


Figure IV-3: contours de la température de MCP pour 3 cas sans ailette, avec 1 ailette, avec deux ailettes.

On remarque d'après la figure IV.3 que :

- Zones bleus 300 K : MCP solide.
- Zones bleues/vertes (300–320 K) : MCP majoritairement solide.
- Zones jaunes/rouges (330–350 K) : MCP en cours de fusion ou fondu.
- Zones rouges 363 K : MCP liquide.

Pour le cas sans ailette :

Le système sans ailettes présente des limitations caractéristiques liées au transfert thermique purement conductif. Près du tube intérieur, on observe une température élevée (363 K), typique de la zone en contact direct avec le fluide caloporteur. Cependant, cette chaleur peine à se propager vers les régions périphériques, où la température stagne autour de 300 K pendant une durée significative.

Pour le cas deuxième avec 1 ailette :

L'ajout d'une seule ailette introduit une asymétrie marquée dans la distribution thermique. L'ailette agit comme un pont thermique efficace, concentrant la fusion du MCP autour d'elle et créant une zone de fonte localisée plus rapide. Cependant, cette amélioration reste inégale : le côté opposé à l'ailette présente une progression thermique beaucoup plus lente, avec un retard notable pour atteindre les 363 K.

Pour le dernier cas avec 2 ailettes :

L'analyse révèle que la présence de deux ailettes améliore considérablement le transfert thermique. La zone située entre les ailettes présente une température élevée et un gradient thermique réduit, tandis que les zones froides se limitent aux extrémités les plus éloignées. Cette configuration permet d'uniformiser efficacement la température dans l'ensemble du système et d'accélérer notablement le processus de fusion.

IV. 1. 2. 3 Evolution de la fraction liquide pour l'effet des ailettes

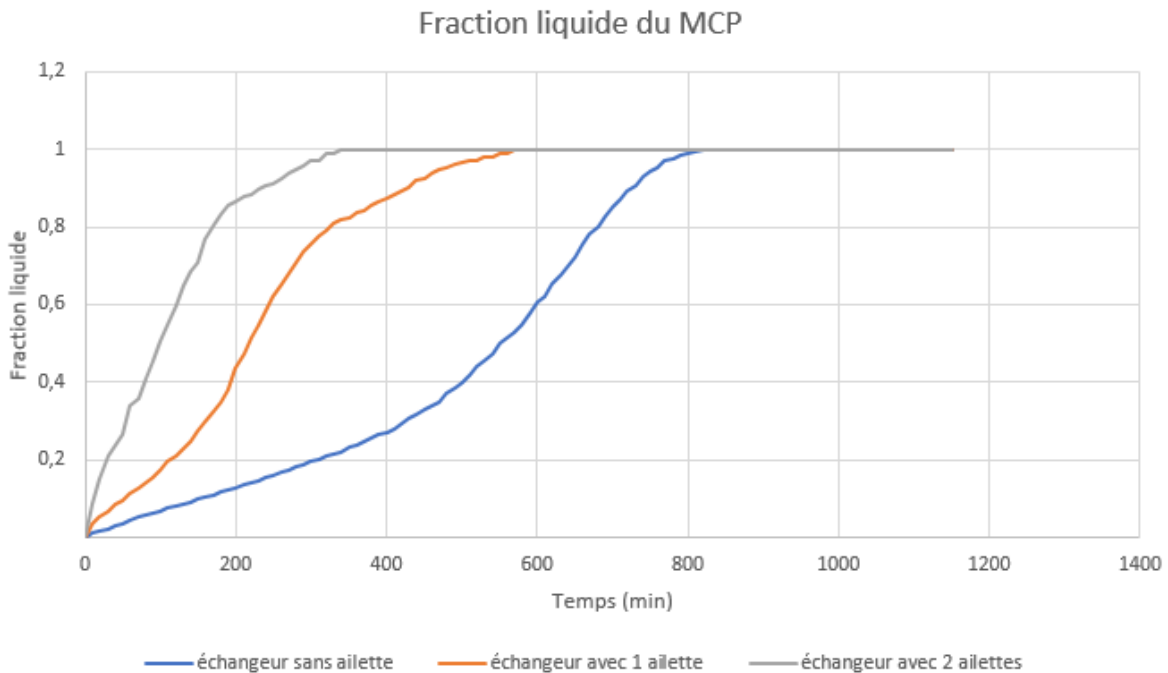


Figure IV-4: Evolution la fraction liquide en fonction du temps pour 3 cas sans ailette, avec 1 ailette, avec 2 ailettes.

La figure IV.4 montre l'évolution de de la fraction liquide en fonction de temps en pratiquant les effets des ailettes on remarque que :

Pour graphe (sans ailette) :

Le graphique révèle une fusion extrêmement lente, nécessitant près de 800 minutes pour atteindre la fonte complète du matériau à changement de phase (MCP). Cette cinétique thermique particulièrement lente traduit un transfert de chaleur limité par la conduction pure à travers le MCP,

Et pour le graphe (1 ailette) :

Le graphique montre une nette amélioration des performances par rapport au système sans ailette, avec un temps de fusion complet ramené à 590 minutes, soit une réduction de plus de 26%. Cette accélération significative du processus est attribuable à l'effet conjugué que L'ailette en cuivre agit comme un chemin privilégié pour la chaleur, permettant une diffusion rapide de l'énergie à travers sa structure métallique bien plus conductrice que le MCP.

Graphe (2 ailettes) :

L'analyse du graphique révèle que le système équipé de deux ailettes atteint des performances thermiques remarquables, avec un temps de fusion complet réduit à seulement 330 minutes. Cette durée représente une amélioration de 44% par rapport à la configuration à une seule ailette (310 minutes).

IV. 1. 2. 4 Evolution de la température pour l'effet des ailettes

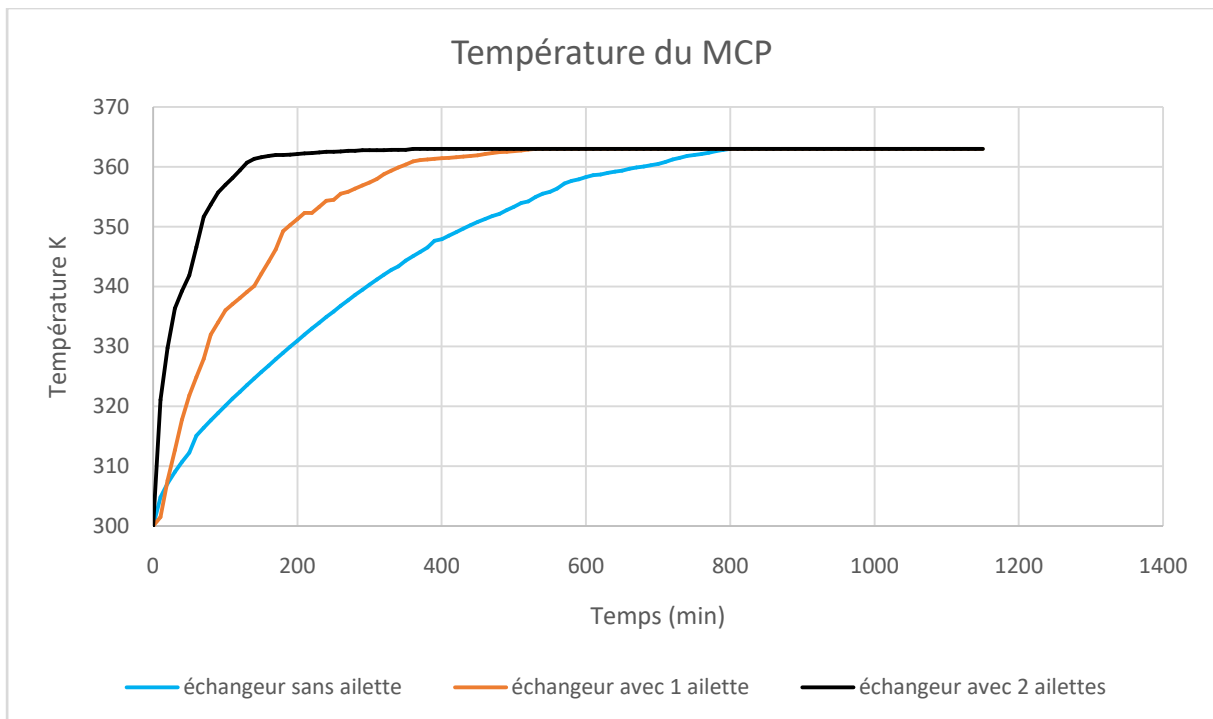


Figure IV-5: Evolution de la température en fonction de temps pour 3 cas sans ailette, avec 1 ailette, avec deux ailettes.

Les graphes de la figure IV.5 montrent l'évolution de la température en K en fonction du temps en minutes dans trois cas :

- 1) Echangeur sans ailette.
- 2) Echangeur avec une seule ailette.
- 3) Echangeur avec deux ailettes.

Pour le premier cas :

Stabilisation à 363 K en 800 min Le transfert de chaleur repose uniquement sur la conduction naturelle à travers la paroi du tube et la convection faible dans le MCP, La faible conductivité thermique du MCP limite la diffusion de chaleur, La chaleur met plus de temps à fondre complètement le MCP et à uniformiser la température.

Pour le deuxième cas :

Stabilisation à 363 K en 500 min, L'ailette agit comme un conducteur thermique axial, améliorant la diffusion de chaleur dans le MCP, Transfert de chaleur plus efficace vers les zones éloignées du tube, une seule ailette ne couvre pas toute la géométrie, laissant des zones moins performantes. Ce temps est réduit à seulement 500 minutes. Cela correspond à une diminution de 37,11% du temps nécessaire pour atteindre l'équilibre thermique. Cette amélioration s'explique par le rôle conducteur de l'ailette qui facilite le transfert axial de chaleur à travers le MCP.

Pour le troisième cas :

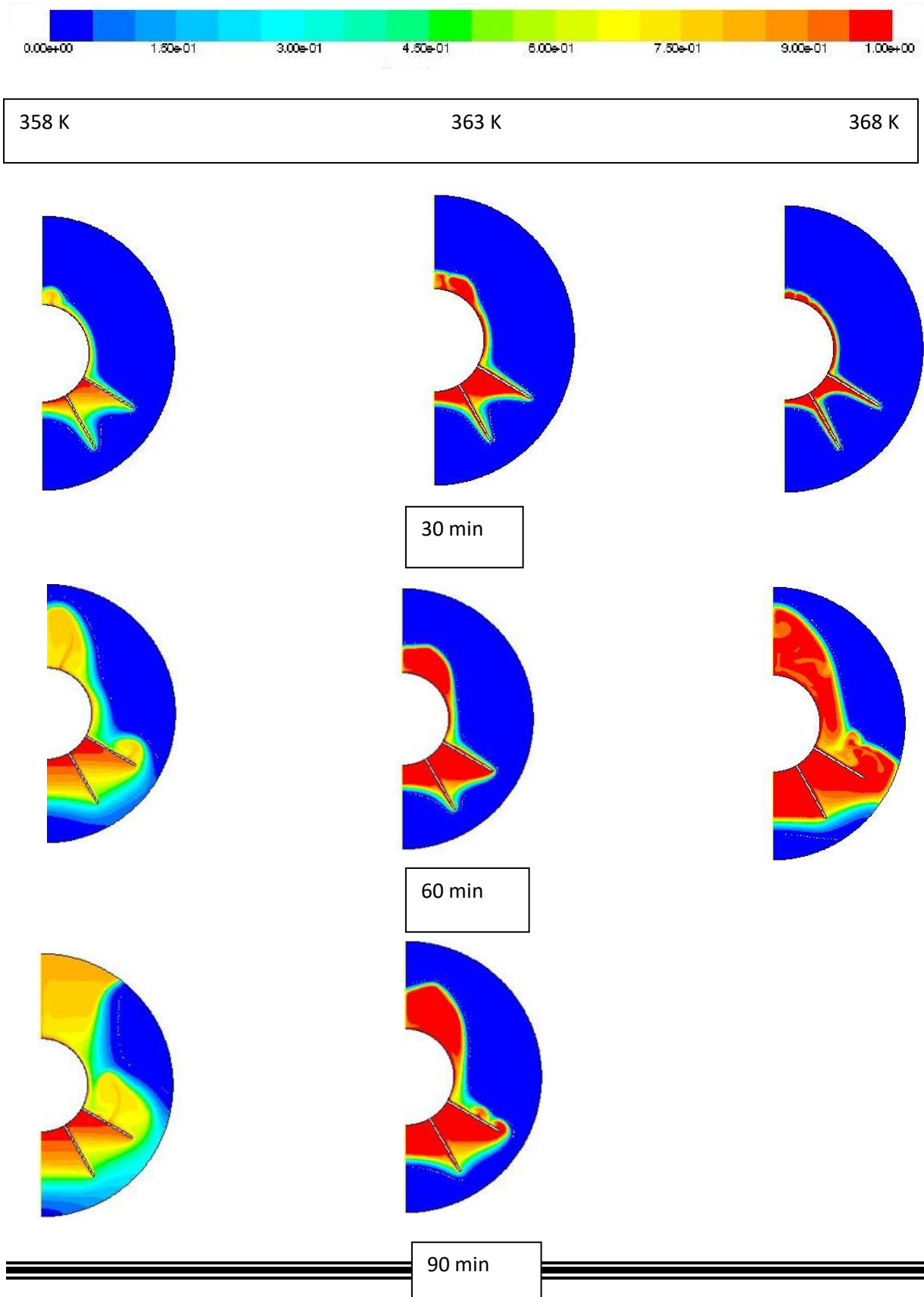
Stabilisation à 363 K en 370 min, Les deux ailettes divisent le MCP en sections plus petites, réduisant les distances de conduction. Moins de zones "froides" résiduelles, d'où une fusion plus rapide. Doubler les ailettes ne divise pas le temps par deux, 26% plus rapide qu'avec une seule ailette car le gain marginal diminue avec le nombre d'ailettes.

L'ajout d'une première ailette a un impact majeur (réduction de 295 min).

La deuxième ailette améliore encore, mais avec un rendement décroissant (130 min de gain supplémentaire).

IV. 1. 3 L'effet de températures :

IV. 1. 3. 1 Contours de la fraction liquide :



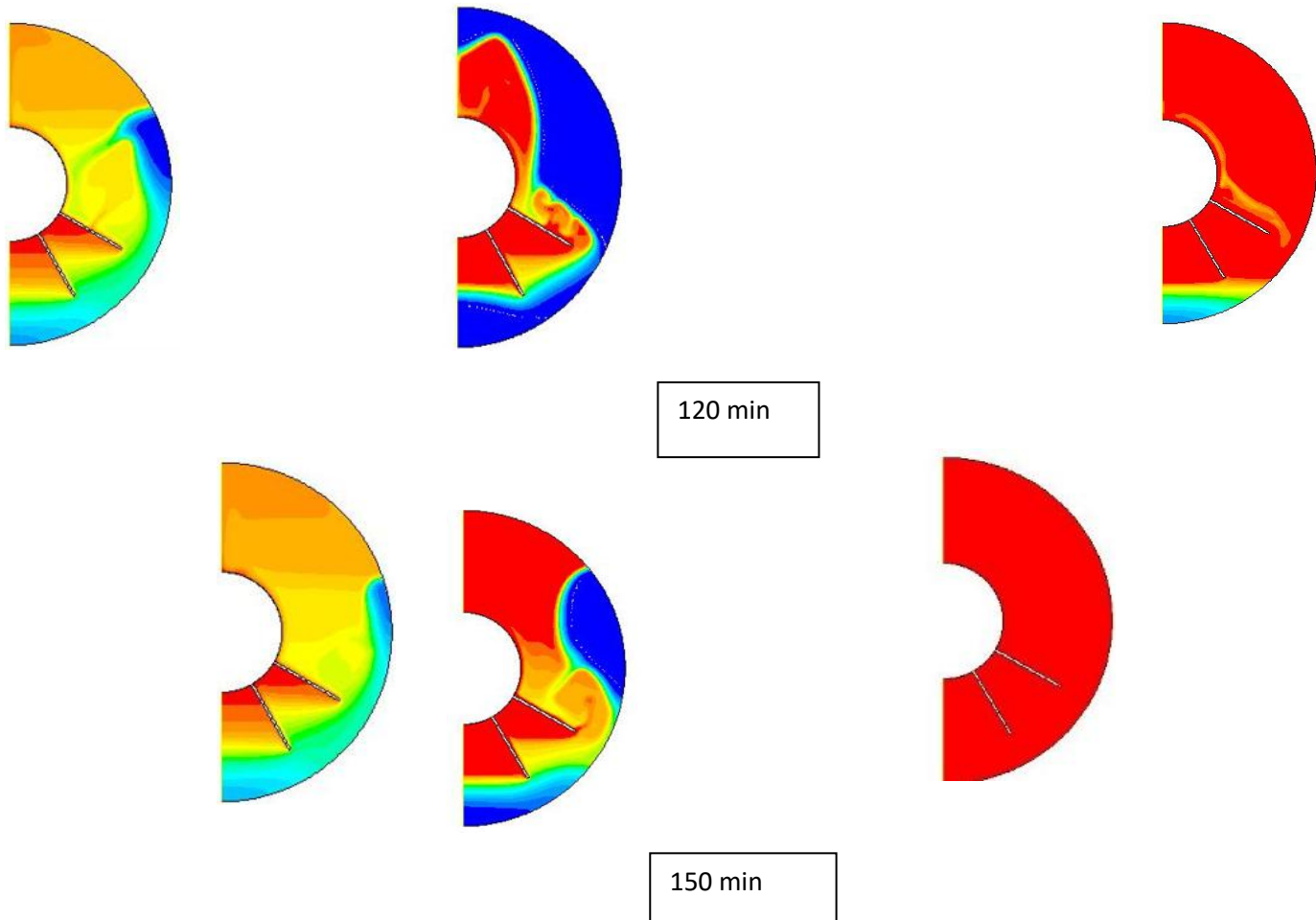


Figure IV-6: contours de la fraction liquide de MCP en 358 k, 363 k, 368 k.

Des résultats des contours de fraction liquide du matériau à changement de phase MCP selon les températures du fluide caloporteur (358 K, 363 K, 368 K), présentés dans la figure IV.6.

Influence de la température du fluide caloporteur sur la fusion du MCP.

Fraction liquide (0 = solide → bleu, 1 = liquide → rouge).

Température de fluide caloporteur est (358 K) :

Le système montre une fusion initialement localisée autour des ailettes et des zones proches du tube intérieur, où la conduction thermique du cuivre favorise un transfert de chaleur privilégié. Cependant, la température du fluide caloporteur (358 K) reste insuffisante pour déclencher une fusion rapide et homogène. La chaleur transmise permet uniquement une fonte progressive, débutant dans les zones en contact direct avec les ailettes avant de s'étendre

lentement vers le reste du volume. Bien que le processus soit lent, une exposition prolongée finit par induire une fusion complète du MCP.

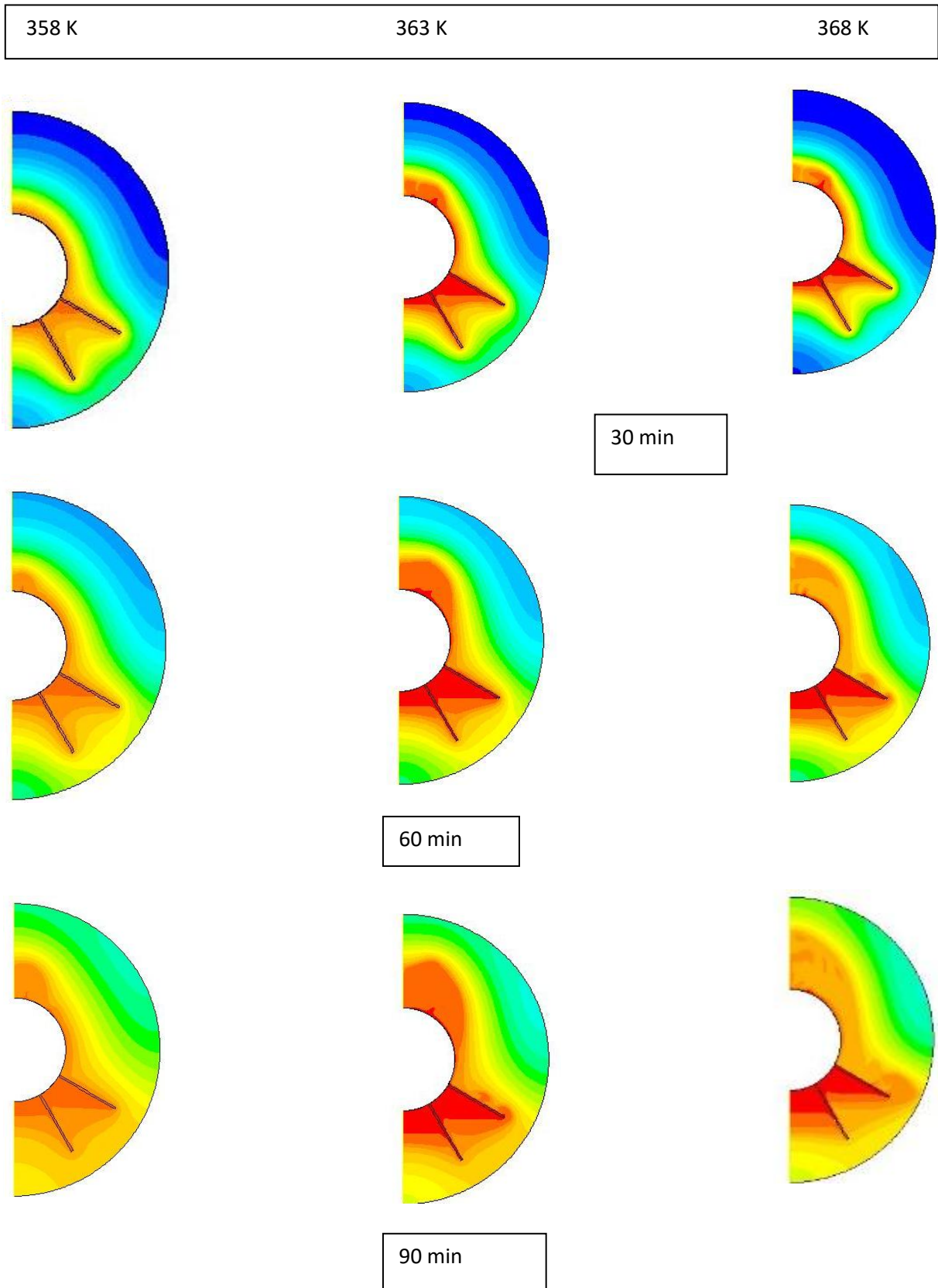
Température du fluide (363 K) :

Avec une température de fluide caloporteur portée à 363 K, le système démontre une bien meilleure efficacité thermique. Dès les premières heures, on observe une zone de fonte étendue (dominance de rouge/orange) qui progresse radialement depuis les ailettes vers l'extérieur. Le processus de fusion s'accompagne de zones de transition caractéristiques (jaune/vert) correspondant à des états partiellement liquides.

Pour le dernier cas la température du fluide (368 K) :

L'élévation de la température du fluide à 368 K permet d'observer une fusion extrêmement rapide et efficace du MCP. Dès les premières minutes de simulation, la majeure partie du domaine présente une teinte rouge/orange caractéristique d'un matériau presque entièrement fondu. Seules les zones en contact direct avec le tube extérieur, plus froides, conservent temporairement un état solide résiduel. Cette température optimisée permet d'exploiter pleinement les capacités conductrices des ailettes en cuivre, qui distribuent la chaleur de manière particulièrement efficace dans l'ensemble du volume.

IV. 1. 3. 2 Contours de températures



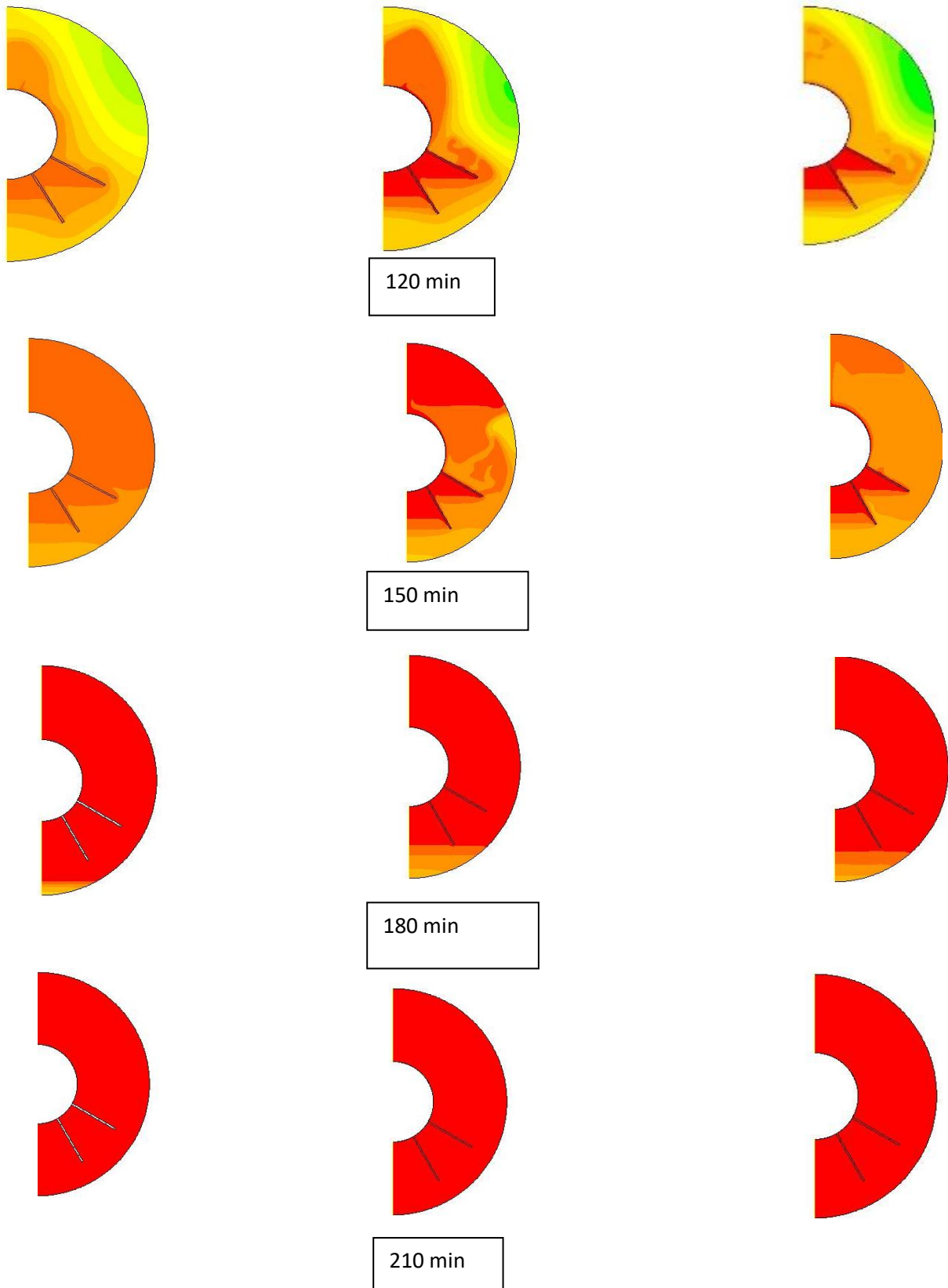


Figure IV-7: contours de la température en effet des différentes températures du fluide caloporteur.

Des résultats de la figure IV.7 des contours de la température du matériau à changement de phase MCP selon les températures du fluide caloporteur (358 K, 363 K, 368 K),

Échelle de couleurs : bleu = froid, rouge = chaud.

Ces contours montrent la distribution spatiale de la température dans le domaine au cours du temps.

Fluide caloporteur à 358 K :

Avec une température de fluide fixée à 358 K, le système présente un gradient thermique marqué entre le tube intérieur (zone chaude) et les régions extérieures (plus froides). La chaleur reste principalement concentrée près des ailettes, avec une zone rouge limitée correspondant à une fusion partielle du MCP. La faible différence de température entre le fluide (358 K) et le point de fusion du matériau (~355–360 K) réduit considérablement l'efficacité du transfert thermique.

Fluide caloporteur à 363 K :

L'augmentation de la température du fluide caloporteur à 363 K génère une nette amélioration des transferts thermiques. On observe une distribution de chaleur plus homogène dans l'ensemble du système, avec une augmentation significative des zones de fusion (en rouge/orange) vers les régions extérieures. Les ailettes, profitant de ce différentiel thermique plus favorable, assurent un développement efficace de la chaleur à la fois radialement et verticalement. Cette configuration permet au matériau à changement de phase d'atteindre plus rapidement sa température cible, avec un gradient thermique globalement réduit par rapport au cas à 358 K.

Fluide caloporteur à 368 K :

Avec une température de fluide fixée à 368 K, le système démontre des performances thermiques optimales. La chaleur se propage extrêmement rapidement à travers le MCP, comme en témoigne l'expansion quasi-instantanée de la zone rouge couvrant la majeure partie du domaine. Les ailettes, profitant pleinement de l'importante différence de température, assurent une distribution de chaleur remarquablement homogène. Le matériau atteint sa fusion complète en un temps record, avec une montée en température qui se poursuit au-delà du point de fusion pour stabiliser à 368 K dans l'ensemble du volume.

La température du fluide caloporteur est déterminante qu'à 358 K, le système est en dessous de la température de fusion, le stockage thermique peu efficace. et à 363 K, la fusion est amorcée avec une bonne propagation thermique. Et finalement à 368 K, on atteint un stockage thermique optimal, le MCP passe en phase liquide puis chauffe.

IV. 1. 3. Evolution de la fraction liquide pour l'effet de la température

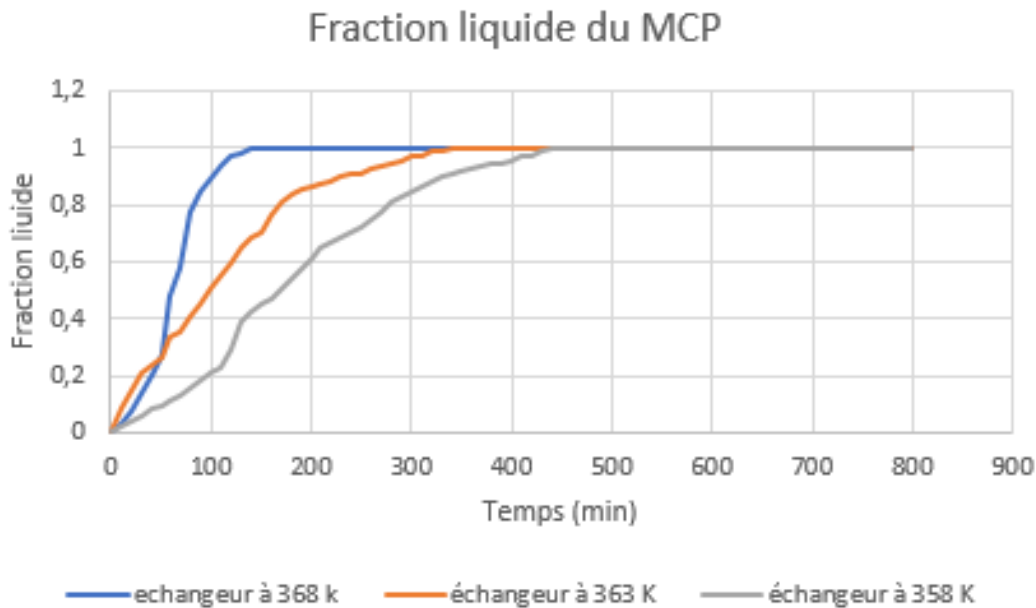


Figure IV-8: Evolution de la fraction liquide en fonction du temps pour trois différentes températures du fluide 358 K, 363 K, 368 K.

Les graphes de la figure IV.8 montrent l'évolution de la fraction liquide en fonction du temps, pour trois températures différentes du fluide caloporteur graphe :

Température est 358 K.

Température de 363 K.

Température de 368 K.

Pour le premier cas : Température du fluide est 358 K

Le système avec un fluide caloporteur à 358 K présente la cinétique de fusion la plus lente parmi les configurations étudiées, nécessitant 440 minutes pour atteindre la fusion complète du RT-82. Cette performance modérée s'explique par plusieurs facteurs thermodynamiques clés. La faible différence de température (seulement 3 K) entre le fluide (358 K) et le point de fusion du matériau (355 K) génère un flux thermique limité, réduisant considérablement l'efficacité du transfert de chaleur.

La courbe de fraction liquide, caractérisée par sa pente douce, révèle un processus de fusion progressif mais peu énergétique. Ces observations indiquent que l'énergie fournie par le fluide, bien que suffisante pour provoquer in fine le changement de phase complet, reste à la limite inférieure des capacités opérationnelles du système

Pour le deuxième graphe : Température du fluide est 363 K

Avec une température de fluide portée à 363 K, le système montre des performances thermiques nettement améliorées, avec un temps de fusion complet ramené à 330 minutes, soit une réduction de 25% par rapport au cas à 368 K. Cette température intermédiaire offre un excellent compromis opérationnel. L'augmentation du différentiel thermique 5 K permet un transfert de chaleur plus efficace à travers les ailettes en cuivre, tout en activant des phénomènes de convection naturelle dans le MCP. La courbe de fusion présente une pente plus marquée, particulièrement en phase initiale, traduisant une meilleure absorption de la chaleur latente. Bien que moins rapide que la configuration à 368 K, cette solution présente l'avantage d'une consommation énergétique plus modérée tout en maintenant des performances satisfaisantes. La progression régulière et homogène de la zone de fonte démontre l'équilibre trouvé entre efficacité thermique et stabilité du système. Ces caractéristiques en font le choix privilégié pour la majorité des applications de stockage thermique nécessitant un bon rapport performance/coût énergétique.

Pour le dernier graphe : Température du fluide est 368 K.

Le système atteint ses performances optimales avec un fluide à 368 K, affichant le temps de fusion le plus rapide de l'étude (140 minutes). Cette température élevée crée un différentiel thermique important (10 K) qui maximise le transfert de chaleur. Les ailettes en cuivre conduisent l'énergie avec une efficacité remarquable, tandis que la convection naturelle dans le MCP fondu s'intensifie significativement. La courbe de fusion, caractérisée par sa pente très abrupte, révèle un processus extrêmement dynamique où la chaleur latente est absorbée rapidement. Comparé aux autres configurations, ce cas permet une réduction de 48% du temps de fusion par rapport au fluide à 363 K.

Les résultats démontrent l'importance de la température du fluide caloporteur dans la conception des systèmes de stockage d'énergie thermique. Pour une fusion rapide, une température élevée est nécessaire, mais il faut aussi considérer les limites matérielles et les

coûts énergétiques. Une optimisation pourrait viser un compromis entre temps de fusion et efficacité globale.

IV. 1. 3. 4 Evolution de température en fonction de temps Effet de la température du fluide caloporteur

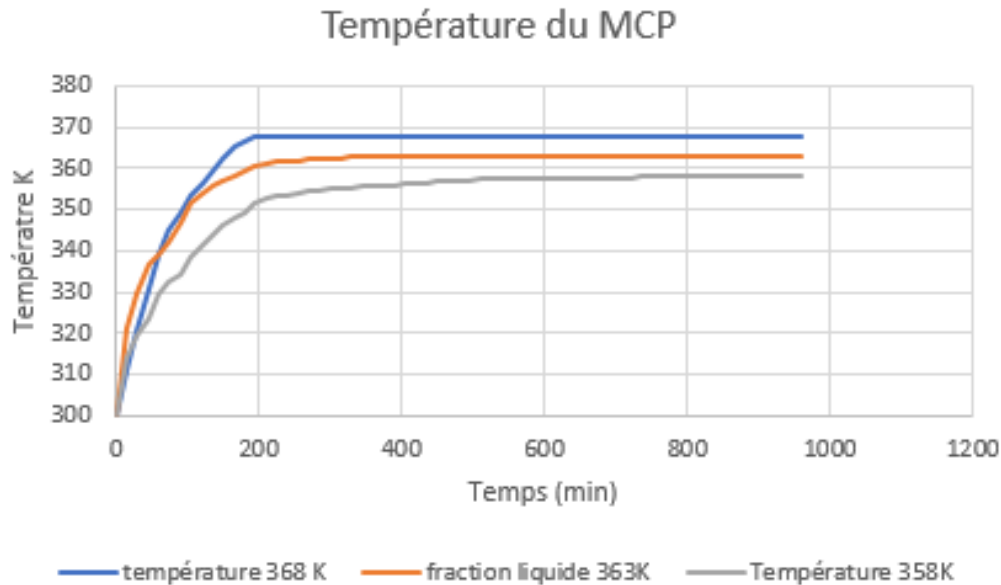


Figure IV-9: Evolution de température en fonction de temps Effet de la température du fluide caloporteur.

Ces graphes situés dans la figure IV.9 montrent l'évolution de la température du matériau à changement de phase en fonction du temps pour trois températures différentes du fluide caloporteur :

Fluide à 358 K.

Fluide à 363 K.

Fluide à 368 K.

Pour le premier cas : température du fluide est 358 K

Avec un fluide caloporteur à 358 K, le système présente les performances les plus modestes de l'étude, nécessitant 650 minutes pour atteindre la stabilisation thermique. Cette cinétique particulièrement lente s'explique par la faible différence de température (seulement 3 K) avec le point de fusion du matériau (355 K), qui génère un flux thermique insuffisant pour une fusion rapide. Le transfert de chaleur, principalement assuré par conduction, peine à surmonter les résistances thermiques du système. La courbe de température montre une

progression régulière mais excessivement lente, sans la phase d'absorption rapide caractéristique des configurations plus performantes. Bien que le système finisse par atteindre l'équilibre thermique, cette configuration démontre clairement les limites d'un fonctionnement à faible différentiel de température.

Graphe du deuxième cas : température du fluide est 363 K :

Le système utilisant un fluide caloporteur à 363 K démontre une nette amélioration des performances par rapport à la configuration à 358 K. La stabilisation thermique est atteinte en seulement 370 minutes, soit une réduction de plus de 43% du temps nécessaire. Cette accélération significative s'explique par l'augmentation du différentiel thermique 5 K qui permet un transfert de chaleur bien plus efficace. Les ailettes en cuivre conduisent l'énergie thermique de manière optimale, tandis que la convection naturelle dans le MCP fondu contribue à homogénéiser la température. La courbe de fusion, caractérisée par une pente plus raide, révèle une absorption rapide de la chaleur latente. Cette température de 363 K représente ainsi le meilleur compromis entre performance thermique et consommation énergétique,

Graphe du dernier cas : température du fluide est 368 K :

Contrairement aux prévisions, le système avec fluide à 368 K présente une stabilisation thermique en 200 minutes qu'à 363 K, révélant un phénomène. Contrairement à la logique qui voudrait qu'une température plus élevée améliore toujours les performances, le système à 368 K montre une efficacité augmentée, en améliorant plus de 45 % que 363 K. Pour des applications nécessitant des temps de réponse encore plus courts, l'augmentation à 368 K reste une option à considérer, moyennant une analyse coût-bénéfice énergétique.

IV.2 Conclusion :

Les résultats numériques présentés dans ce chapitre, obtenus par modélisation bidimensionnelle sous Fluent, ont permis de caractériser finement la dynamique de fusion d'un matériau à changement de phase paraffine par un fluide caloporteur dans un échangeur tubulaire concentrique.

Conclusion générale

Conclusion générale

Pour améliorer le transfert de chaleur dans un échangeur de chaleur à triple tube concentrique, deux techniques d'amélioration sont utilisées simultanément : l'incorporation du MCP dans une mousse métallique et l'ajout d'ailettes longitudinales. Le modèle d'équilibre non thermique est utilisé en raison de la grande différence de conductivité thermique entre le MCP et la mousse métallique (cuivre).

Après avoir présenté les différents types de matériaux à changement de phase (MCP) utilisés comme candidats pour le stockage thermique, ainsi que les critères de sélection de ces matériaux et les principales applications du stockage par chaleur latente,

La recherche bibliographique a montré les types d'amélioration de fusion ou la solidification du MCP, les propriétés et les classifications des produits MCP qui conviennent aux différentes applications.

Le processus de fusion du matériau à changement de phase RT 82, utilisé dans un échangeur de chaleur à tubulaire, a été analysé par voie numérique. À l'aide du logiciel de simulation Fluent 6.3.26, Par ailleurs, techniques d'optimisation du transfert thermique ont été évaluées dans le but d'améliorer les performances du stockage thermique : L'insertion d'ailettes internes, ou d'augmenter la température du fluide caloporteur

L'étude que nous avons réalisée nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

Les ailettes en cuivre jouent un rôle crucial en accélérant la fusion du MCP.

Plus le nombre d'ailettes est élevé, plus le transfert de chaleur est efficace, réduisant ainsi le temps de fusion, et Sans ailettes, la chaleur met longtemps à traverser le MCP.

L'utilisation d'une seule ailette a permis de réduire le temps de fusion de plus que 26%. par rapport à la méthode sans ailette. Cette amélioration significative optimise l'efficacité du procédé tout en réduisant les coûts et les délais de production, mais en ajoutant une autre ailette réduise le temps 18 % en plus, car avec les ailettes, la chaleur atteint plus rapidement les zones éloignées.

Une augmentation de la température du fluide réduit significativement le temps total de fusion.

Conclusion générale

Une élévation de la température du fluide caloporteur de 5 K a permis de réduire le temps de fusion de plus de 48 %. Lorsque cette augmentation atteint 10 K, la réduction du temps de fusion est doublée, atteignant environ 66 %.

Ces analyses aideraient à ajuster les paramètres de conception pour une fusion plus rapide et homogène.

Enfin, cette étude pourrait être élargie à l'avenir en explorant :

- Étudier l'impact de la géométrie des ailettes (nombre, épaisseur).
- Faire une simulation en 3D, pour comparer les résultats avec ce travail.
- Varier le nombre, l'épaisseur, ou la longueur des ailettes en cuivre pour évaluer leur impact sur l'homogénéité thermique.
- Étudier des températures moyennes (ex. 360 K, 365 K) pour identifier le seuil optimal entre rapidité de fusion et stabilité.

Références bibliographiques

- [1] C. Alkan and A. Sari, "Fatty Acid/Poly (Methyl Methacrylate) (PMMA) Blends as Form-Stable Phase Change Materials for Latent Heat Thermal Energy Storage", *Solar Energy*, Vol. 82, N°2, pp. 118 - 124, 2008.
- [2] Leroy, S. "Phase Change Materials for Thermal Energy Storage: Fundamentals and Applications"; Elsevier. (2005).
- [3] M.E. Tiji., "Natural convection effect on solidification enhancement in a multi-tube latent heat storage system: effect of tubes' arrangement", *Energies* 14 (22) (2021) 7489.
- [4] Lane, D.G.A., "Low temperature latent heat thermal energy storage heat storage materials". *International Journal of Ambient Energy*, 1980. 1(3): p.155-168
- [5] Duraković Benjamin. "PCM-Based building envelope system, Innovative energy solutions for passive design". Springer nature Switzerland. 2020. ISBN 978-030-38334-3.
- [6] Wang L, Meng D. "Fatty acid eutectic/polymethyl methacrylate composite as formstable phase change material for thermal energy storage". *Appl Energy* 2010
- [7] Li B, Liu T, Hu L, Wang Y, Nie S. "Facile preparation and adjustable thermal property of stearic acid-graphene oxide composite as shape-stabilized phase change material". *Chem Eng J* 2013
- [8] Zhang RY. "Phase change material and phase change energy storage technology". Beijing: Science Press; 2009. p. 130–81
- [9] Sarbu, I.; Sebarchievici, C. "Solar Heating and Cooling: Fundamentals, Experiments and Applications"; Elsevier: Oxford, UK, 2016.
- [10] Sharma, A.; Tyagi, V.V.; Chen, C.R.; Buddhi, D. "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications". *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2009, 13, 318–345.
- [11] H.Mehling et L.F.Cabeza, "Heat and cold storage with PCM", Springer - Verlag Berlin Heidelberg ed 2008.
- [12] C.N. Elias, V.N. Stathopoulos, "A comprehensive review of recent advances in materials aspects of phase change materials in thermal energy storage", *Energy Procedia* 161 (2019) 385–394,

[13] Damien Mathis, «Thèse Doctorat en sciences du bois/Développement de nouveaux matériaux de haute inertie thermique à base de bois et matériaux à changement de phase »

biosourcés/université LAVAL /2019

[14] X.Y. Zhang, Y.T. Ge *, Burra, P.Y. Lang "Experimental investigation and CFD modelling analysis of finned-tube PCM heat exchanger for space heating "Applied Thermal Engineering 244 (2024) 122731

[15] Weidong Liu a,**, Majid Mokhtari b, Muntadher Abed Hussein c, Anjan Kumar d,Talib M. Albayati e, Pardeep Singh Bainsf,g, Hadeel Kareem Abdul-Redha h,Soheil Salahshouri,j,k, M.Hekmatifar."Investigation of the arrangement of aluminum fins on the thermal behavior of lauric acid as a phase change material in a two-pipe heat exchanger by CFD simulation"Case Studies in Thermal Engineering Volume 64, December 2024, 105469.

[16] R. Velraj, R. V. Seeniraj, B. Hafner, C. Faber, K. Schwarzer, « Experimental Analysis and Numerical Modelling of inward solidification on finned vertical tube for a latent heat storage unit », Solar Energy Vol. 60, No. 5, pp. 281–290, 1997.

[17] Gnanadurai Ravikumar Solomon, Ramalingam Velraj, “Analysis of the heat transfer mechanisms.

during energy storage in a Phase Change Material filled vertical finned cylindrical unit for free cooling application”, Energy Conversion and Management, Vol. 75, pp: 466–473,2013.

[18] M.J. Hosseini, A.A. Ranjbar, M.Rahimi, R. Bahrapoury, “Experimental and numerical evaluation of longitudinally finned latent heat thermal storage systems”, Energy and Buildings, Vol. 99, pp. 263–272, 2015

[19] A. Sciacovelli, F. Gagliardi, V. Verda. “Maximization of performance of a PCM latent heat storage system with innovative fins “Applied Energy, Vol. 137, pp: 707–715, 2015

[20] Omer S. Elsanusi, Emmanuel C.” Nsofor Melting of multiple PCMs with different arrangements inside a heat exchanger for energy storage”2020.

[21] Hadi Mohammad jafari Sadeghia, Morsal Babayanb, Ali Chamkha ,”Investigation of using multi-layer PCMs in the tubular heat exchanger with periodic heat transfer boundary condition”, International Journal of Heat and Mass Transfer

[22] Idris Al Siyabiah*, Sourav Khannab, Tapas Mallickc and Senthilarasu Sundaram,” Experimental and Numerical Study on the Effect of Multiple Phase Change Materials Thermal Energy Storage System”

[23] Zhenyu Liu, Yuanpeng Yao, Huiying Wu, “Numerical modeling for solid–liquid phase change phenomena in porous media: Shell-and-tube type latent heat thermal energy storage “, Applied Energy, Vol. 112, pp: 1222–1232, 2013.

[24] Pouyan Talebizadeh Sardari a, Hayder I. Mohammed b, *, Donald Giddings a,Gavin S. walker c, Mark Gillott c, David Grant. “Numerical study of a multiple-segment metal foam-PCM latent heat storage unit: Effect of porosity, pore density and location of heat source”. Energy*+- 189 (2019) 116108

- [25] Z. Chen, D. Gao, J. Shi.” Experimental and numerical study on melting of phase change materials in metal foams at pore scale”, *Int. J. Heat Mass Transf.* 72 (2014) 646–655
- [26] Battula Venkata Sai Dinesh, Anirban Bhattacharya.” Effect of foam geometry on heat absorption characteristics of PCM-metal foam composite thermal energy storage systems”.*International Journal of Heat and Mass Transfer* 134 (2019) 866–883
- [27] Mehdi Esapoura, Arash Hamzehnezhadb, A. Ali Rabienataj Darzi,*, Mahmoud Jourabian. “Melting and solidification of PCM embedded in porous metal foam in horizontal multi-tube heat storage system”. *Energy Conversion and Management* 171 (2018) 398–410
- [28] Y. Pahamli a, M.J. Hosseini b, A.A. Ranjbar a, R. Bahrampoury . ” Effect of nanoparticle dispersion and inclination angle on melting of PCM in a shell and tube heat exchanger “. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 000 (2017) 1–19
- [29] Michael Nitsas , I.P. Koronaki .“Performance analysis of nanoparticles-enhanced PCM”. *An experimental approach* Volume 25, 1 October 2021, 100963.² Aq.??%M
- “£µ78/30 Fatih Selimefendigil a, Hakan F. Öztop,” Effects of flow separation and shape factor of*
- / &azeu& aéz(‘r-yèu_çà)*anoparticles in heat transfer fluid for convection thorough phase change material (PCM) installed cylinder for energy technology applications”. *Journal of Energy Storage* 41 (2021) 102945
- [31] Jasim M. Mahdi, Emmanuel C. Nsofor,” Solidification of a PCM with nanoparticles in triplex-tube thermal energy storage system “. *Applied Thermal Engineering* 108 (2016) 596–604.
- [32] Francis Agyenim, Philip Eames, Mervyn Smyth, « Heat transfer enhancement in medium temperature thermal energy storage system using a multitube heat transfer array », *Renewable Energy*, Vol. 35, pp: 198–207, 2010.
- [33] A.H. Mosaffa, F. Talati, H. Basirat Tabrizi, M.A. Rosen, « Analytical modeling of PCM solidificati-+<Bn in a shell and tube finned thermal storage for air conditioning systems », *Energy and Buildings*, Vol. 49, pp: 356–361, 2012.
- [34] Ahmad Ali Rabienataj Darzi, Mousa Farhadi, Kurosh Sedighi, « Numerical study of melting inside concentric and eccentric horizontal annulus », *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 36, 4080–4086, 2012.
- [35] Abduljalil A. Al-Abid, Sohif Mat, K. Sopian, M.Y. Sulaiman, Abdulrahman Th Mohammad, «Numerical study of PCM solidification in a triplex tube heat exchanger with internal and external fins», *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 61, pp : 684–695, 2013.
- [36] C. Popa, « Modélisation numérique du transfert thermique », 2002.