

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 :

RAMDANI Hadjer et **RAMDANI Hanaâ**

Sujet

Influence de la présence d'air et la variation de densité sur la fusion de la paraffine dans une cavité chauffée par le bas

Soutenu publiquement, le 30 / 06 / 2022, devant le jury composé de :

M KORTI A.N	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
Mme KHALDIS.	MCB	Univ. Tlemcen	Examineur
Mme SARI HASSOUN.H	MAA	Univ. Tlemcen	Encadrante

Année universitaire : 2021/2022

Remerciements

Un grand merci au bon dieu de nous avoir guidées vers
le bon chemin de la lumière et de savoir.

Nous tenons à remercier vivement notre encadreur,
Madame **SARI HASSOUN Hind** pour son suivi, son
assistance et ses conseils précieux le long de notre
formation. Nous tenons aussi à lui exprimer nos
profonds respects et nous avons tout l'honneur que
nous étions ses élèves.

Nous remercions vivement monsieur **A.N KORTI**
d'avoir accepté la présidence du jury de ce mémoire, sa
présence nous 'honore grandement.

Nous remercions aussi à madame **S.KHALDI**
pour avoir accepté d'examiner notre travail, qu'elle
trouve ici nos profonds respects.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui ont
contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Nous dédions ce modeste travail à :

- *Nos chers parents, à l'origine de notre existence et de notre savoir, qu'ils trouvent ici l'expression de nos grands amours.*
- *Nos frères Hicham ,Sidi Mohamed et Abd El Rahman et notre sœur Bochra.*
- *Nos chers amis, B.Zineb,F.Ikram ,B .Hanane et sans oublierM.Bounouar , R. Youness et particulièrement T.Mokhtar.*

Nous les remercions pour leur soutien.

ملخص

ملخص

أثناء تغيير المرحلة الصلبة والسائلة و يتم تنظيم المادة بشكل مختلف على المستوى الجزيئي، وتختلف الخصائص الفيزيائية للمراحل الصلبة والسائلة. على وجه الخصوص، تؤدي الاختلافات في الكثافة أثناء تغيير المرحلة إلى اختلافات في الحجم، أي يمكن PCM أن يتوسع أو يتقلص. يتمثل عملنا في دراسة تأثير وجود مساحة هوائية في الجزء العلوي من التجويف وتغيرات الكثافة على ذوبان مادة متغيرة الطور في تجويف يتم تسخينه من الأسفل. يتم تنفيذ المحاكاة الديناميكية والحرارية لتدفق الهواء / البارافين على مرحلتين باستخدام طريقة VOF باستخدام برنامج .ANSYS Fluent 15. النتائج المستخدمة هي في شكل تطور الكسر الحجمي ، وتطور الجزء السائل ودرجات الحرارة بين تكوينين بدون الفضاء الجوي ومعه ، وكذلك الاختلاف في الكثافة أثناء الاندماج. النتائج التي تم الحصول عليها تظهر معامل تمدد بنسبة 3%.

الكلمات المفتاحية: مادة متغيرة الطور (MCP), ANSYS Fluent, حجم السائل, (VOF), انصهار

محاكاة رقمية

Abstract

During a solid-liquid/liquid-solid phase change, material is organized differently at the molecular level, the physical properties of the solid and liquid phases are different. In particular, variations in density during the phase change lead to variations in volume, i.e. the PCM can expand or contract. Our work consists in studying the effect of the presence of an air space in the upper part of the cavity and the density variations on the melting of a phase change material in a cavity heated from below. The dynamic and thermal simulation of the two-phase paraffin/air flow using the VOF method is carried out using ANSYS Fluent 15.0 software. The results used are in the form of the evolution of the volume fraction, the evolution of the liquid fraction and of the temperatures between two configurations without and with air space, as well as the variation in density during fusion. The results obtained show an expansion coefficient of 3%.

Keywords: Phase change materials (PCM), ANSYS Fluent, Melting, VOF, Numerical simulation.

Résumé

Lors d'un changement de phase solide-liquide/liquide-solide la matière est organisée différemment à l'échelle moléculaire, les propriétés physiques des phases solides et liquides sont différentes. En particulier, les variations de densité lors du changement de phase entraînent des variations de volume, c'est-à-dire le MCP peut se dilater ou se contracter.

Notre travail consiste à étudier l'effet de la présence d'un espace d'air dans la partie supérieure de la cavité et les variations de densité sur la fusion d'un matériau à changement de phase dans une cavité chauffé par le bas. La simulation dynamique et thermique de l'écoulement diphasique paraffine/air en utilisant la méthode VOF est réalisée à l'aide de logiciel ANSYS Fluent 15.0. Les résultats exploités sont sous forme d'évolution de la fraction volumique, l'évolution de la fraction liquide et des températures entre deux configuration sans et avec espace d'air, ainsi que la variation de densité pendant la fusion. Les résultats obtenus montrent un coefficient de dilatation de 3%.

Mots-clés : Matériaux à changement de phase (MCP), ANSYS Fluent, Fusion, VOF, Simulation numérique

Sommaire

Remerciement

Dédicace

ملخص

Abstract

Résumé

Introduction générale.....1

**Chapitre I : généralité sur le stockage de l'énergie et les matériaux à
changement de phase**

I.1 Introduction	4
I.2 Types de stockage de l'énergie	4
I.2.1 Stockage d'énergie chimique	4
I.2.2 Stockage d'énergie électrochimique	5
I.2.3 Stockage d'énergie électrique	5
I.2.4 Stockage d'énergie mécanique.....	5
I.2.5 Stockage de l'énergie thermique	6
I.2.5.a Principe de stockage par chaleur latente.....	6
I.2.5.b Les matériaux utilisés pour un stockage latent	9
I.3 Différents types de changement de phase	10
I.4 Matériau à changement de phase.....	11
I.5 Classification des matériaux a changement de phase	12
I.5.1 Matériaux organiques	12
I.5.2 Matériaux inorganiques	15
I.5.3 Eutectiques.....	16
I.6 Critère de sélection d'un MCP.....	17
I.7 Avantages et les inconvénients des différents types des MCP	17

Sommaire

I.8 Positionnement et objectifs.....	19
I.9 Les applications des MCP.....	20
I.11 Conclusion	20

Chapitre II synthèse bibliographique

II.1 Introduction.....	22
II.2 Travaux numériques et expérimentales	22

Chapitre III Position du problème

III.1 Introduction.....	51
III.2 Problème physique	52
III.3 Modèle Mathématique	54
III.4 Condition initiale et aux limites	58
III.4.1 Condition initiale.....	58
III.4.2 Conditions aux limites.....	58
III.5 Simulation numérique.....	59
III.5.1 Création de la géométrie.....	59
III.5.2 Maillage de la cavité.....	60
III.5.3 Calcul numérique.....	60
III.5.4 Adaptation des régions pour écoulement diphasique.....	62
III.6 Application à un écoulement diphasique gaz-liquide.....	63

Chapitre IV Résultats et discussions

IV.1 Test de maillage.....	66
IV.2 Evolution de la fraction volumétrique.....	67
IV.3 Comparaison de la fraction liquide avec et sans espace d'air.....	69
IV.4 Comparaison des isothermes avec et sans espace d'air.....	71
IV.5 Evolution de la Température et la densité.....	73
IV.6 Evolution de la fraction liquide et la densité.....	74

Sommaire

IV.7 Evolution de coefficient de dilatation.....	75
Conclusion général.....	76
Références bibliographiques.....	77

Nomenclature

Notions latines

cp_s Capacité thermique de corps à l'état solide.

cp_l Capacité thermique de corps à l'état liquide.

ΔH_r Enthalpie de la réaction [J/mol]

f La fraction liquide.

H Enthalpie [J]

h Coefficient de convection [$W/m^2.K$]

L_f La chaleur latente de fusion.

L_v Chaleur latente (vaporisation) [J/kg]

m masse [kg]

p Pression [Pa]

T_f Température de fusion.

T_s Température solides.

T_l Température liquides T_l

T_1 Température initiale

T_2 Température finale

T_f Température de fusion

T_{inf} Température inférieur

t Temps[s]

Notations Grecques

μ La viscosité dynamique [kg/ms]

β Coefficient de dilatation thermique [k-1]

ν Viscosité cinématique du fluide [m^2/s]

ρ Masse volumique du fluide [kg/m^3]

Sommaire

λ Conductivité thermique

[w/m.K]

Abréviations

SETCL stockage d'énergie thermique à chaleur latente

MCP Matériaux à Changement de Phase

PCM Phase Change Material

LHS Latent Heat Storage

TES Thermal Energie Storage

SHS Stockage de Chaleur Sensible

GPL Gaz Pétrole Liquéfié

Liste des figures

Figure I.1 Etapes de stockage de la chaleur par un matériau en fonction de la température	8
Figure I.2 Diagramme de changement d'état d'un matériau.....	10
Figure I.3 Principe de fonctionnement des matériaux à changement de phase.....	11
Figure I.4 Classification des MCP.....	12
Figure I.5 Paraffine.....	14
Figure I.6 Acide stéarique (acide gras).....	14
Figure II.1 Schéma du système de stockage d'énergie thermique avec tube à ailettes.....	24
Figure II.2 Distribution de flux (à gauche) et les isothermes (à droite) dans la zone de fusion de la cire de paraffine avec l'aluminium.....	25
Figure II.3 Différentes géométries étudiées.....	26
Figure II.4 Variation de la fraction liquide au cours de la fusion	26
Figure II.5 Comparaison de l'évolution de fraction liquide numérique.....	27
Figure II.6 Contours de la fraction liquide au cours de la fusion.....	28
Figure II.7 Variation du temps de fusion du PCM dans les cavités sans et avec des ailettes en fonction d'angle de l'inclinaison.....	29
Figure II.8 Comparaison des résultats numériques d'interfaces solide-liquide avec différents angles d'inclinaison à trois moments choisis.....	30
Figure II.9 Le processus de fusion de la paraffine à 0°. (a) Fraction liquide (b) variation de température.....	31
Figure II.10 Evolution temporelle de la fusion du Tétracosane en maintenant la paroi inférieure à une température constante de $T_w = 80\text{ }^\circ\text{C}$	32

Liste des figures

Figure II.11 Evolution des lignes de courant durant la fusion du Tétracosane en maintenant la paroi inférieure est maintenue à une température constante de $T_w = 80\text{ °C}$	33
Figure II.12 Photographies de fusion, lignes de courant et distributions de température dans l'enceinte 0°-1-fin à différents moments.....	34
Figure II.13 historique des températures des couples au cours de la fusion de MCP en HXs avec une température de sortie 65 C (a) HX sans ailettes (b) HX à ailettes solides et (c) HX à ailettes perforées.....	35
Figure II.14 (a) ailette droit,(b) ailette bifurquée.....	36
Figure II.15 variation de la température en fonction de la conductivité thermique...36	
Figure II.16 Contours des fractions liquides en fonction du temps pour des différents Maillages.....	37
Figure II.17 Evolution de la fraction liquide dans les trois cas expérimental isolation et pertes thermiques.....	38
Figure II.18 Distribution transitoire de la température, front solide et changements de forme de retrait pendant le cours de la solidification TNT.....	38
Figure II.19 Comparaison des formes de retrait prévues en utilisant les procédures de refroidissement originales.....	39
Figure II.20 Comparaison du procédé de fusion à partir de (a) l'étude Expérimentale et (b) du présent rapport.....	40
Figure II.21 Evaluation de l'interface solide-liquide à (a) 500(b) 1500 (c) 2600 s pour la solidification avec retrait, et (d) 500 (E) 1500 et (n) 2900s la solidification sans retrait dans le cas de la paraffine.....	40

Liste des figures

Figure II.22 Variation de la forme de retrait avec les différents rapports d'aspect de (a) AR = 0.5, (b) AR = 1 (c) AR = 2 (la région grise est solide et la région blanche est vide).....	41
Figure II.23 Comparaison 2D d'état de phase et de vitesse pour le modèle Boussinesq 2D et pour le VOF modèle (V-2D).....	41
Figure II.24 Contours de densité dans les cavités avec diffusivité thermique Différente pour $st=0.18$	42
Figure II.25 Fraction liquide (air liquide MCP) dans la cavité avec $st=0.18$	43
Figure II.26 Fraction liquide pour différent nombre de Stefan dans la cavité de cuivre.....	43
Figure II.27: Domaine informatique des cavités.....	44
Figure II.28: Contours de la fraction liquide et la densité de la solidification dans la cavité sphérique.....	45
Figure II.29 Contours de la fraction liquide et la densité de la solidification dans la cavité rectangulaire.....	45
Figure II.30: Variation de concentration le long de la direction X de Al-Cu4.1% en poids au plan $y=0.2m$ et $y =0.5m$ à (a) 10s, (b) 30s, (c) 40s et (d) 50s.....	46
Figure II.31 : Etude avec différents agencements de paires sources de chaleur dissipateur pour tous les cas.....	47
Figure II.32: liquide fraction en fonction de temps pour la catégorie Catégorie A, (b) Catégorie B cases, (c) Catégorie C cases and, (d) température moyenne pour tous les cas.....	48
Figure II.33: Modèle de calcul de la capsule avec du vide.....	49
Figure III.1 Cavité remplie de la paraffine solide en présence d'un espace d'air.....	51

Liste des figures

Figure III.2 Dimensions du modèle physique étudié.....	52
Figure III.3 Variation de la masse volumique de la paraffine en fonction de température.....	54
Figure III.4 Conditions aux limites.....	58
Figure III.5 Création de la géométrie dans DESIGN MODELER	59
Figure III.6 Création du maillage dans MESHING.....	60
Figure III.7 Interface de Fluent avec les paramètres du solveur utilisé.....	61
Figure III.8 Constante de Darcy utilisée.....	61
Figure III.9 Facteurs de sous relaxation.....	62
Figure III.10 :Adaption de région.....	62
Figure IV.1 Evolution de la fraction liquide pour les trois maillages.....	66
Figure IV.2 : Evolution de la fraction volumique (paraffine-air) en fonction du temps	68
Figure IV.3 : Evolution de la fraction liquide de la paraffine en fonction du temps, sans et avec présence d'un espace d'air.....	70
Figure IV.4 : Evolution temporelle de la fraction liquide avec et sans espace d'air....	71
Figure IV.5 : Evolution de la température de la paraffine en fonction du temps, sans et avec présence d'un espace d'air.....	72
Figure IV.6 :Evolution de la Température et la densité de la paraffine dans une cavité avec espace d'air.....	74
Figure IV.7 : Evolution de la fraction liquide et la densité en fonction de temps.....	74
Figure IV.7 : Evolution de coefficient de dilatation.....	75

Liste des tableaux

Tableau I.1: Principales propriétés pour choix des MCP.....	9
Tableau I.2 Propriétés thermiques de certains MCP organiques	13
Tableau I.3 Propriétés thermiques de certains MCP inorganiques.....	15
Tableau I.4 Principaux avantages et inconvénients de chaque type de MCP.....	18
Tableau III.1 Propriétés thermo-physiques de la paraffine utilisée.....	53
Tableau III.2 Propriétés thermo-physiques de l'air.....	53
Tableau IV.1 Les tailles des trois maillages.....	66

Introduction générale

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont utilisés dans une vaste gamme d'applications dans lesquels ils peuvent servir, entre autres, au stockage d'énergie thermique sous forme latente. Les changements de phase liquide-solide ont été le sujet de plusieurs études dans les dernières décennies autant au niveau expérimental que numérique. La modélisation numérique du changement de phase présente un défi considérable et la plupart des modèles présentés dans la littérature utilisent de nombreuses simplifications à la physique du problème. Ces simplifications peuvent engendrer des différences significatives entre le modèle numérique et la réalité. Les aspects de modélisation suivants sont la majeure partie du temps négligés et pourraient expliquer certaines différences obtenues lors de la comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux :

- La différence de densité pour les phases liquides et solides.
- La vitesse normale de la phase liquide à l'interface de changement de phase résultant de la différence de densité entre les deux phases.
- Les propriétés de changement de phase (température de fusion, chaleur latente) variables en fonction de la pression.
- La dilatation thermique des matériaux à changement de phase.
- Le mouvement des parties solides isolées dans le fluide sous l'effet de la force de gravité.
- L'effet de l'espace d'air sur la fusion.
- Les variations de densité lors du changement de phase entraînent des variations de volume.

La complexité additionnelle et les défis associés à la modélisation mathématique et numérique du changement de phase solide-liquide avec les variations de densité sont tels que seulement un petit nombre d'études sur ce sujet sont disponibles dans la littérature.

De ce fait, C'est pourquoi il est important de considérer l'impact des différents aspects mentionnés précédemment sur la modélisation numérique du changement de phase afin de déterminer la précision supplémentaire apportée aux résultats justifie l'accroissement considérable de la complexité du problème et du temps requis pour effectuer les simulations numériques.

Pour atteindre les objectifs fixés à cette étude, on a subdivisé ce mémoire en quatre chapitres :

- Le premier chapitre porte sur l'étude théorique des MCP basée sur les connaissances les plus récentes.
- Le deuxième chapitre est une revue bibliographique consacrée à l'exposé des travaux de recherche sur les phénomènes de fusion des matériaux à changement de phase (MCP).
- Le troisième chapitre est consacré à la position du problème, formulation mathématique et les conditions initiale et aux limites.
- Le quatrième chapitre présente les résultats numériques et leurs interprétations.

Enfin cette étude est achevée par une conclusion générale regroupant les résultats les plus marquants de ce travail en donnant des perspectives pour la suite des travaux.

Chapitre I

Généralités sur

Stockage de

l'énergie et les

matériaux à

changement de

phase

I.1 Introduction

Le Stockage de l'énergie thermique (TES: Thermal Energie Storage) en général, et les matériaux à changement de phase en particulier, ont été un sujet principal dans la recherche au cours des 20 dernières années, mais bien que l'information est quantitativement énorme, il est également largement répandu dans la littérature, et difficile à trouver. L'intérêt international pour l'énergie de stockage thermique car il traite de l'économie d'énergie, l'utilisation efficace et rationnelle des ressources disponibles et l'utilisation optimale des énergies renouvelables. Dans ce cadre, le TES fournit des solutions dans des domaines très spécifiques: Le temps de retard et la puissance disponible entre la production ou la disponibilité de l'énergie et sa consommation dans les systèmes de réception (de l'énergie solaire, cogénération, etc.) Sécurité de l'approvisionnement énergétique (hôpitaux, centres informatiques, etc.)

Dans ce chapitre, en premier lieu nous allons exposer

- les différents types de stockage de l'énergie thermique, en particulier le stockage d'énergie par chaleur latente.
- les matériaux à changement de phase (MCP).

I.2 Types de stockage de l'énergie

Il existe différents types de systèmes de stockage d'énergie qui sont actuellement utilisés dans divers domaines d'applications techniques

I.2.1 Stockage d'énergie chimique

Les réactions chimiques peuvent absorber ou libérer une quantité importante d'énergie lorsque les liaisons chimiques se rompent ou forment de nouvelles substances. Les combustibles chimiques, tels que le charbon, l'essence, le carburant diesel, le gaz naturel, le gaz de pétrole liquéfié (GPL), le propane, le butane, l'éthanol, le biodiesel et l'hydrogène, peuvent être utilisés pour stocker de l'énergie dans leurs liaisons chimiques. Ce processus est connu sous le nom de power-to-gas ou power-to-liquid, selon la phase des combustibles chimiques de sortie.

I.2.2 Stockage d'énergie électrochimique

Les unités de production d'énergie électrochimique convertissent simplement l'énergie chimique en électricité. Trois types de dispositifs électrochimiques sont fréquemment utilisés dans des applications très diverses pour stocker/libérer de l'énergie :

- Les condensateurs électrochimiques
- Les batteries
- Les piles à combustible.

L'intégration de batteries dans les systèmes de production d'énergie renouvelable, tels que l'énergie photovoltaïque ou éolienne, peut permettre de stocker la quantité excessive d'énergie produite pendant les périodes hors demande. L'énergie stockée peut être déchargée en douceur des batteries et fournie au consommateur lorsque la demande est supérieure à la production.

I.2.3 Stockage d'énergie électrique

Ce stockage est relatif à une utilisation locale d'énergie électrique, stationnaire ou mobile. Il se fonde sur la conversion instantanée de l'énergie mécanique en énergie électrique.

- Supraconducteurs magnétiques : stockage électromagnétique.
- Photovoltaïque : piles, accumulateurs.

I.2.4 Stockage d'énergie mécanique

L'énergie électrique générée à partir d'une ressource renouvelable peut être convertie en énergie mécanique, potentielle ou cinétique, afin de stocker la quantité excessive d'énergie produite pour une utilisation ultérieure. Dans les techniques traditionnelles de stockage mécanique l'une des méthodes suivantes est utilisée :

- L'hydroélectricité par pompage
- L'air comprimé

- Le volant d'inertie. Parmi les autres stratégies de stockage d'énergie, les applications de stockage d'énergie mécanique offrent la possibilité de stocker une quantité importante d'énergie.

I.2.5 Stockage de l'énergie thermique

Le stockage d'énergie est l'action qui consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure. Essentiellement trois modes de stockage thermique peuvent être envisagés [1] :

- le stockage par chaleur sensible qui exploite la capacité calorifique d'un matériau.
- le stockage par chaleur latente qui consiste à utiliser le changement d'état d'un Matériau à Changement de Phase (MCP).
- le stockage thermochimique c'est la chaleur absorbée ou libérée au cours d'une réaction chimique endothermique ou exothermique. Le stockage d'énergie thermochimique est basé sur l'énergie des liaisons des composés chimiques mise en jeu au cours des réactions chimiques réversibles.

Pour sélectionner le type de stockage, il conviendra de regarder pour quelle application il sera mis en œuvre, donc le choix de la méthode de stockage dépend de l'application envisagée. Chaque type présente des avantages et des inconvénients.

I.2.5.a Principe de stockage par chaleur latente

Le stockage de chaleur latente (LHS) est basé sur le dégagement de chaleur ou l'absorption de chaleur pendant le changement de phase d'un matériau de stockage du solide au liquide ou du liquide au gaz ou vice versa. Les MCP (paraffine, hydrates de sel et sels fondus) présentent un avantage visible par rapport aux matériaux de stockage de chaleur sensible.

Le stockage de chaleur latent (LHS), par rapport au stockage de chaleur sensible (SHS), offre une densité de stockage d'énergie plus élevée avec des changements de température proches de zéro. Cependant, des difficultés surviennent généralement en réalité en raison du faible changement de densité, de la conductivité thermique, du sous-refroidissement des matériaux à changement de phase, de la stabilité des

propriétés sous cycle prolongé et parfois de la ségrégation de phase. Les matériaux à changement de phase sont spécifiquement utilisés dans les systèmes de stockage d'énergie thermique latente, et par conséquent, le MCP peut également être appelé matériau de stockage de chaleur latente. Le transfert d'énergie thermique du MCP se produit pendant le processus de charge ou de décharge (fusion ou solidification) au cours duquel l'état ou la phase du matériau passe de liquide à solide ou de solide à liquide. Au début du chauffage du matériau, la température du MCP augmente en absorbant l'énergie thermique. Lorsque le matériau atteint une plage de température spécifique, il commence à fondre lorsque le matériau commence à subir une transition de phase de l'état solide à l'état liquide. Cependant, contrairement aux matériaux de stockage de chaleur sensible, pendant le processus de transition de phase, le MCP libère ou absorbe de la chaleur à une température constante ou presque constante. De nombreux auteurs ont expérimenté différents types de MCP en les subdivisant en types organiques, inorganiques et eutectiques. Cependant, la majorité du matériau à changement de phase ne possède pas les propriétés recommandées pour un milieu d'énergie thermique idéal, et ainsi, des amplificateurs thermiques sont utilisés pour améliorer les inconvénients que le milieu peut avoir [2].

Dans le stockage par chaleur latente (solide /Liquide), l'énergie est emmagasinée grâce au changement d'état d'un matériau de stockage. La chaleur latente est la quantité de chaleur absorbée ou restituée par un matériau lors de son changement de phase, à température et pression constantes. Elle s'exprime ainsi [3] :

$$Q_{Latente} = mLf \quad (I.1)$$

m :est la masse du matériau de stockage.

Lf :La chaleur latente de fusion.

$Q_{Latente}$: La chaleur massique de changement d'état du matériau.

Dans la pratique, il se peut que la chaleur sensible et la chaleur latente interviennent successivement dans les processus thermiques. En effet, si on considère

qu'un constituant servant de stockage est initialement à la température T_1 , qui est inférieure à la température de fusion T_f et que T_f soit inférieure à la température finale T_2 ($T_1 < T_f < T_2$), le stockage se fera sous forme sensible et sous forme latente. A pression constante, le stockage de l'énergie est donné par la variation d'enthalpie [3] :

$$Q_{stocké} = mcp_s (T_f - T_1) + mLf + mcp_l(T_2 - T_f) \quad (I.2)$$

cp_s : Capacité thermique de corps à l'état solide.

cp_l : Capacité thermique de corps à l'état liquide.

T_f : Température de fusion.

T_1 : Température initiale.

T_2 : Température finale.

La quantité de chaleur stockée dans un système latent est présentée sur le graphe température – énergie de la Figure (I-1).

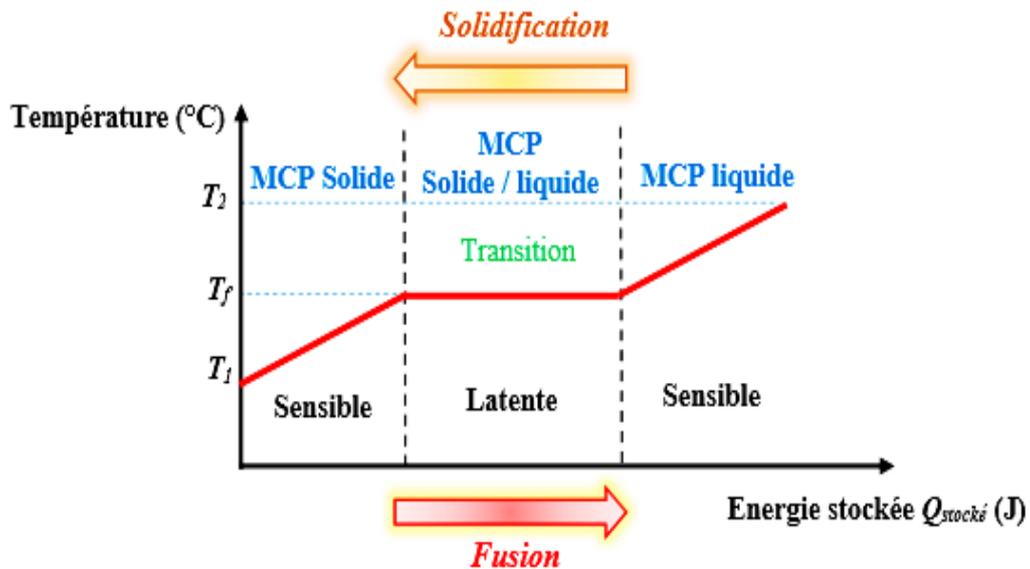


Figure I.1 :Etapes de stockage de la chaleur par un matériau en fonction de la température.

I.2.5.b Les matériaux utilisés pour un stockage latent

Les matériaux de stockage de chaleur latente sont appelés MCP. Le transfert d'énergie thermique se produit lorsqu'un matériau passe du solide au liquide ou du liquide au solide. Qui s'appelle un changement d'état. Ces MCP solides-liquides fonctionnent comme des matériaux de stockage sensible, leur température augmente à mesure qu'ils absorbent la chaleur. Contrairement aux matériaux de stockage sensibles, le MCP absorbe et libère de la chaleur à une température presque constante [3].

Tableau I.1: Principales propriétés pour choix des MCP

Propriétés thermiques	<ul style="list-style-type: none">• Bon transfert de chaleur• Conductivité thermique élevée en phase liquide et solide• Chaleur latente de transition élevée• Température de transition de phase appropriée
Propriétés physiques	<ul style="list-style-type: none">• Faible pression de vapeur• Petit changement de volume• Haute densité• Equilibre de phase favorable
Propriétés cinétiques	<ul style="list-style-type: none">• Pas de surfusion• Taux de cristallisation
Propriétés chimiques	<ul style="list-style-type: none">• Aucun risque d'incendie• Compatibilité avec les métaux de construction• Stabilité chimique à long terme
Propriétés économiques	<ul style="list-style-type: none">• Retable• Disponible• Abondantes

I.3 Différents types de changement de phase

L'intérêt de la chaleur sensible est de pouvoir stocker directement le fluide caloporteur dans un grand volume. Pour stocker la chaleur sensible de façon indirecte, un fort gradient de température est nécessaire. Une solution pour gagner de la place et réduire l'intervalle de température du stockage est d'utiliser la chaleur latente. La chaleur est stockée dans une gamme de température autour du point de fusion ou de vaporisation d'un matériau à changement de phase (PCM). Plus la gamme de température est petite, plus la part d'énergie stockée par le changement d'état est importante. Le stockage est efficace à la condition que l'ensemble du matériau change d'état. Les diverses transformations existantes sont représentées sur la Figure (I.2). Chaque transformation se réalise à température constante.

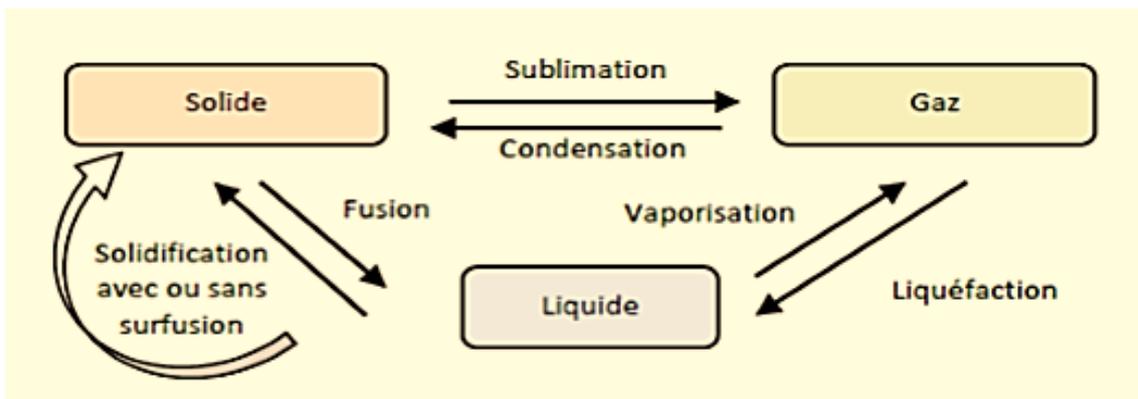


Figure I.2 :Diagramme de changement d'état d'un matériau

Chaque type de ce changement de phase (solide/liquide, solide/solide ou liquide/gaz) présente des avantages et des inconvénients [4]

- Le changement de phase liquide/gaz met en jeu les plus grandes chaleurs de changement d'état mais il présente un grand changement volumique, ce qui rend les applications peu pratiques et pose un problème de stockage qui peut être crucial.
- Dans le cas d'un changement de phase solide/solide, le matériau absorbe et cède la chaleur comme dans le cas solide/liquide, mais ne devient jamais liquide sous les conditions normales, il devient alors plus ou moins dur. Cet avantage est largement compensé par les faibles chaleurs latentes et par la

difficulté de trouver des niveaux de températures de changement d'état compatibles avec les applications.

- Le changement de phase solide/liquide met en jeu des chaleurs latentes d'importance moyenne mais ne présente pas de changements de volumes incompatibles avec un stockage facile. De plus, il existe un choix important de matériaux dont les niveaux de températures de changement d'état ont des valeurs compatibles avec de nombreuses applications. C'est ce type de changement de phase que nous retiendrons dans notre étude.

I.4 Matériau à changement de phase

L'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) pour le stockage d'énergie thermique a suscité un regain d'intérêt ces dernières années. Cela est dû au fait que les MCP ont de fortes densités de stockage (quantité d'énergie stockée par unité de masse). En outre, ces matériaux peuvent être appliqués dans plusieurs domaines [5,4]. Ils ont pour particularité de pouvoir stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente. Par exemple dans le cas de la fusion ou solidification, voir la figure (I.3). La chaleur étant absorbée ou restituée lors du passage de l'état solide à l'état liquide (et vice versa). Les MCP reposent sur l'application d'un principe physique simple. Au-delà d'une certaine température caractéristique de chaque matériau, ils se liquéfient en absorbant la chaleur de l'atmosphère ambiante et les restituent lorsque la température baisse.[6]



Figure I.3 : principe de fonctionnement des matériaux à changement de phase.

I.5 Classification des matériaux a changement de phase

On distingue trois grandes familles de MCP : les composés organiques, les composés inorganiques et les mélanges eutectiques. Chacune de ces familles peut être décomposée en sous-groupes, dont les comportements physiques et chimiques très différents influent sur la conception du système de stockage [5] (figure I.4).

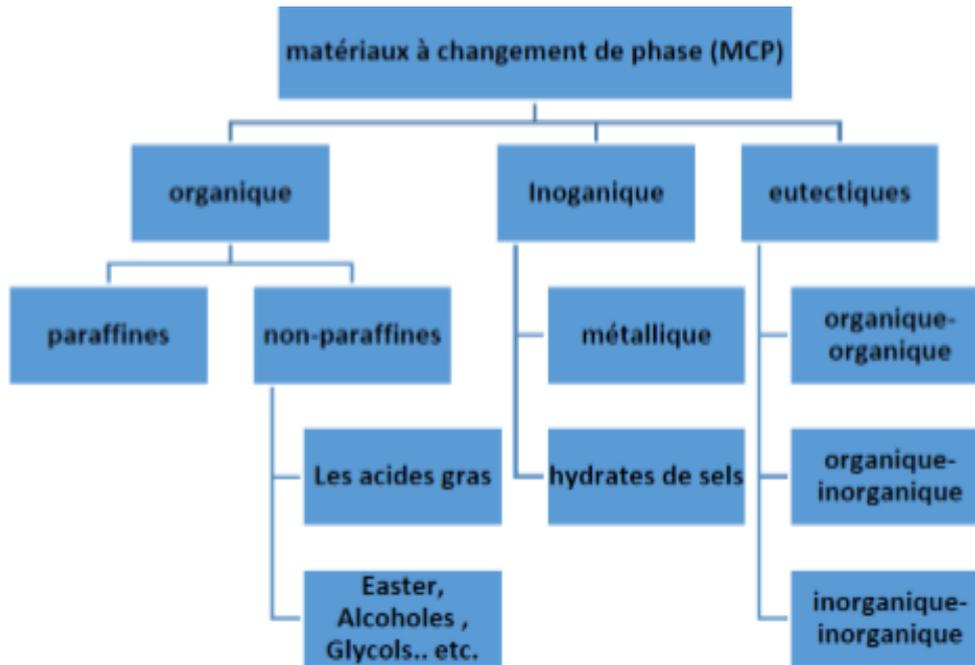


Figure I.4 :Classification des MCP

I.5.1 Matériaux organiques

Les produits organiques sont sans doute le type de MCP le plus populaire. Les produits organiques peuvent inclure une large gamme de MCP tels que ceux de la famille des alcanes (paraffine) (C_nH_{2n+2}) et de la famille des acides gras ($CH_3(CH_2)_{2n}COOH$). Les PCM organiques ont tendance à être abondamment disponibles, relativement peu coûteux et faciles à utiliser. Les alcanes et les acides gras ont des caractéristiques physiques similaires, présentant une surface blanche qui est d'apparence molle et cireuse. Les produits organiques, en particulier la paraffine, sont les MCP les plus couramment étudiés pour la gestion thermique de l'électronique. La plage de fusion des matériaux de la famille des paraffines a tendance à être de 35 °C à environ 70 °C, en fonction de la structure de l'hydrocarbure spécifique, ce qui en fait

une excellente correspondance avec l'électronique qui a une température de jonction maximale d'environ 85 °C [7][8].

Tableau I.2 : Propriétés thermiques de certains MCP organiques.

Type	Composé	Température de fusion °C	Chaleur latente (Kj/Kg)	ρ (Kg/m ³)	Cp(Kj/Kg)	K(W/m.K)
Paraffine	Octadécane	29	244	814(sol) 724(liq)	2150(sol) 2180(liq)	0.358(sol) 0.152(liq)
Paraffine	Tétracosane	51.5	207.7	773.6(liq)	2924(liq)	0.137(liq)
Paraffine mélange	IGI 1230A	54.2	278.2	880(sol) 770(liq)	2800(liq)	0.25(sol) 0.135(liq)
Acides gras	Acide caprique	32	153	1004(sol) 878(liq)	1950(sol) 1720(liq)	0.153
Acides gras	Acide l'aurique	44	178	1007(sol) 965(liq)	1760(sol) 2270(liq)	0.147(liq)
Acides gras	Acide stéarique	69	202	965(sol) 848(liq)	283(sol) 2380(liq)	0.172(liq)

Les paraffines : La cire de paraffine est constituée d'un mélange de n alcanes à chaîne droite principalement CH₃– (CH₂) –CH₃. La cristallisation de la chaîne (CH₃) libère une grande quantité de chaleur latente à la fois au point de fusion et la chaleur latente de fusion augmente avec la longueur de la chaîne. La paraffine est qualifiée de chaleur des matériaux de stockage de fusion en raison de leur disponibilité dans une large plage de températures. Cependant, pour des raisons de coût, seules des paraffines de qualité technique peuvent être utilisées comme PCM dans les systèmes de stockage de chaleur latente. La paraffine est sûre, fiable, prévisible, moins chère et non corrosive.

Ils sont chimiquement inertes et stables en dessous de 500 ° C, présentent de faibles variations de volume lors de la fusion et ont une faible pression de vapeur sous forme fondue [9]



Figure I.5 :Paraffine

Les non-paraffines : Des esters, acides gras ; alcools et glycols peuvent être utilisés comme medium organiques de stockage thermique par chaleur latente. Ces matériaux doivent être conditionnés car ils sont inflammables et ne doivent pas être exposés à des agents oxydants. Leurs caractéristiques sont assez différentes d'une substance à l'autre contrairement aux paraffines [10].



Figure I.6 :Acide stéarique (acide gras)

I.5.2 Matériaux inorganiques

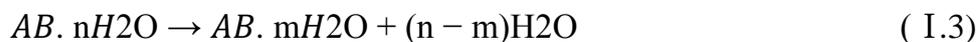
Les matériaux inorganiques sont également classés en hydrates de sel et en métaux. Ces MCP ne se surfondent pas sensiblement et leurs chaleurs de fusion ne se dégradent pas avec le cycle[11] [12].

Tableau I.3 :Propriétés thermiques de certains MCP inorganiques

Composé	Température de fusion °C	Chaleur latent (Kj/Kg)	ρ (Kg/m ³)	K(W/m.K)
MgCl ₂ -6H ₂ O	117	168.6	1569(sol) 1450(liq)	0.694(sol) 0.579(liq)
NaNO ₃	307	172	2260	0.5
CaCl ₂ -6H ₂ O	29	170-192	1802(sol) 1562(liq)	1.008(sol) 0.561(liq)
NaSO ₄ 10H ₂ O	32	251	1485	0.544
KNO ₃	333	266	2110	0.5
NaCl	802	492	2160(sol)	5

Hydrates de sels

Les hydrates de sel sont des sels inorganiques qui contiennent de l'eau et dont la formule générale est AB.nH₂O. Pendant la charge, la déshydratation du sel a lieu. Le produit de cette déshydratation peut être un hydrate de sel avec moins molécules d'eau selon la formule :



Ou bien le même sel sous sa forme anhydre :



Le sel hydraté le plus utilisé par son faible coût est le $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ ($T_{\text{fusion}} = 28-30^\circ\text{C}$). On peut citer aussi le $Mn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ pour les applications de climatisation, et un nouveau matériau obtenu à partir de $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ utilisé avec des additifs pour des applications industrielles autour de 100°C . On peut aussi citer la bischofite comme exemple d'un mélange d'hydrates de sels composée à 95 % massique de $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ et à 5 % massique de $KMgCl_3 \cdot 6H_2O$, $Li_2SO_4 \cdot H_2O$ et autres sels ioniques tels que $NaCl$ et KCl et ayant une température de fusion autour de 98.9°C [13].

Métaux

La famille des métaux est peut-être la plus sous-utilisée de toutes les familles de MCP, peut-être en raison de la faible chaleur latente que présentent la plupart de ces matériaux. Cependant, malgré cela, les métaux sont prometteurs dans certaines applications. Les MCP à base de métaux comprennent un certain nombre de matériaux dont les points de fusion se situent dans l'intervalle des applications MCP souhaitées. Nombre de ces métaux sont faciles à travailler et sont utilisés depuis des années dans d'autres applications nécessitant des métaux fondus [14].

I.5.3 Eutectiques

Les MCP eutectiques sont des mélanges de deux ou plusieurs substances qui se comportent comme un corps pur, c'est-à-dire que leur température de changement d'état est unique. En général, les eutectiques sont des mélanges de MCP organiques et inorganiques. Les eutectiques fondent et gèlent presque toujours sans ségrégation car ils gèlent en un mélange intime de cristaux, laissant peu de possibilités de séparation des composants. Lors de la fusion, les deux composants se liquéfient simultanément, la séparation étant à nouveau peu probable.

I.6 Critère de sélection d'un MCP

La sélection d'un MCP nécessite une réflexion et analyse autour de la densité de stockage souhaitée, des puissances de charge et de décharge mais aussi des critères économiques et environnementaux sont à entreprendre pour sélectionner le meilleur MCP. Alors le choix d'un MCP repose sur le critère suivant [4]

a) Propriétés thermo-physiques

- Le point de fusion/solidification se situe dans la plage de fonctionnement du procédé.
- Une capacité calorifique, chaleur latente et masse volumique élevées afin de réduire au minimum les dimensions du stockage.
- Le minimum d'expansion volumique lors du changement d'état afin d'utiliser des structures géométriques simples contenant le PCM, cela limitera les dégâts dus aux contraintes mécaniques sur la structure du contenant.
- Une conductivité thermique élevée afin d'avoir un minimum de gradient dans le PCM et assurer une puissance élevée de charge et décharge du stockage.

b) Propriétés chimiques

- La stabilité chimique à long terme permet le cyclage des MCP, sans dégradation chimique du matériau.
- Le MCP n'est ni toxique, ni explosif, ni dangereux pour l'environnement.
- Son potentiel de corrosion est faible et il est compatible avec les matériaux utilisés dans la construction de l'échangeur (acier, inox, cuivre, aluminium etc...) ainsi qu'avec le fluide caloporteur (vapeur, eau, huile thermique etc...).

c) Critères économiques

- Disponible en grandes quantités.
- A bon marché.

I.7 Avantages et les inconvénients des différents types des MCP

Les avantages et les inconvénients des différents types des MCP sont indiqués dans le tableau I.4 [15][16][17]

Tableau I.4 :Principaux avantages et inconvénients de chaque type de MCP

Types	Avantages	Inconvénient
Organique	<ul style="list-style-type: none">• Disponible dans une large gamme de température• Inerte chimiquement.• Ne subissent pas de ségrégation de phase.• Thermiquement stables pour des cycles répétés de congélation/fusion.• Faible pression de vapeur à l'état fondu.• Chaleur de fusion relativement faible.• Non corrosif ou légèrement corrosif(acides gras).• Compatible avec les matériaux de construction.• Faible changement de volume lors des transitions de phase.• Peu ou pas d'effet de su refroidissement pendant la congélation.• Recyclable.• Inoffensif(généralement non-toxique et non irritant .• Stable en dessous de 500 °C (le type non paraffines peuvent présenter différents niveaux de toxicité.	<ul style="list-style-type: none">• Faible conductivité thermique (0.2)• Modérément inflammable .• Non compatible avec les récipients en plastique.• Densité peu importante.

Inorganique	<ul style="list-style-type: none"> • Chaleur de stockage volumétrique élevée. • Chaleur de fusion élevée. • Conductivité thermique élevée. • Facilement disponible. • Compatible avec les récipients en plastique. • Changement de phase brutal. • Faible impact environnemental. • Potentiellement recyclable. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ségrégation de phase pendant les transitions. • Corrosif pour les métaux. • Irritant. • Pression de vapeur élevée. • Faible durabilité stabilité chimique modérée. • Changement de volume élevé.
Eutectiques	<ul style="list-style-type: none"> • Température de fusion élevée. • Capacité de stockage thermique volumétrique élevée (légèrement inférieure aux PCM (organique)). 	<ul style="list-style-type: none"> • L'inconvénient de ce type est de réussir à déterminer le point eutectique exact afin d'avoir une température de fusion unique comme pour un corps pur.

I.8 Positionnement et objectifs

Les MCPs sont des matériaux intéressants pour le stockage thermique grâce à leur capacité calorifique et leur chaleur latente élevées. Cependant ils ont une conductivité thermique relativement faible par rapport à des métaux ou des alliages ce qui limite sérieusement leurs applications pratiques. Par conséquent, plusieurs techniques ont été proposées pour améliorer le transfert de chaleur dans les MCP tels que :

- L'utilisation des PCM multiples.
- L'ajout des ailettes au système de stockage.
- Varier la configuration géométrique et l'angle d'inclinaison.
- L'ajout de nanoparticules au sein du MCP afin d'augmenter sa conductivité thermique apparente.
- L'encapsulation pour augmenter la surface d'échange.

L'objectif d'ajouter des ailettes de différents rapports de forme dans un élément de stockage est pour l'accélération de la fusion de MCP.

I.9 Les applications des MCP

- Industrie textile.
- Energie solaire.
- Diminuer les effets exothermiques de réactions chimiques.
- Isolation des bâtiments :Le début de la commercialisation de ce type de matériaux débute dans les années 1990. On retrouve les matériaux à changement de phase dans le bâtiment principalement sous la forme de plaques où les MCP sont encapsulés. La capsule permette de garder la solidité de la paroi du bâtiment.

I.11 Conclusion

Le stockage thermique principalement se fait par chaleur sensible ou par chaleur latente. Dans la présente étude on s'intéresse au stockage thermique par chaleur latente, cette méthode de stockage de l'énergie est très efficace due à sa densité énergétique élevée, la possibilité de restituer la chaleur à température constante et aussi de stocker une quantité de chaleur fixe indépendamment du niveau de température du fluide caloporteur.

La performance des systèmes de stockage par chaleur latente est limitée par la faible conductivité thermique des MCPs utilisés.

Chapitre II

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

II.1 Introduction

Les premiers travaux sur les problèmes de changement de phase ont été effectués par le savon Autrichien, Josef Stefan en 1889. Vu leur intérêt industriel et leurs applications, plusieurs chercheurs se sont été intéressés par la suite à l'étude de ce phénomène. Dans le domaine de stockage de l'énergie par chaleur latente, un nombre important des travaux expérimentaux et numériques ont été effectués jusqu'à nos jours. L'objectif principale de ces études est d'améliorer l'unité de stockage afin d'augmenter le rendement de stockage.

Parmi les matériaux à changement de phases les plus couramment utilisés dans le stockage de l'énergie thermique est la paraffine, car elle présente plusieurs avantages. Cependant, leur inconvénient majeur est leur faible conductivité thermique de l'ordre de 0,2 à 1.0 [W/mK], ce qui diminue le taux de fusion / solidification et limite sérieusement leurs applications pratiques. Par conséquent, plusieurs techniques ont été proposées pour améliorer le transfert de chaleur dans les MCP tels que l'utilisation des différents MCP [18], micro et nano encapsulation [19], varier la configuration géométrique et l'angle d'inclinaison et la dispersion des nanoparticules de haute conductivité thermique dans les MCP (NeMCP) [20-21].

L'ajout d'une structure métallique à l'intérieure de l'unité de stockage MCP est une des techniques utilisée afin d'augmenter la surface d'échange et accéléré la fusion ou la solidification de MCP. Ces structures métalliques sont appelées les ailettes.

II.2 Travaux numériques et expérimentales

Hale et Viskanta [22] ont étudié expérimentalement et analytiquement le transfert thermique associé au changement de phase solide-liquide dans différents matériaux susceptibles qui sont utilisés dans le stockage de l'énergie thermique afin de déterminer le mouvement de l'interface solide-liquide pendant la fusion et la solidification dans une cellule rectangulaire.

Ils ont constaté que la convection naturelle dans le liquide doit être considérée dans la prévision du mouvement de la frontière pour les situations instables qui apparaissent pendant la fusion à partir du bas et la solidification à partir du haut.

Webb et Viskanta [23] ont étudié expérimentalement le transfert thermique lors de la fusion dans une enceinte rectangulaire inclinée.

Ils ont observé que l'effet de l'inclinaison est d'établir un mouvement tridimensionnel de convection naturelle qui s'intensifie lorsque l'angle d'inclinaison à partir de la verticale augmente. La tridimensionnalité du champ d'écoulement provoque une fusion non uniforme du solide. La morphologie de l'interface est utilisée pour inférer la structure de l'écoulement et le transfert tridimensionnel d'énergie. Les configurations d'écoulement dépendent de l'angle d'inclinaison et du sous-refroidissement initial du solide. Ils ont pu trouver une formule pour décrire l'effet de l'inclinaison et de la fraction liquide en fonction du temps

Hamdan et Elwerr [24] ont étudié le processus de la fusion bidimensionnel d'un matériau à changement de phase. Le matériau est enfermé dans une enceinte rectangulaire chauffée d'un seul côté, tandis que tous les autres côtés sont supposés adiabatiques. Le mode convectif est considéré être le mode dominant lors du processus de transfert de chaleur à l'intérieur de la zone de fusion, sauf dans la région très proche de la surface solide au fond, où le mode de conduction était uniquement pris en compte.

Ils ont constaté que cette analyse a été utilisée pour prédire la fraction fondue du matériau à changement de phase et donc la quantité d'énergie stockée.

Binet [25] a étudié numériquement la fusion régie par la convection naturelle d'un matériau à changement de phase dans une enceinte rectangulaire chauffée à l'aide de sources de chaleur discrètes réparties le long des parois latérales conductrices. Un modèle numérique reposant sur les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie est exposé. Une méthode de volume de contrôle couplée à une formulation enthalpique pour le changement de phase est adoptée. Aussi, l'effet de la dimension, de l'espacement, de la puissance et du nombre de

sources de chaleur sur le phénomène de fusion sont examinés. Montrent qu'il est avantageux d'utiliser un chauffage discret plutôt qu'uniforme du point de vue de la durée de la fusion et de la température des sources de chaleur.

Erek et al. [26]. ont étudié le stockage de l'énergie thermique dans un tube annulaire contenant un MCP et des ailettes de différent rapports de formes qui sont distribuées d'une façon radiales comme indiquées sur la figure (II.1)

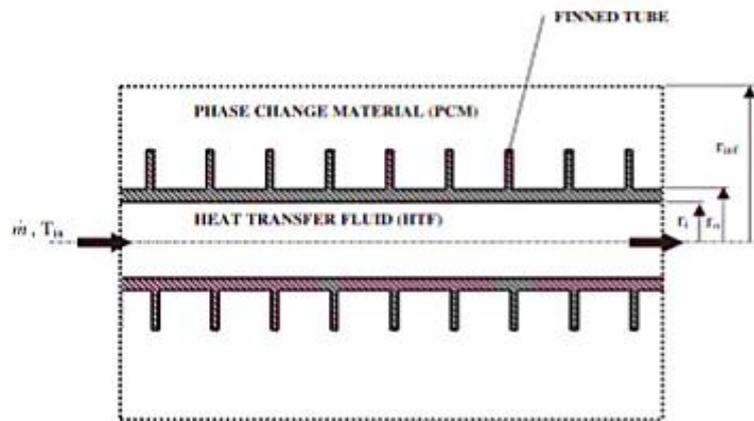


Figure II.1 :Schéma du système de stockage d'énergie thermique avec tube à ailettes.

Ils ont constaté que les effets de nombre Reynolds et le nombre de Stefan sur l'énergie stockée sont plus important par rapport au rapport l'effet de forme de ces ailettes. Ils ont trouvé que les résultats numériques sont on bon accord avec l'expérimentale.

Arasu et Mujumdar [27] ont présenté une étude numérique de la fusion d'un nano MCP (cire de paraffine avec alumine) dans une enceinte carrée de dimensions (25 mm × 25 mm) chauffée (A) par bas et (B) par la gauche à l'aide de formulation enthalpie-porosité. À partir des observations marquées dans cette étude.

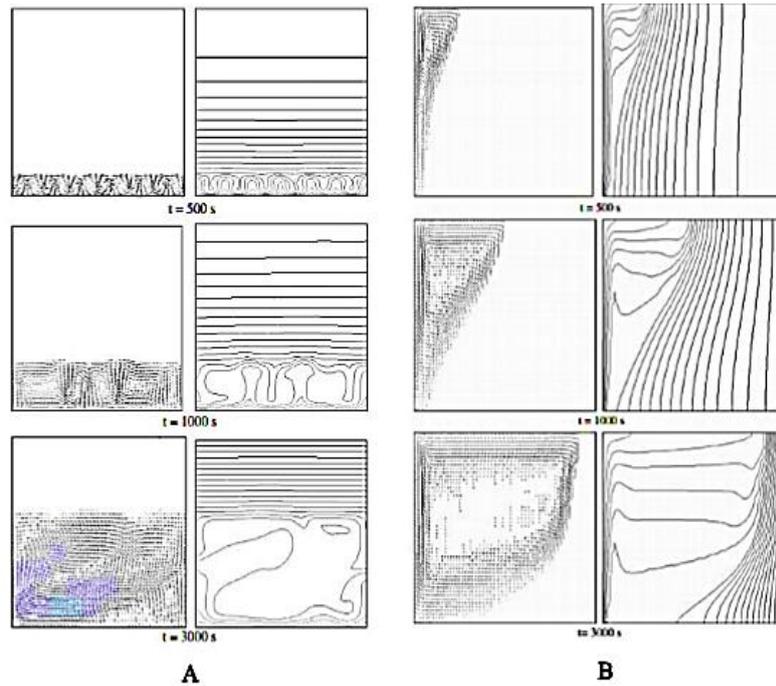


Figure II.2 : Distribution de flux (à gauche) et les isothermes (à droite) dans la zone de fusion de la cire de paraffine avec l'aluminium.

Ils ont constaté que la forme de l'interface dépend de l'épaisseur de la couche de liquide au cours de la fusion, des modèles d'écoulement multicellulaires dans le chauffage de la paroi inférieure horizontale et il n'y a qu'un seul modèle d'écoulement de cellules dans le chauffage mural vertical. Le taux décroît avec l'augmentation de la composition volumétrique de l'alumine (Al_2O_3) pour les systèmes de chauffage à paroi horizontale et verticale. De plus, le taux de fusion et l'énergie emmagasinée sont plus importants pour le chauffage mural vertical que pour le chauffage mural horizontal dans une enceinte carrée pour améliorer l'effet de la convection naturelle.

Mat et al.[28] ont étudié numériquement la fusion MCP (RT 82) dans un échangeur de chaleur à tube triplex avec des ailettes longitudinales . Quatre configurations ont été étudié, voir la figure (II.3).

Ils ont conclu que l'amélioration de transfert de chaleur est obtenue dans la géométrie (c) où le temps de fusion est réduit à 43.3% par rapport au cas sans ailettes (a)

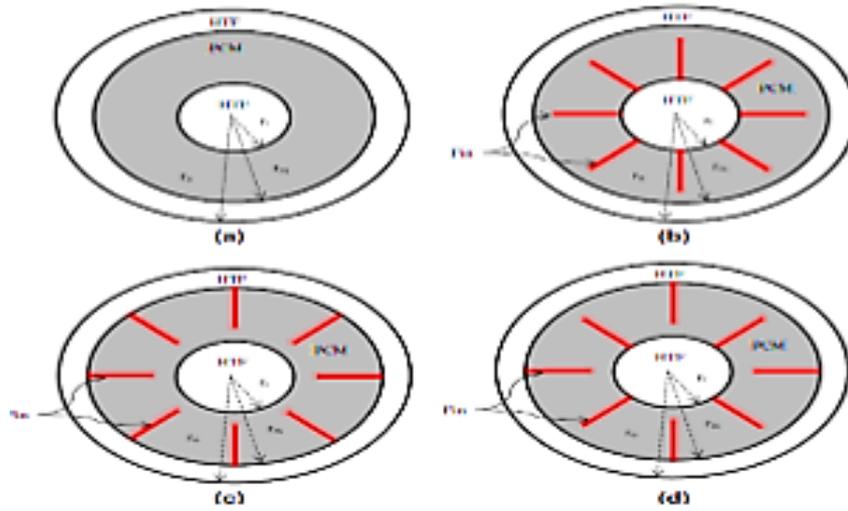


Figure II.3 :Différentes géométries étudiées.

Kamkari et al [29] réalisé une étude expérimentale sur la fusion des matériaux à changement de phase dans une cavité rectangulaire avec et sans ailettes horizontales.

Ils sont déduits que l'augmentation du nombre d'ailettes tendre à diminuer le temps de fusion (voir la figure II.4).

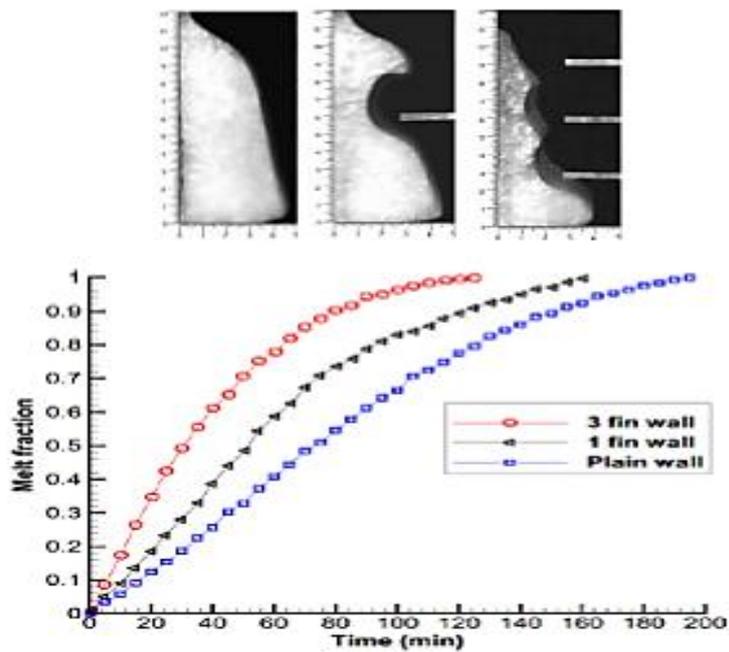


Figure II.4 :Variation de la fraction liquide au cours de la fusion.

B. Kamkari et al[30] ont fait une étude numérique de la fusion du matériau à changement de phase (MCP) dans des enceintes rectangulaires verticales et inclinée.

La comparaison des résultats numériques et expérimentaux révèle que les simulations numériques de la fusion du MCP dans des enceintes verticales peuvent prédire avec précision l'évolution temporelle de l'interface solide-liquide. Quel que soit le Nombre de Stephan, le temps de fusion complet dans les enceintes inclinées à 0° et 45° est respectivement d'environ 52% et 37% plus court par rapport à l'enceinte verticale. Dans les enceintes inclinées ($\theta=45^\circ$ et 0°), les simulations numériques bidimensionnelles prévoient moyennement les fractions liquides avec un écart maximum inférieur à 6,5 % par rapport aux expériences. Toutefois, les formes des interfaces capturées montrent quelques divergences avec les observations expérimentales en raison de la formation de structures d'écoulement tridimensionnelles dans le MCP liquide.

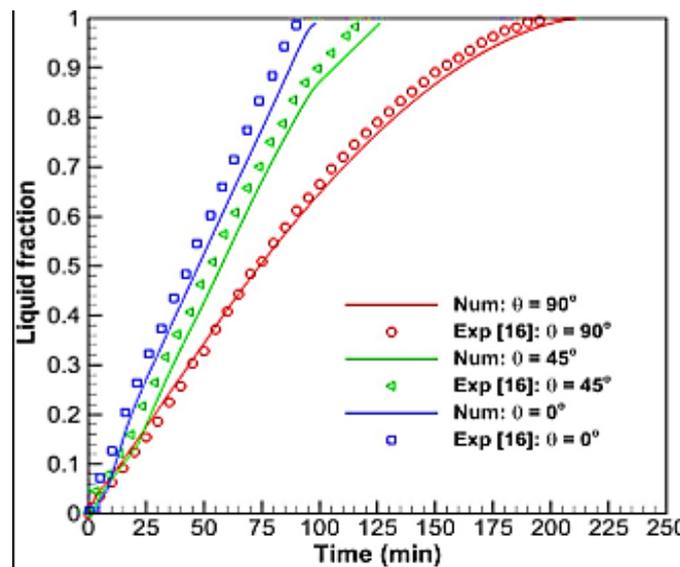


Figure II.5 : Comparaison de l'évolution de fraction liquide numérique.

Ji et al.[31] proposent d'ajouter des ailettes parallèles à angles inclinés afin d'améliorer le temps de fusion dans un élément de stockage. Après plusieurs tests numériques

Ils ont constaté que les ailettes disposées parallèlement d'un angle d'inclinaison -15° accélèrent le processus de la fusion comme le montre la figure (II.6)

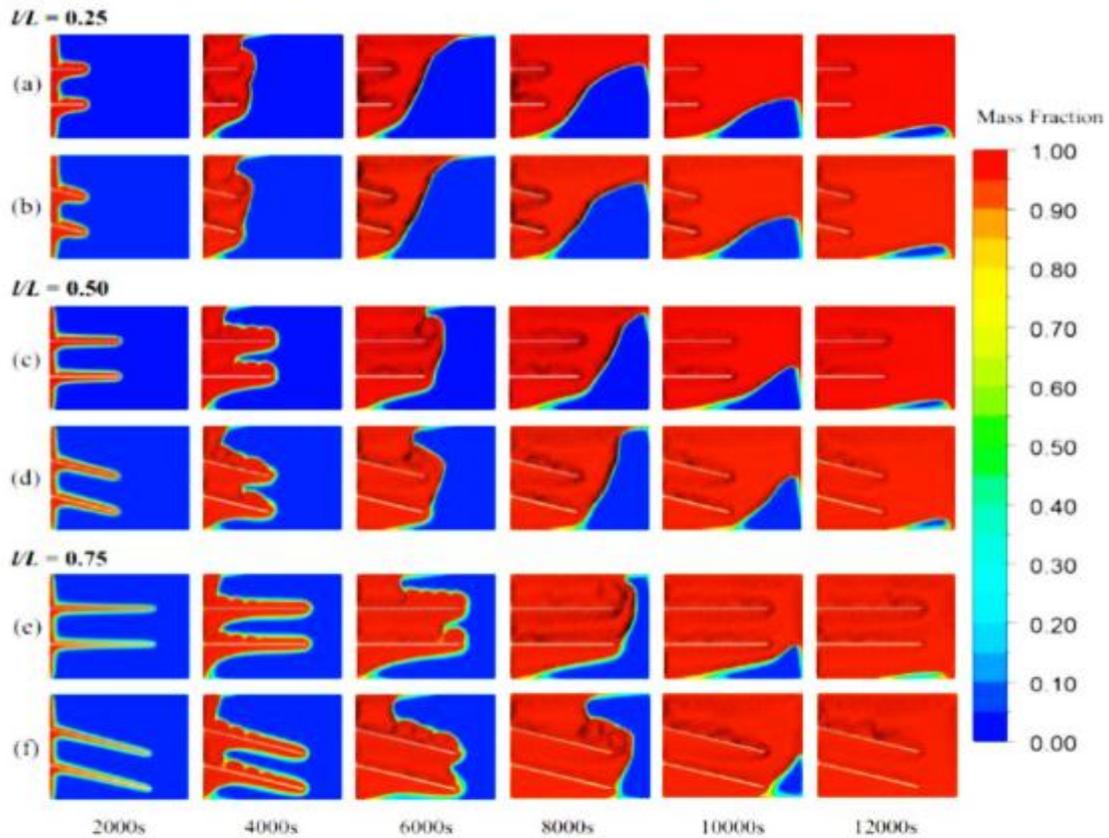


Figure II.6 :Contours de la fraction liquide au cours de la fusion.

(a) $l/L=0.25, \theta = 0^\circ$, (b) $l/L=0.25, \theta=-15^\circ$, (c) $l/L=0.5, \theta = 0^\circ$, (d) $l/L=0.5, \theta=-15^\circ$ (e) $l/L=0.75, \theta = 0^\circ$, (f) $l/L=0.75, \theta=-15^\circ$

Kamkari et al.[32] ont entrepris une étude expérimentale dans le but d'améliorer la vitesse de fusion du PCM l'acide laurique par l'ajout des ailettes dans des cavités rectangulaires et ceci sous différents angles d'inclinaison. Ils ont observé (figure II.7) que l'angle d'inclinaison améliore considérablement la vitesse de fusion pour les trois cavités étudiées (sans ou avec ailettes). L'augmentation de nombre des ailettes dans la cavité accélère aussi la fusion en réduisant l'angle d'inclinaison. Les améliorations de transfert de chaleur obtenues par la cavité horizontale (0°) à zéro ailette et verticales (90°) à trois ailettes par rapport à l'enceinte verticale à 0 ailettes étaient de 115% et 56%, respectivement.

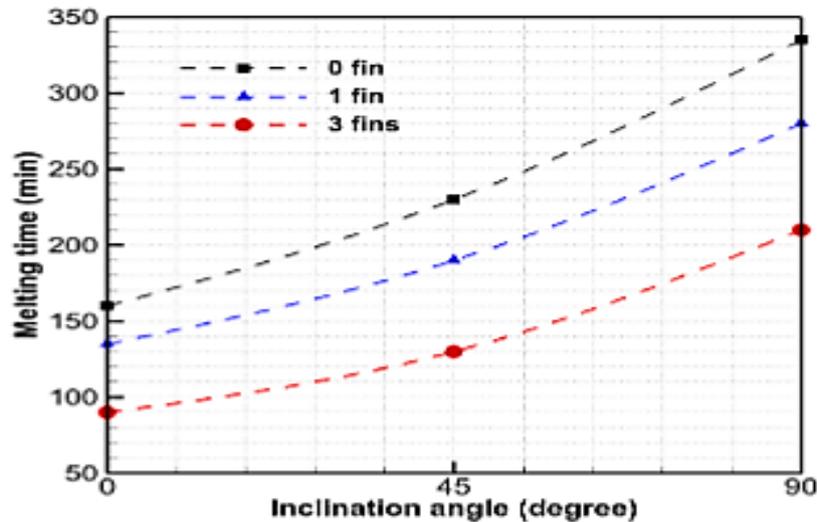


Figure II.7 : Variation du temps de fusion du PCM dans les cavités sans et avec ailettes en fonction d'angle de l'inclinaison.

A partir de ces résultats, ils ont conclu que l'inclinaison simple de l'enceinte peut être plus efficace pour améliorer la vitesse de fusion que l'ajout des ailettes à la cavité verticale.

Y. Wang et al.[33] ont étudié le processus de fusion d'un matériau à changement de phase dans une cavité rectangulaire à différents angles d'inclinaison. La paraffine est utilisée comme matériau à changement de phase dans cette étude. Un côté de la cavité est chauffé tandis que les autres côtés sont considérés comme adiabatiques. Les angles d'inclinaison étudiés comprennent 0° (chauffage horizontal inférieur), 30° , 60° , 90° (chauffage vertical), 120° , 150° et 180° (chauffage horizontal supérieur). Les résultats révèlent que les angles d'inclinaison ont un impact significatif sur le comportement de fusion de la paraffine. Lorsque l'angle augmente de 0° à 180° le temps de fusion complète augmente de manière non linéaire.

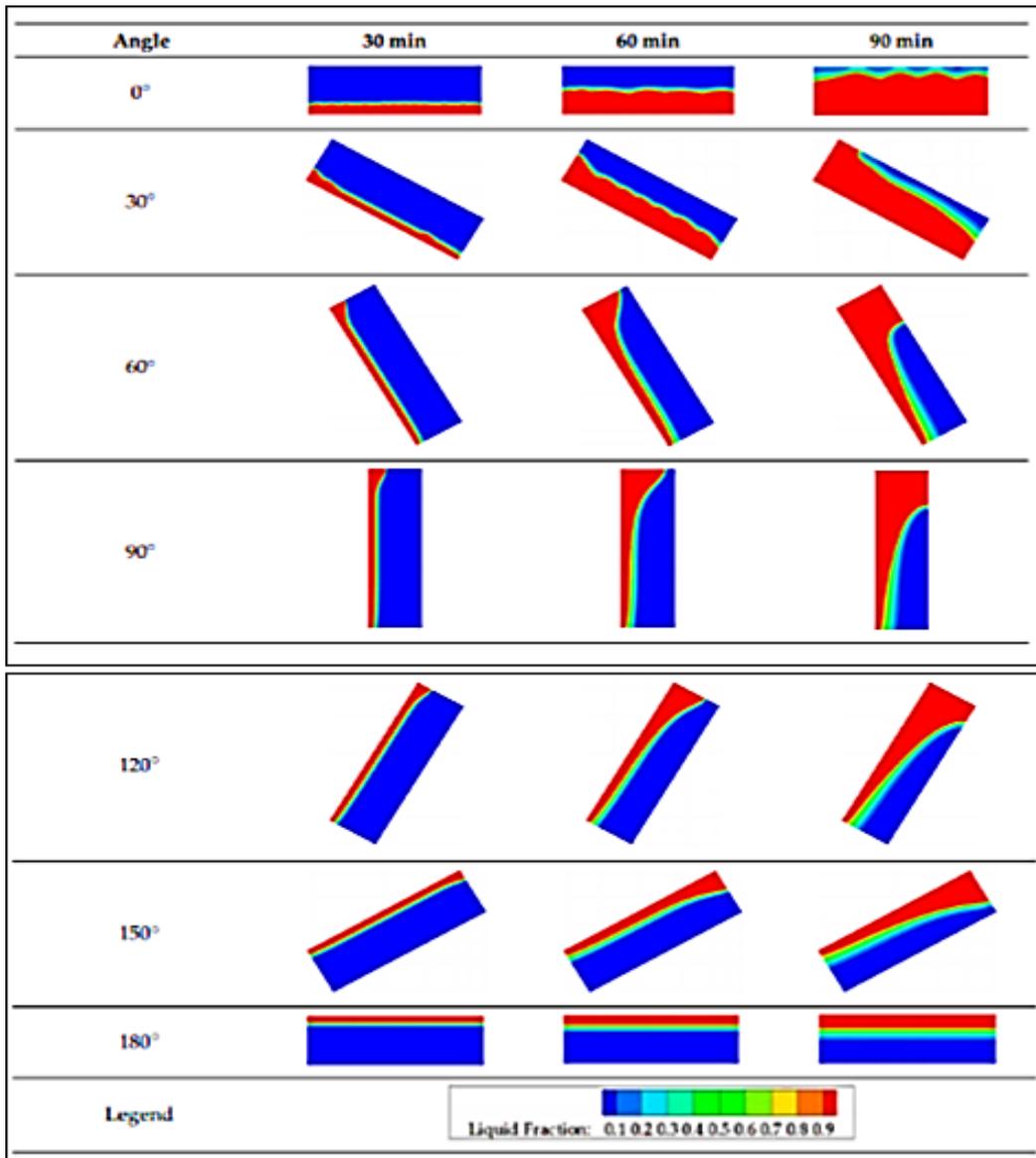


Figure II.8 : Comparaison des résultats numériques d'interfaces solide-liquide avec différents angles d'inclinaison à trois moments choisis

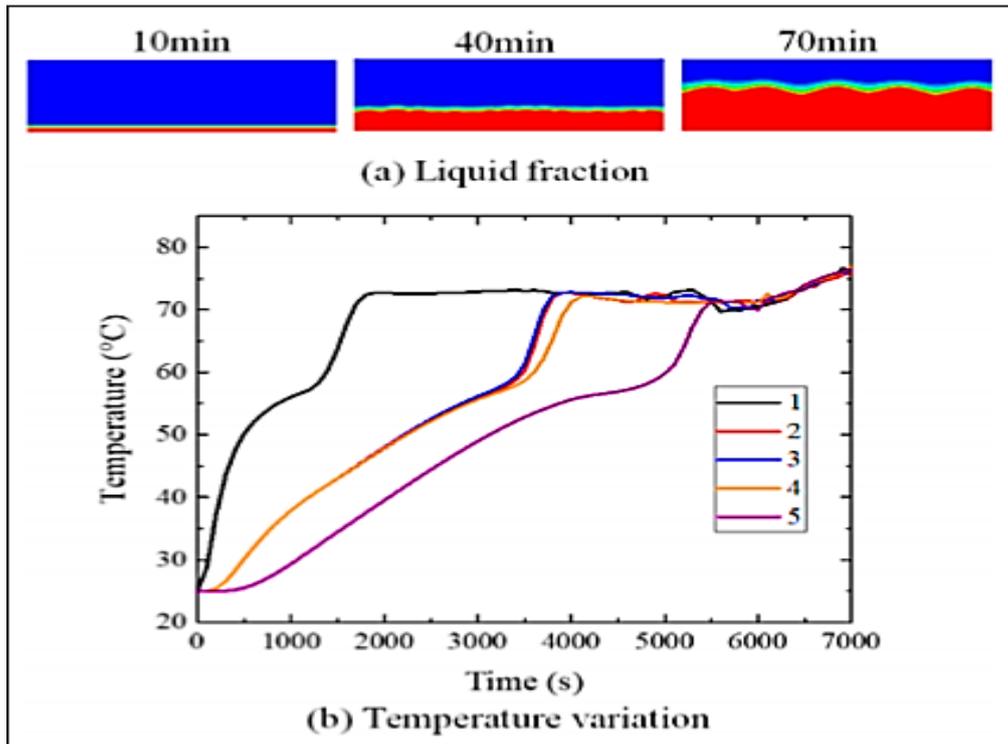


Figure II.9 :Le processus de fusion de la paraffine à 0°. (a) Fraction liquide ; (b) variation de température.

Ils ont observé que l'interface solide-liquide est presque plate pendant la phase initiale de la fusion car le mode dominant de transfert de chaleur est la conduction thermique. Au fur et à mesure que le temps passe, la forme de l'interface solide liquide devient ondulée à cause du phénomène de convection. Grâce à l'effet des cellules de convection, la température de chaque point de contrôle est presque la même après la fusion complète de la paraffine.

Madruga et al.[34] ont effectué une analyse comparative des résultats expérimentaux et des simulations numériques de fusion du matériau à changement de phase tétracosane contenu dans un cube et chauffé par le bas, tandis que tous les autres côtés sont supposés adiabatiques. Les simulations montrent des régimes distincts du processus de fusion: (i) régime conducteur, (ii) régime linéaire, (iii) régime grossier (transitoire), (iv) régime turbulent.



Figure II.10 : Evolution temporelle de la fusion du Tétracosane en maintenant la paroi inférieure à une température constante de $T_w = 80 \text{ }^\circ\text{C}$.

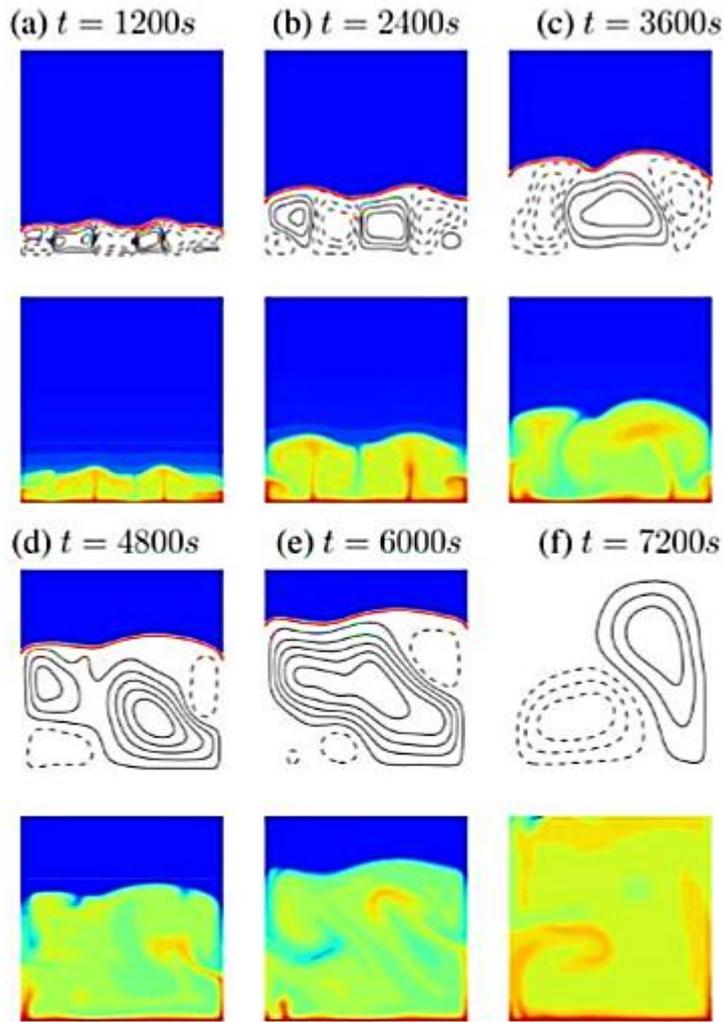


Figure II.11 : Evolution des lignes de courant durant la fusion du Tétracosane en maintenant la paroi inférieure est maintenue à une température constante de $T_w = 80^\circ\text{C}$ Ils ont observé le comportement de l'interface solide/liquide durant toute l'expérience et qui est caractérisée par une forme irrégulière. Ils ont visualisé le comportement des isothermes, ainsi que le champ de vitesses correspondant au régime turbulent. Ainsi l'observation de l'interface solide/liquide est une mesure utile pour identifier l'état global de la fusion en terme thermique (panaches) et en termes de vitesses (cellules convectives).

R. Karami et B. Kamkari [35] ont présenté le comportement thermique du MCP dans des unités de stockage thermique rectangulaires chauffées d'un côté à différents angles d'inclinaison. Des simulations numériques transitoires ont été réalisées afin d'explorer le champ d'écoulement, la distribution de température et le

stockage de l'énergie thermique pendant fusion du MCP dans les enceintes à 1 et 3 ailettes sous des angles d'inclinaison variant de 0° à 180°.

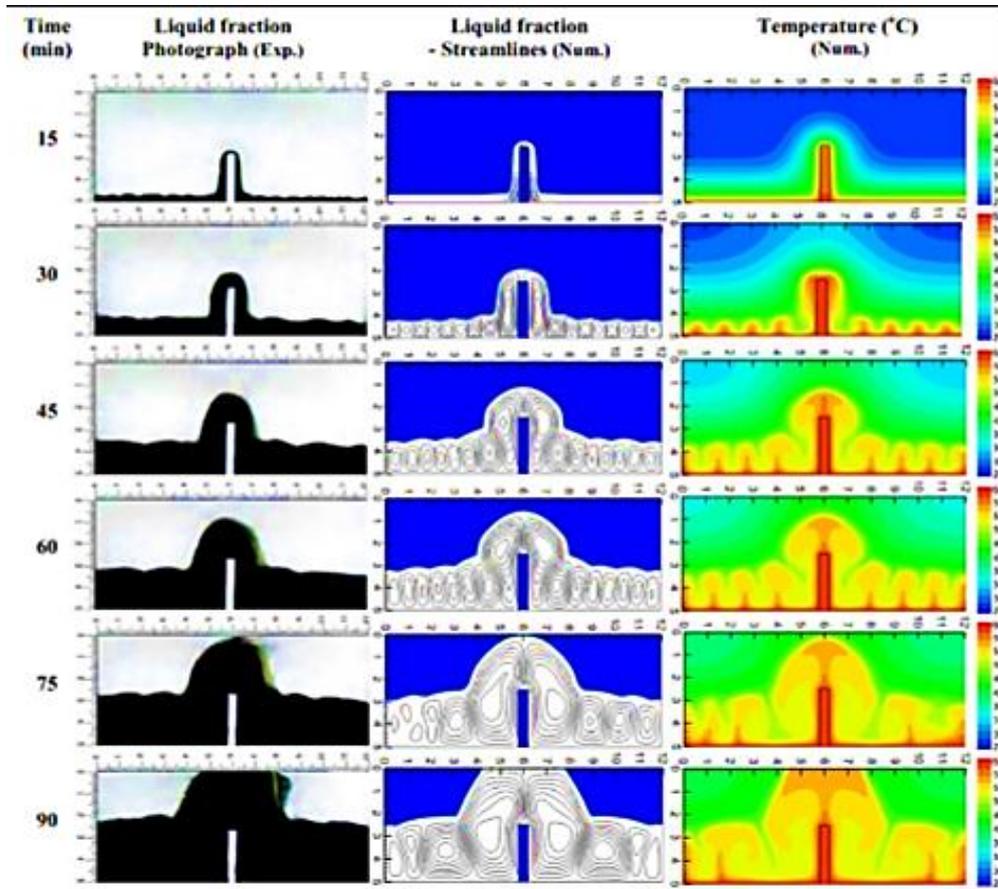


Figure II.12 : Photographies de fusion, lignes de courant et distributions de température dans l'enceinte 0°-1-fin à différents moments

De multiples paires de tourbillons contrarotatifs se développent dans le MCP liquide sur la paroi chauffée de l'enceinte. Les contours de température montrent que les cellules rotatives du MCP liquide chaud près de la surface inférieure se déplacent vers le haut entre chaque paire de tourbillons et frappent l'interface solide-liquide. De même, les flux de liquide chaud sur les deux côtés verticaux de l'ailette s'élèvent et forment deux grands tourbillons formant un panache thermique au-dessus de l'extrémité de l'ailette. L'ondulation de l'interface est due aux panaches thermiques sur l'interface.

R. Karami, et B. Kamkari,[36] ont étudié l'effet des ailettes perforées sur l'amélioration des performances thermique des systèmes de stockage de l'énergie

calorifuge latente dans les tubes et les coques verticales ont été étudié expérimentalement.

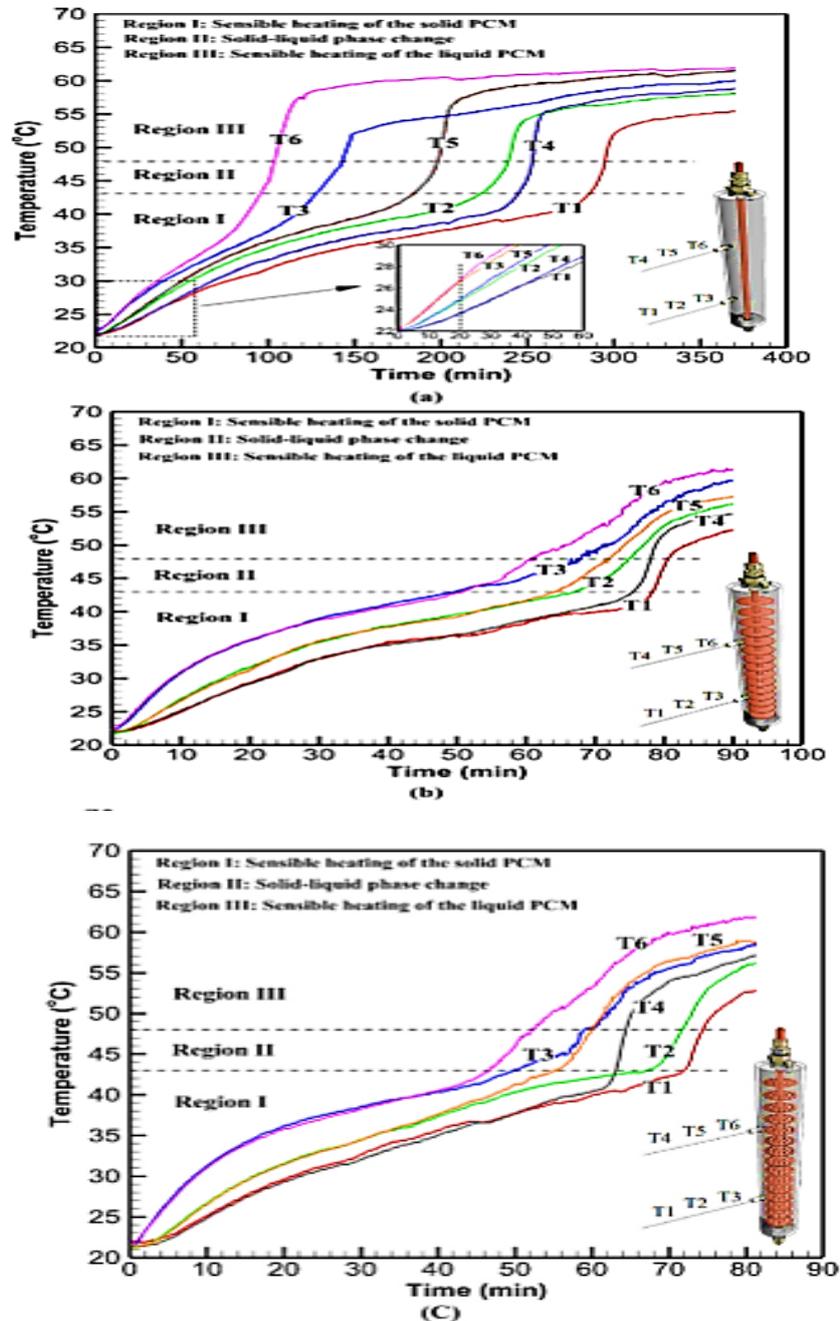


Figure II.13 : Historique des températures des couples au cours de la fusion de MCP en HXs avec une température de sortie 65 C (a) HX sans ailettes (b) HX à ailettes solides et (c) HX à ailettes perforées

Les résultats expérimentaux ont montré que le nombre de Nusselt moyen dans le temps de l'échangeur de chaleur à ailettes perforées est supérieur d'environ 30 % à

celui de l'échangeur de chaleur à ailettes solide en raison de l'effet gênant mineur des ailettes perforées sur le développement des flux de convection. De plus, le temps de fusion total de l'échangeur de chaleur à ailettes perforées est d'environ 7 % inférieur à celui de l'échangeur de chaleur à ailettes solides. L'efficacité fine classique du tube à ailettes perforées est jusqu'à 13% supérieure à celle du HX à ailettes solides, ce qui indique que les ailettes perforées sont plus efficaces pour améliorer le taux de transfert de chaleur de fusion par rapport aux ailettes solides.

B.Kamkari et al [37] ont étudié expérimentalement et numériquement l'amélioration des performances thermiques dans un échangeur de chaleur à stockage de chaleur latente utilisant des ailettes bifurquées et droites



Figure II.14 :(a) ailette droit,(b) ailette bifurquée

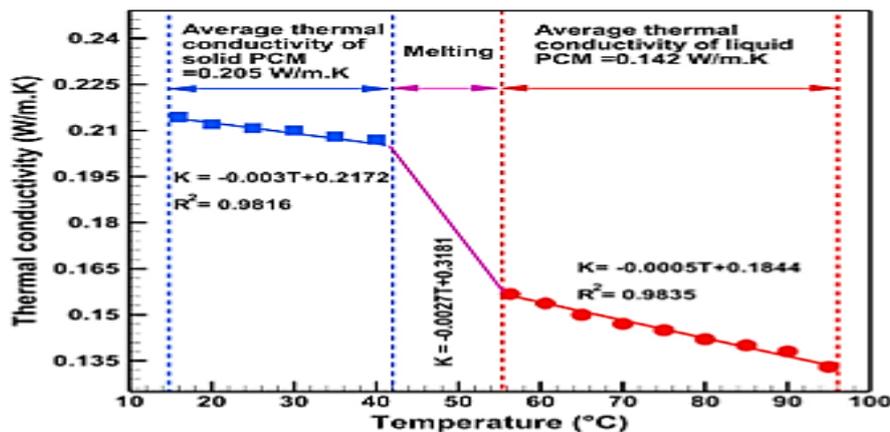


Figure II.15 : variation de la température en fonction de la conductivité thermique

La configuration à ailettes bifurquées a donné de meilleurs résultats que la configuration à ailettes droites. En outre, il a été conclu qu'il existe un compromis

entre l'augmentation de l'arc de transfert de chaleur et la diminution du nombre de Nusselt, dans la nageoire bifurquée, ce dernier dépassant le premier.

M.KHerrafi,M.KHelladi [38] ont fait une simulation numérique et validation de la fusion de la paraffine dans une cavité chauffée par le bas.

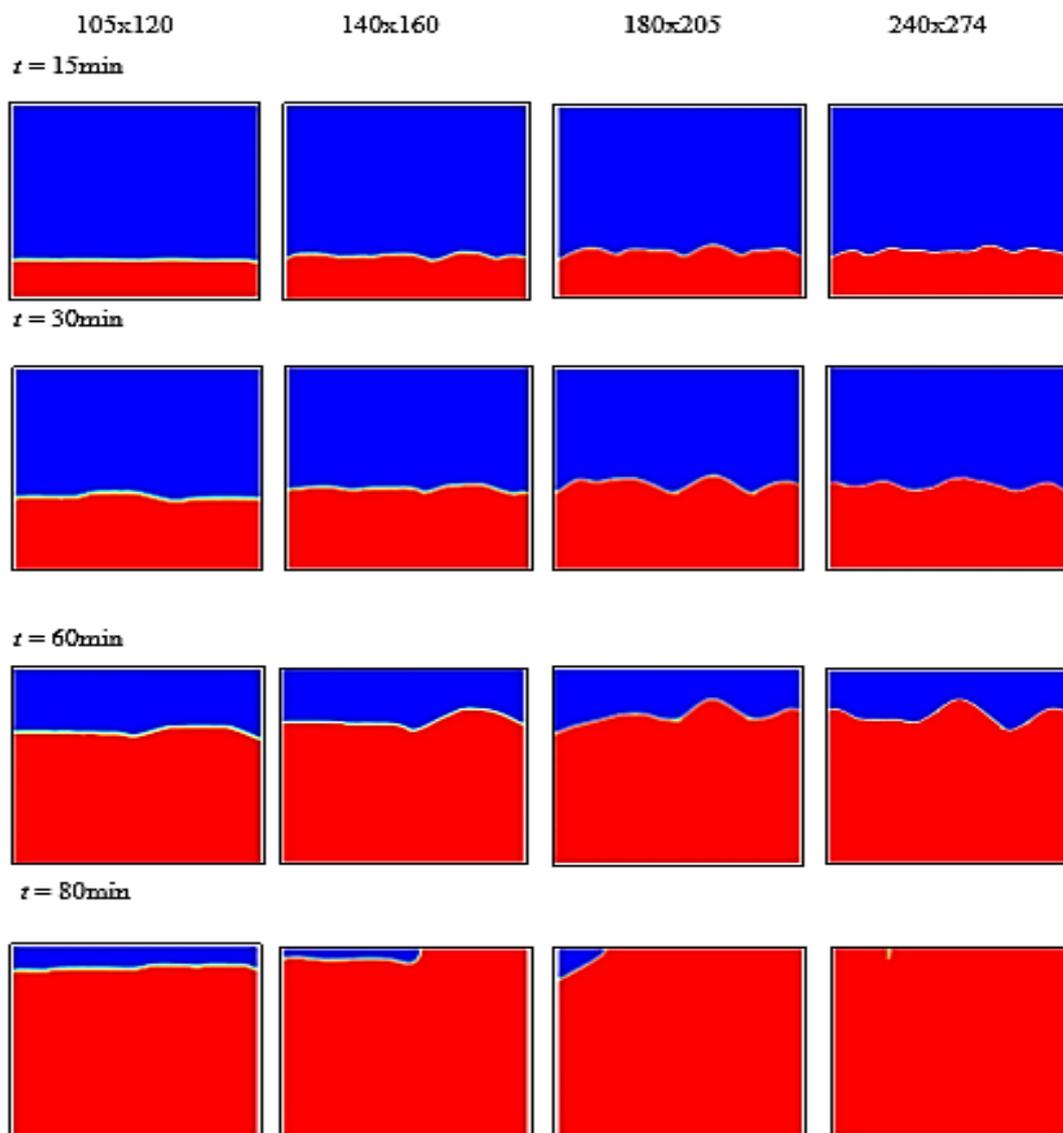


Figure II.16 :Contours des fractions liquides en fonction du temps pour des différents maillages.

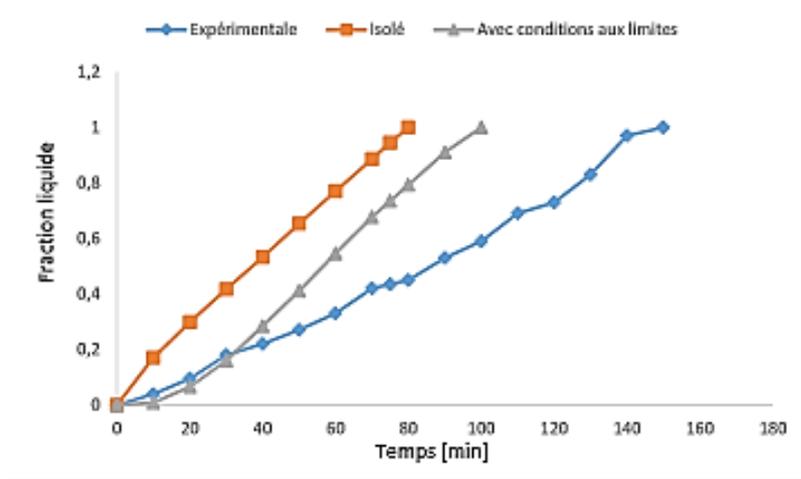


Figure II.17 : Evolution de la fraction liquide dans les trois cas expérimental, isolation et pertes thermiques

- un maillage raffiné nous permet de mieux capter les ondulations du front de fusion et donc la formation des cellules.
- La fusion de la paraffine par le bas est dominée par la convection naturelle de Rayleigh-Bénard. C'est le phénomène qui rend la simulation numérique de ce travail un véritable défi.

Dawei Sun et all [39] ont fait une étude numérique et expérimentale du retrait de solidification.

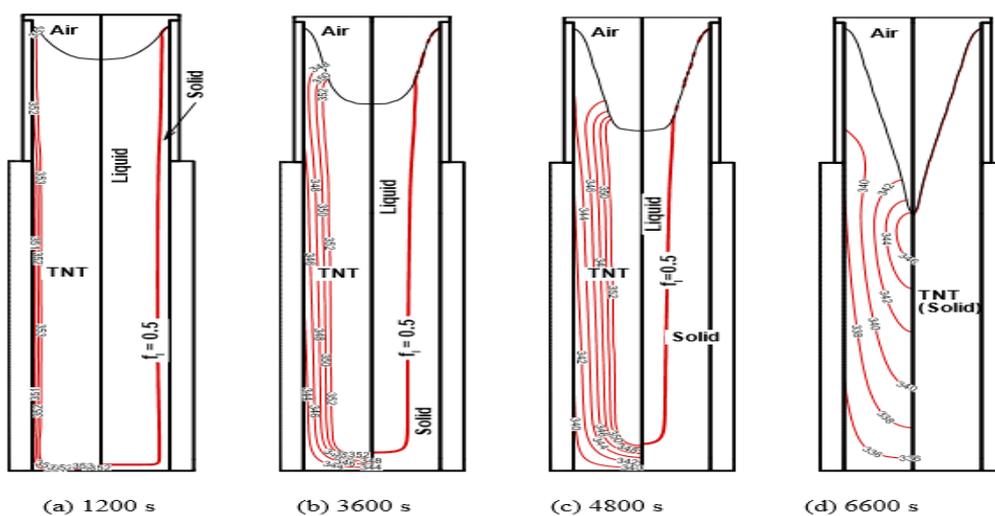


Figure II.18 : Distribution transitoire de la température, front solide, et changements de forme de retrait pendant le cours de la solidification TNT

(a) 1200s ; (b) 3600s (c) 4800s (d) 6600art. Le panneau de gauche de chaque figure montre les contours de la température, tandis que la ligne $f_i=0.5$ dans le panneau de droite indique l'emplacement du front plein.

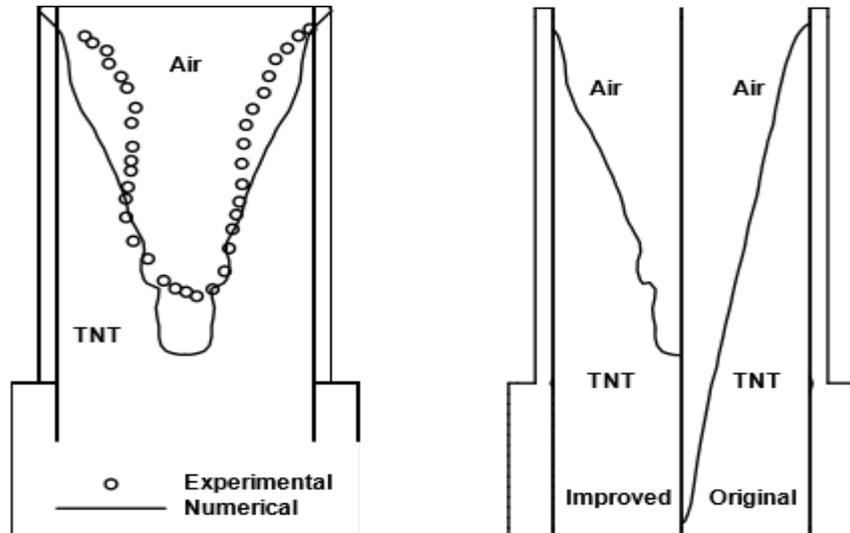


Figure II.19 : Comparaison des formes de retrait prévues en utilisant les procédures de refroidissement originales.

- les résultats de simulation de la forme de retrait et des profils de température lors de la coulée d'un matériau énergétique dans un cylindre se comparent également de manière satisfaisante avec les mesures expérimentales.
- Ils ont constaté que les conditions de refroidissement appliquées sont cruciales pour contrôler le retrait de la solidification
- Une procédure de refroidissement améliorée est suggérée sur la base de l'analyse des conditions de coulée existantes.

DiwakarJanghel, ShyamprasadKaragadde, et Sandip K.[40] ont fait une analyse de la performance thermique d'un système de stockage thermique à base de matériau à changement de phase à l'aide d'un modèle numérique généralisé avec dilatation et retrait volumétriques

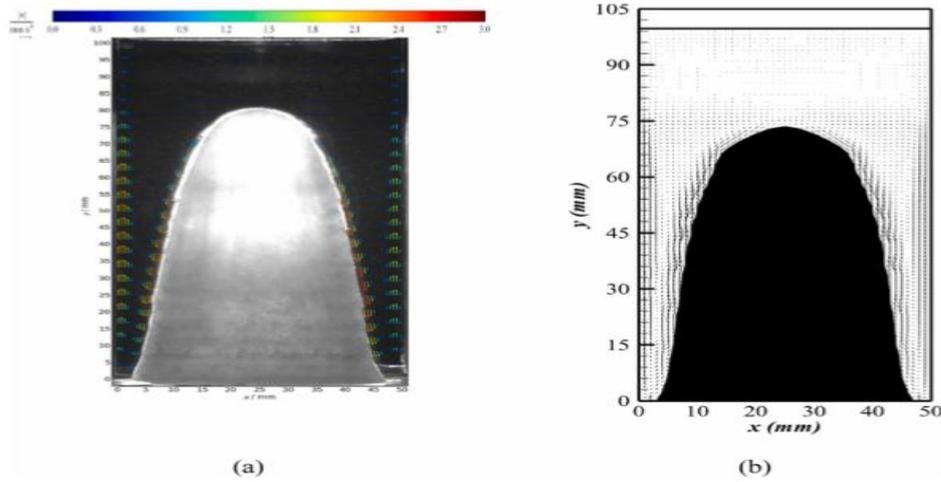


Figure II.20 : Comparaison du procédé de fusion à partir de (a) l'étude expérimentale et (b) du présent rapport

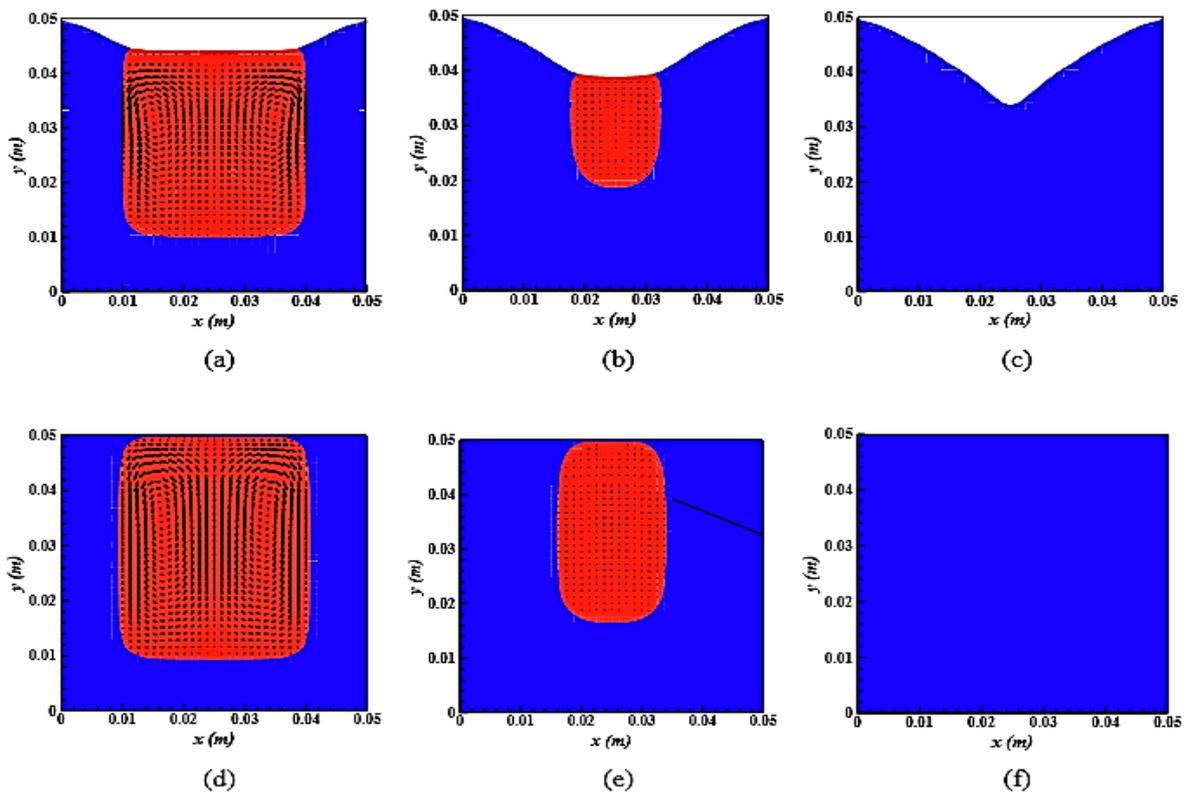


Figure II.21 : Evaluation de l'interface solide-liquide à (a) 500, (b) 1500 et (c) 2600 s pour la solidification avec retrait et (d) 500 (e) 1500 et (f) 2900 s pour la solidification sans retrait dans le cas de la paraffine. (La région bleue représente le solide et la région rouge le liquide)

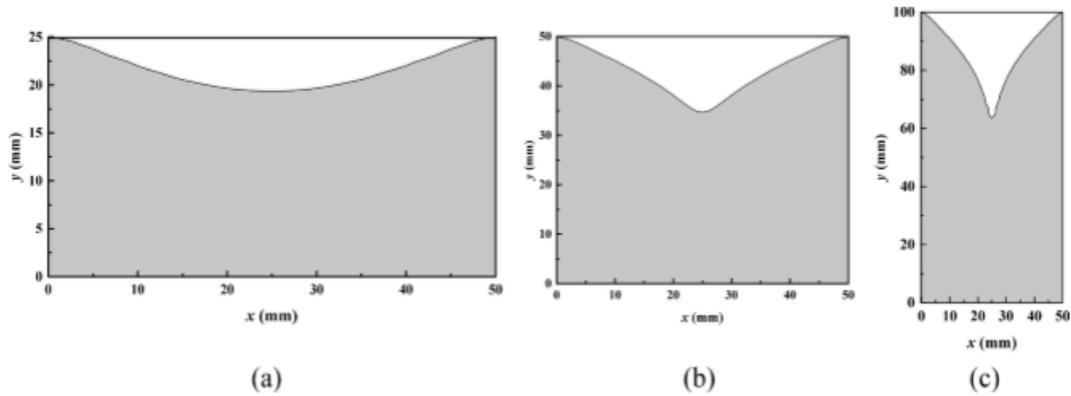


Figure II.22 : Variation de la forme de retrait avec les différents rapports d'aspect de (a) $AR = 0.5$, (b) $AR = 1$ (c) $AR = 2$ (la région grise est solide et la région blanche est vide).

Ils ont trouvé que les résultats numériques présentes sont en bonne concordance avec les valeurs expérimentales, la température de la paroi froide a un effet significatif sur le retrait du matériau de changement de phase

Julian Vogela et AndréThessa [41] ont présenté une validation d'un modèle numérique avec une expérience de référence pour la fusion régie par la convection naturelle dans le stockage thermique latent.

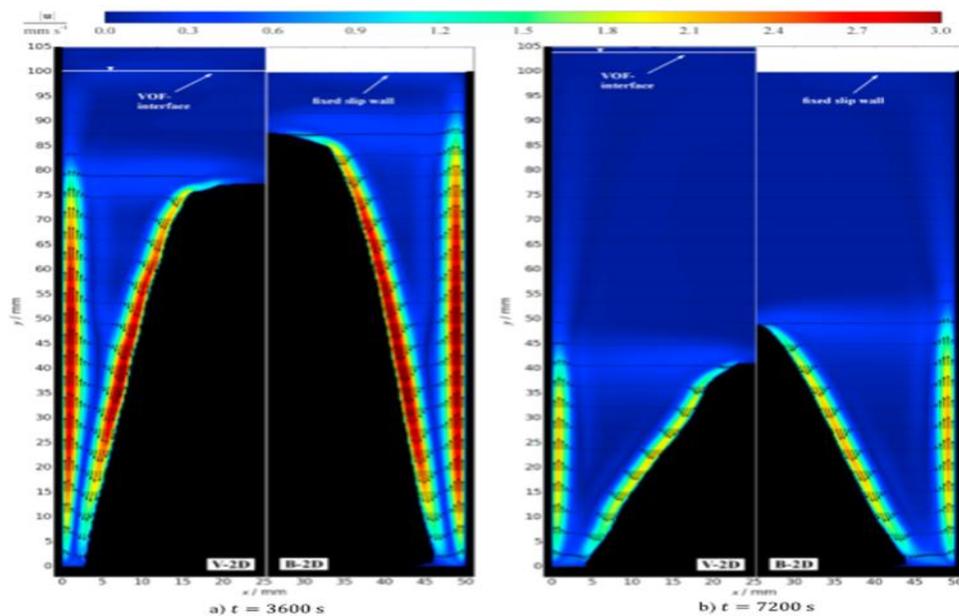


Figure II.23 : Comparaison 2D d'état de phase et de la vitesse pour le modèle Boussinesq 2D et pour le VOF modèle (V-2D).

Ils ont constaté que la différence entre le modèle détaillé et le modèle simplifié dans la prévision des grandeurs globales telles que la fraction liquide est inférieure à 4% alors que les vitesses diffèrent jusqu'à 20%. La simulation prédit la fraction de phase liquide et les températures avec des écarts inférieurs à 4%, mais surestime significativement les grandeurs de vitesse.

DebasreeGhosh et CnadanGuha [42] ont fait une étude numérique et expérimentale sur la fusion de la paraffine dans une cavité sphérique.

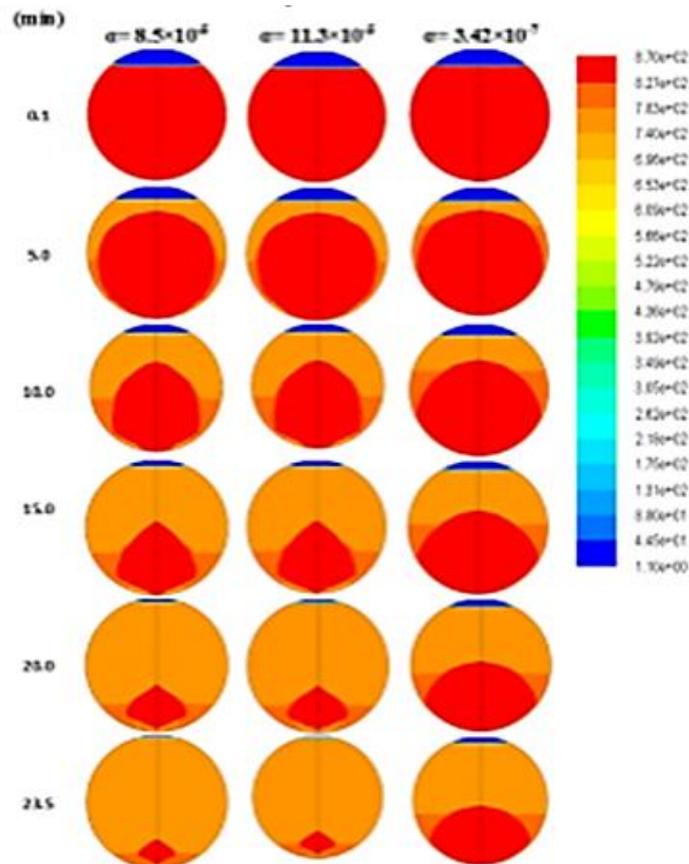


Figure II.24 : Contours de densité dans les cavités avec diffusivité thermique différente pour $st=0.18$

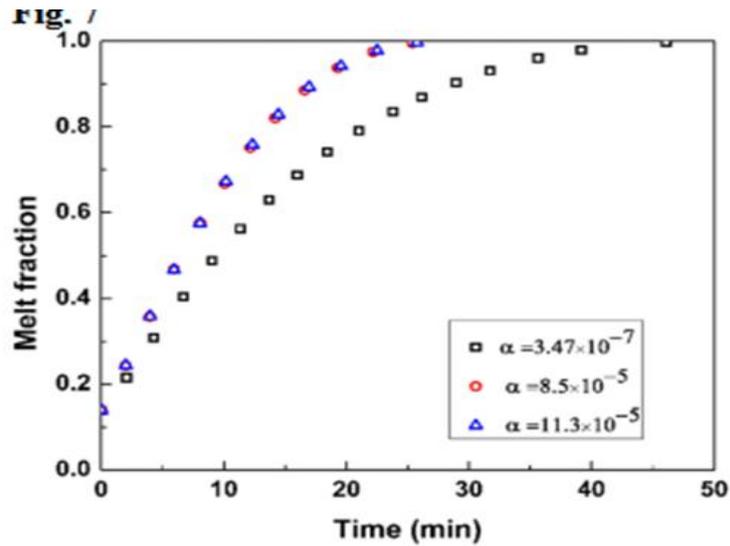


Figure II.25 :Fraction liquide (air liquide MCP) dans la cavité avec $st=0.18$

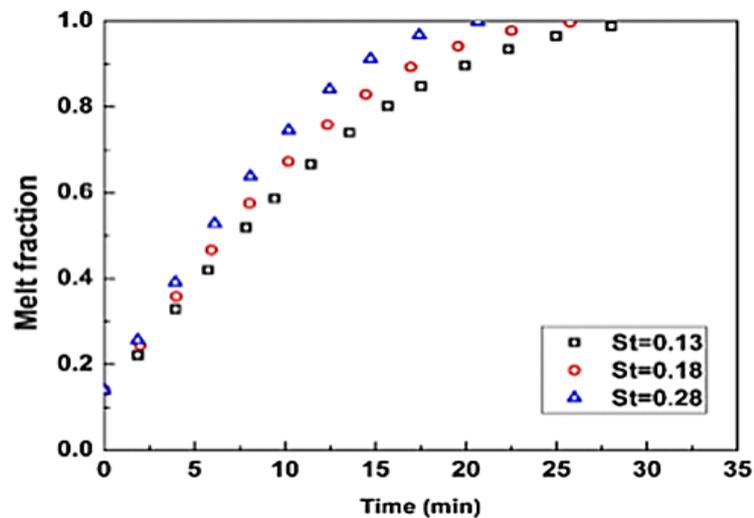


Figure II.26 : Fraction liquide pour différent nombre de Stefan dans la cavité de cuivre

- Les résultats ont montré que les matériaux ayant une diffusivité thermique plus élevée ont augmenté le taux de fusion en raison de l'effet gonflable accru et de la convection.
- Le nombre de Stefan plus élevé montre l'effet d'une convection naturelle plus élevée et d'un profil de vitesse maximale, ce qui entraîne une amélioration du processus tels que le stockage d'énergie, la fusion et la solidification du métal dans la coulée et autre.

- dans le cas d'un changement de phase de matériaux de stockage d'énergie, un chauffage ou un refroidissement très rapide peut entraîner une répartition inégale des contraintes, mais l'efficacité du stockage d'énergie augmentera. d'autre part, lors de la fusion du métal, une grande quantité de chaleur est nécessaire et le matériau de la cavité doit être choisi de telle sorte que la diffusivité du matériau du métal PCM soit inférieure à celle du matériau de la cavité.
- La sélection du matériau de la cavité est très importante lorsque la chaleur est fournie au PCM par conduction.

DebasreeGhoshChandanGuha et **JoyjeetGhose** [43] ont fait une étude numérique sur la solidification de la cire de paraffine dans la cavité sphérique et rectangulaire

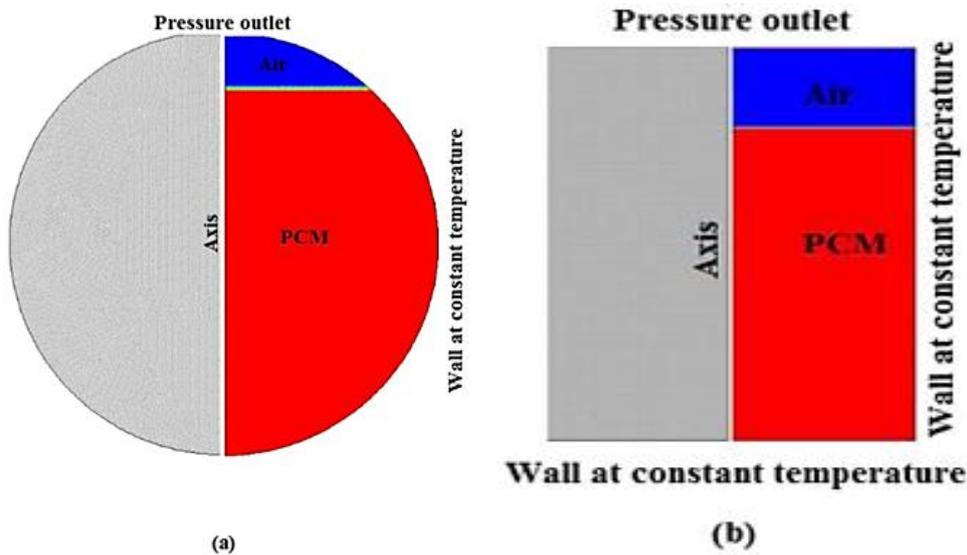


Figure II.27: Domaine informatique des cavités

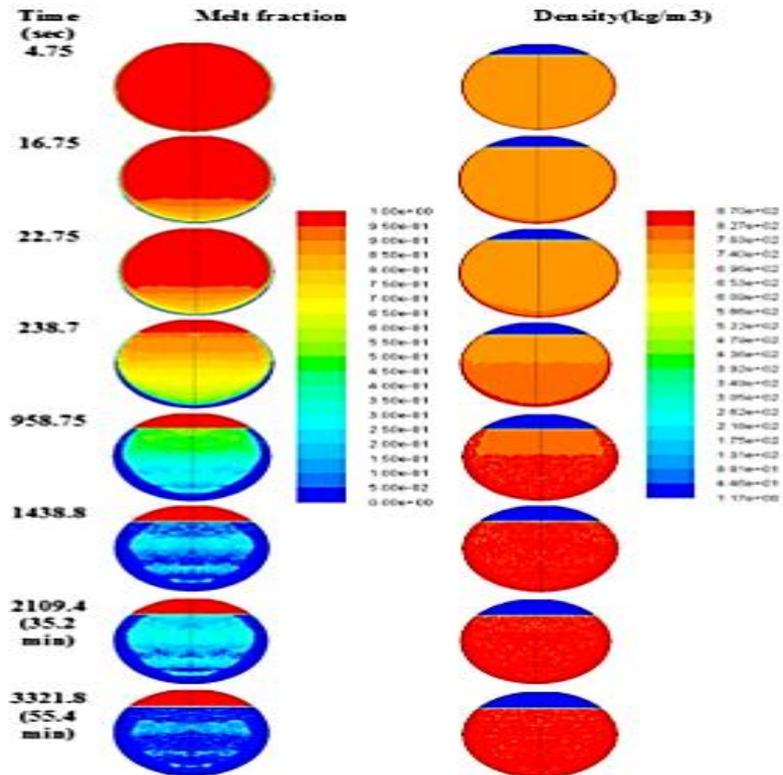


Figure II.28: Contours de la fraction liquide et la densité de la solidification dans la cavité sphérique

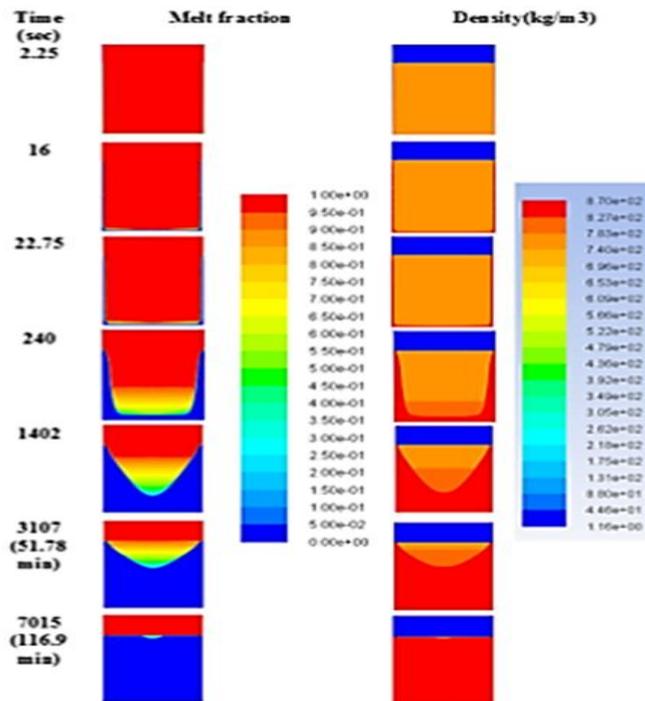


Figure II.29 :Contours de la fraction liquide et la densité de la solidification dans la cavité rectangulaire

- L'étude conclut que Le processus de solidification est plus rapide dans la cavité sphérique que dans la cavité rectangulaire .C'est parce que le flux de chaleur est plus faible dans la cavité rectangulaire.
- La faible conductivité thermique de la phase solide et l'effet de rebond inferieur rendent le processus de solidification plus lent que la fusion .

Nikhil Katiyaret Sandip K. Saha[44] ont étudié l'effet de retrait des alliages binaires à base d'aluminium en tant que matériaux à changement de phase pour les applications de stockage d'énergie thermique latente.

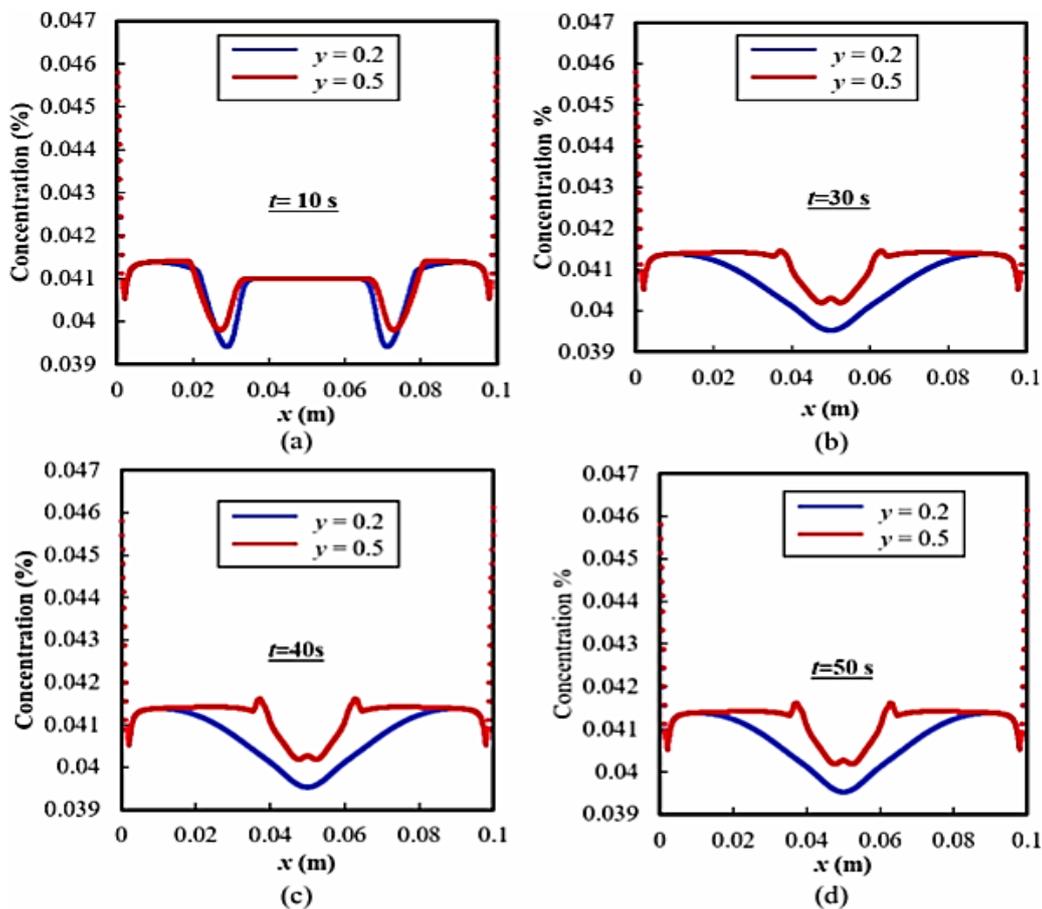


Figure II.30: variation de concentration le long de la direction X de Al-Cu4.1% en poids au plan y-0.2m et y -0.5m à (a) 10s, (b) 30s, (c) 40s et (d) 50 s

- Ils ont conclu que la formation de vides de retrait résultant de la différence de densité est importante pour concevoir le stockage d'énergie thermique à battement latent.
- Le rapport de densité s'avère affecter le processus de transfert de chaleur de manière significative. Avec l'augmentation du rapport de densité solide sur liquide, une vitesse de solidification plus rapide est observée avec un transfert de chaleur plus élevé et une région pâteuse plus épaisse.

Hasibuzzaman Mahmud et Dewan Hasan Ahmed [45] ont fait des recherches numériques sur la fusion d'un matériau à changement de phase (MCP) avec différents agencement de paires source de chaleur-puits sous microgravité.

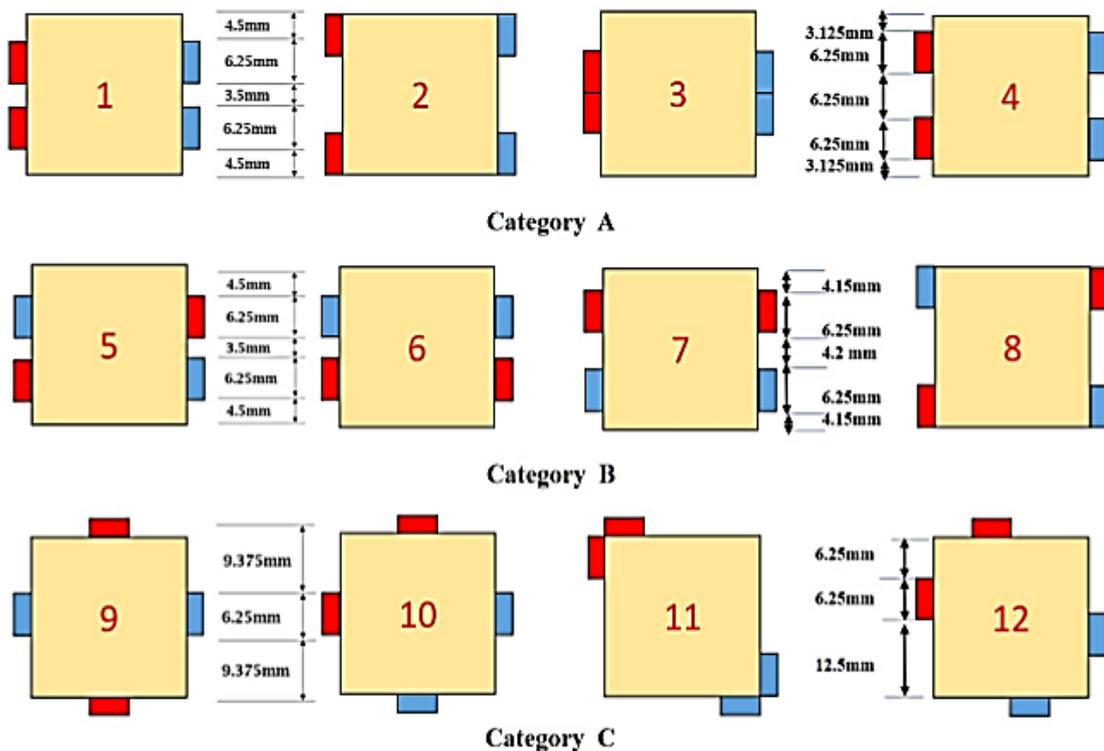


Figure II.31 : Etude avec différents agencements de paires sources de chaleur-dissipateur pour tous les cas.

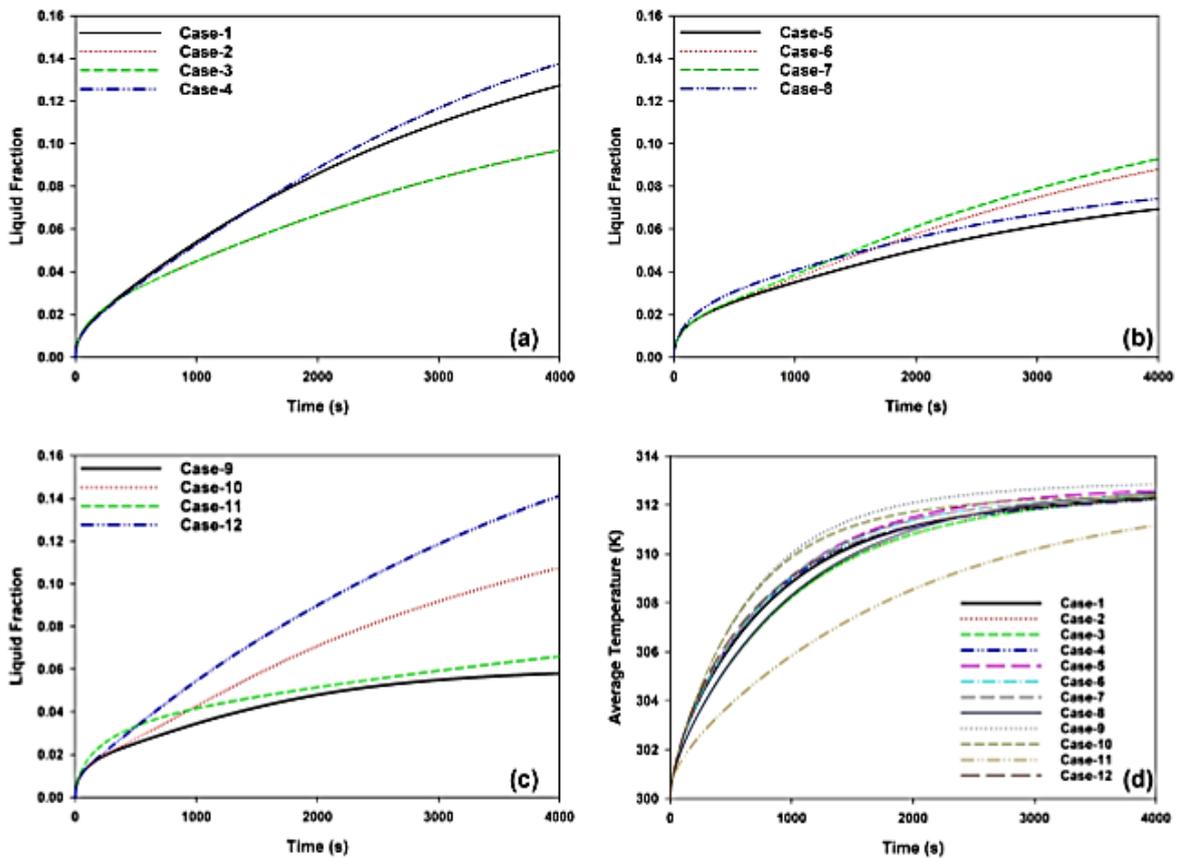


Figure II.32: liquide fraction en fonction de temps pour la catégorie (a) Catégorie A, (b) Catégorie B cases, (c) Catégorie C cases and, (d) température moyenne pour tous les cas

- Ils ont conclu que les résultats de la simulation révèlent que l'espace entre les sources de chaleur joue un rôle majeur dans le processus de fusion et a un impact du stockage d'énergie de manière significative. En fait, dans les premiers stades de la de la fusion, avec la présence d'un gradient de température plus élevé, le transfert de chaleur est plus rapide..
- Lorsque le gradient de température diminue rapidement, la vitesse de fusion ralentit de manière significative à long terme.
- Le transfert de chaleur à long terme peut être déduit de l'étendue de la zone d'interface entre le MCP fondu et non fondu, et les dispositions doivent être réalisés en tenant compte de la durée du transfert de chaleur.

- En termes de fraction liquide et d'énergie calorifique stockée, pour les cycles de charge de courte durée, inférieurs à 6500 s, la disposition dans laquelle des sources de chaleur discrètes sont montées dans deux parois adjacentes avec un petit espace entre elles est la configuration la plus efficace.
- l'élévation de température, lorsque les deux sources de chaleur sont en contact l'une avec l'autre tout en étant montées séparément sur la paroi verticale et horizontales, l'augmentation de température est la plus faible l'augmentation de température la plus faible, même si l'effet des dissipateurs de chaleur est négligeable.

Solomon et al [46] ont aussi réalisé un travail concernant l'effet de l'air interne sur les performances du transfert de chaleur et sur le stockage d'énergie par changement de phase dans une capsule sphérique. Le cas d'un vide initial localisé au centre de la capsule a le plus haut taux de transfert de la chaleur et donc le plus court temps de fusion, une capsule avec un vide localisé au sommet a le plus long temps de fusion.

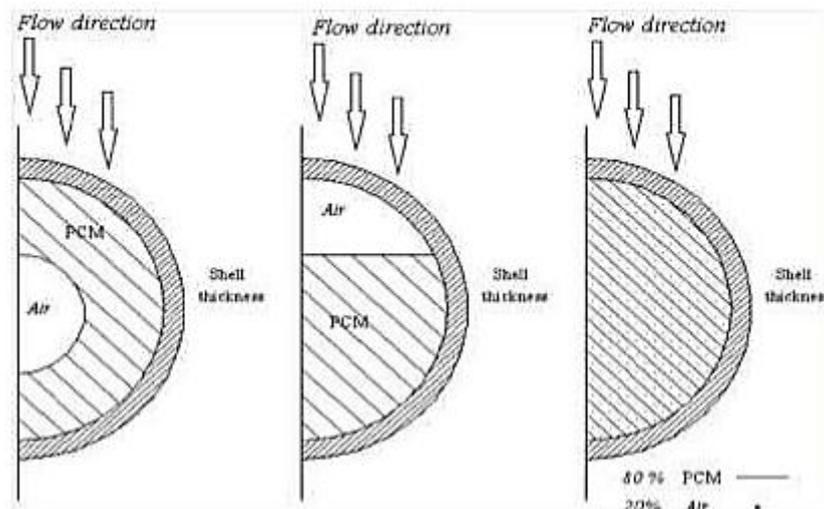


Figure II.33: Modèle de calcul de la capsule avec du vide

Chapitre III

Position du

problème

III.1 Introduction

Le présent chapitre porte sur une simulation numérique par le logiciel ANSYS Fluent 15.0 pour étudier le comportement dynamique et thermique lors de la fusion d'un matériau à changement de phase (paraffine) dans une cavité chauffée par le bas. Cette dernière contient 88% de paraffine solide et 12% air. Le modèle VOF est utilisé pour traiter l'écoulement diphasique air-paraffine dans la cavité. Ainsi on introduit la densité (masse volumétrique) de la paraffine variable en fonction de la température en utilisant un UDF (user defined function).



Figure III.1 :Cavité remplie de la paraffine solide en présence d'un espace d'air

III.2 Problème physique

Le domaine étudié est une cavité carré de 12 cm de large, 12cm de hauteur remplie d'un matériau à changement de phase (paraffine) et de l'air. La cavité est soumise à un flux thermique constant par le bas. Les autres côtés de la cavité sont isolés thermiquement figure (III.2).

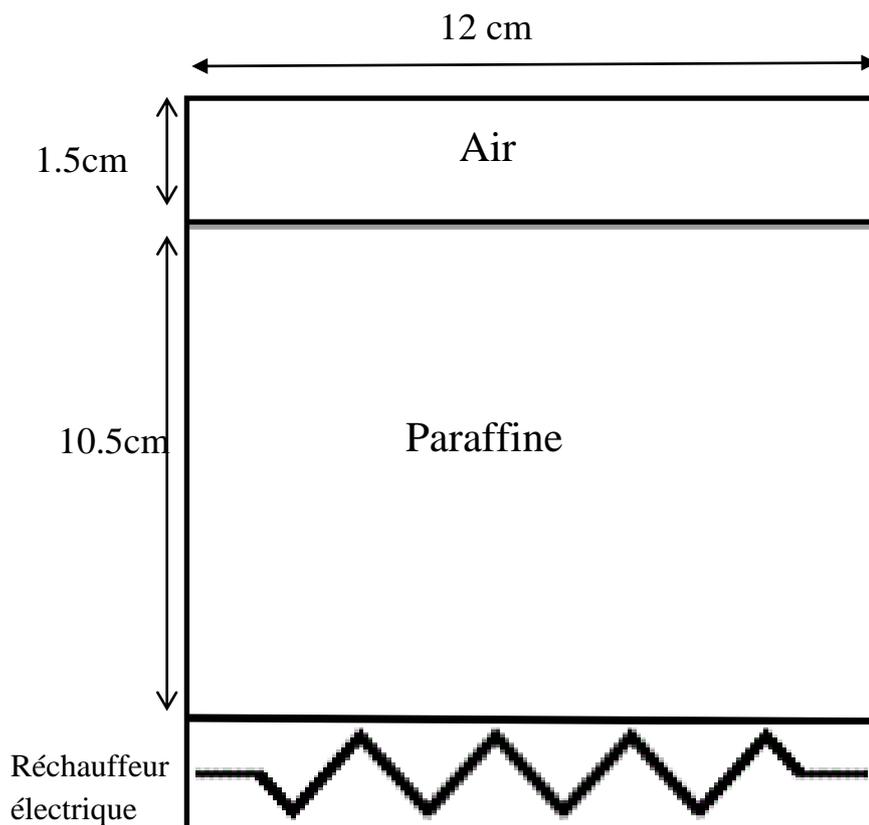


Figure III.2: Dimensions du modèle physique étudié

Tableau III. 1: Propriétés thermo-physiques de la paraffine utilisée [47]

Propriétés	Symboles	Valeur
température du début de la fusion [°C]	T_s	49
température de la fin de fusion [°C]	T_L	54
Chaleur latente de fusion [J/kg]	L_f	176000
Chaleur spécifique (solide) [J/kg.K]	C_p	2700
Conductivité thermique (solide) [W/m.K]	λ	0.21
Masse volumique (densité)[kg/m ³][41]	ρ	$1.2463 \times 10^{-4} T^2 - 0.80587 \times T + 1010.7$
Viscosité dynamique [kg/m.s]	μ	0.0036
Coefficient de dilatation thermique [K-1]	β	9.1×10^{-4}

Tableau III.2 : Propriétés thermo-physiques de l'air

Propriétés	Symboles	Valeur
Chaleur spécifique [J/kg.K]	C_p	1006.43
Conductivité thermique [W/m.K]	λ	0.0242
Masse volumique (densité) [kg/m ³]	ρ	1.225
Viscosité dynamique [kg/m.s]	μ	1.7894e-05

- Variation de la masse volumique de la paraffine en fonction de température

$$\rho = 1.2463 \times 10^{-4} T^2 - 0.80587 \times T + 1010.7 \quad [41]$$

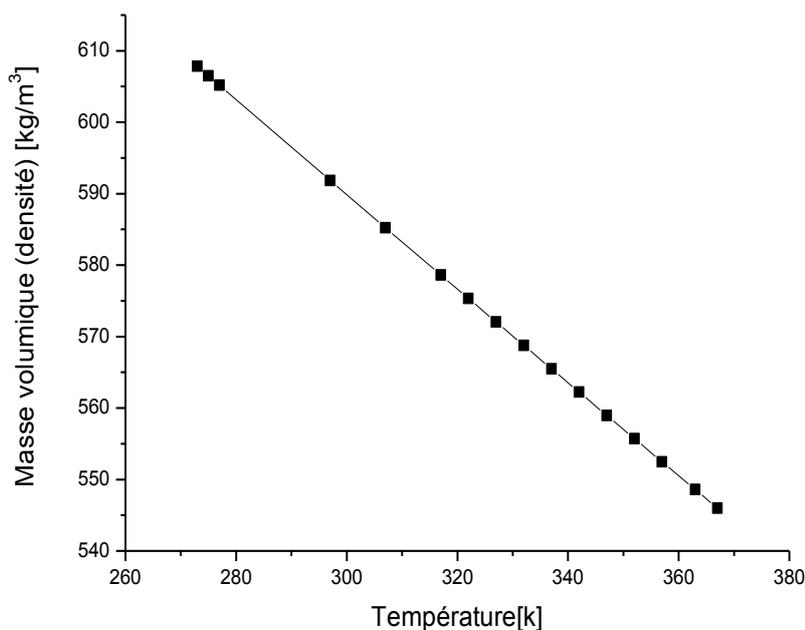


Figure III.3 : Variation de la masse volumique de la paraffine en fonction de température

III.3 Modèle Mathématique

Les équations qui définissent l'écoulement diphasique (paraffine-air) avec changement de phase (paraffine solide-liquide) traduisant les principes de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie s'expriment alors, comme suit [48,49]

- **Equation de continuité**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (\text{III.1})$$

Pour un fluide incompressible ρ est constante donc $(\partial \rho / \partial t = 0)$, donc l'Eq (III.1)

devient
$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (\text{III.1})$$

u et v sont les composante de la vitesse suivant les directions X et Y

- **Equation de conservation de la quantité de mouvement**

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + S_u \quad (\text{III.2})$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho g + S_v \quad (\text{III.3})$$

Le modèle de Darcy pour les milieux poreux est utilisé pour modifier les vitesses dans la région solide :

$$S_u = -A \frac{(1-ft)^2}{(ft^3+\varepsilon)} * u \quad (\text{III.4})$$

$$S_v = -A \frac{(1-ft)^2}{(ft^3+\varepsilon)} * v \quad (\text{III.5})$$

p : designe la pression.

$\rho g \beta$: désigne l'approximation Boussinesq.

β : est le coefficient de la dilatation thermique

- **Modèle VOF :**

L'évolution de la surface libre de La paraffine en contact avec l'air doit être déterminée à chaque instant en tant qu'un élément de la solution. Dans le présent travail, la méthode volume de fluide (VOF décrite dans la fin de chapitre) est utilisée pour capturer la surface libre. Son principe consiste à calculer l'écoulement des deux fluides (air et paraffine), en tant qu'un seul fluide, dont les propriétés physiques changent à travers l'interface. Les caractéristiques physiques ρ , μ , λ et C_p sont déterminés de façon plus précise en utilisant la variable additionnel C qui représente de la fraction volumique.

$$\rho = C\rho_1 + (1 - C)\rho_2 \quad (\text{III.6})$$

$$\mu = C\mu_2 + (1 - C)\mu_1 \quad (\text{III.7})$$

$$\lambda = C\lambda_2 + (1 - C)\lambda_1 \quad (\text{III.8})$$

$$c_p = Cc_{p2} + (1 - C)c_{p1} \quad (\text{III.9})$$

La valeur de cette variable est telle que, si une cellule est remplie de fluide1(air) $C=0$, et si elle est remplie de fluide2 (paraffine fondu) ($C=1$). Ainsi, la forme de la surface libre est capturée avec l'isovaleurs $C=0.5$. La dépendance de C , en fonction du temps, est régie par équation :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial C(\mu)}{\partial x} + \frac{\partial Cv}{\partial y} = 0 \quad (\text{III.10})$$

- **Equation de l'énergie**

Dans le modèle enthalpie, l'équation d'énergie est écrite en fonction de l'enthalpie et de la température où l'évolution de la chaleur latente est prise pour établir une relation entre l'enthalpie et la température

$$\rho C_p \frac{\partial(T)}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - S_T \quad (\text{III.11})$$

Où S_T : représente le terme source qui peut être interprété comme la source de chaleur issue de la chaleur latente. Ce terme est défini par :

$$S_T = -\rho L_f \left(\frac{\partial f}{\partial t} + u \frac{\partial f}{\partial x} + v \frac{\partial f}{\partial y} \right) \quad (\text{III.12})$$

L_f : Est la chaleur latente de fusion

f : Est la fraction liquide. La fraction liquide est la variable qui représente l'état d'un MCP, sa valeur varie de 0 jusqu'à 1.

- Si la fraction de liquide $f = 1$ c'est-à-dire toute la quantité du MCP qui se trouve dans un volume V est dans son état liquide (c'est la phase liquide ou la zone liquide).
- Si la fraction de liquide $f = 0$ c'est-à-dire toute la quantité du MCP qui se trouve dans un volume V est dans son état solide (c'est la phase solide ou la zone solide).
- Si $0 < f < 1$ c'est la région pâteuse où coexistent les deux phases, c'est-à-dire dans cette zone le MCP est un mélange du solide et liquide (mush zone - zone pâteuse).

Dans le modèle enthalpie la fraction liquide f est exprimée en fonction de la température. Pour cela deux températures caractéristiques du MCP sont définies :

- Température solides T_s : au-dessous de cette température le MCP est dans son état solide.
- Température liquides T_l : au-delà de cette température le MCP est dans son état liquide.

Si les particules du MCP ont une température entre T_s et T_l le MCP est un mélange d'un liquide et solide.

Suivant ces définitions, la relation entre la fraction liquide et la température est donnée par [1,6] :

$$f(T) = \begin{cases} 0 & \text{si } T < T_s \\ \frac{T-T_s}{T_l-T_s} & \text{si } T_s \leq T \leq T_l \\ 1 & \text{si } T \geq T_l \end{cases} \quad \text{(III.13)}$$

Avec :

$f = 1$ dans la zone liquide

$f = 0$ dans la zone solide.

$0 < f < 1$ dans la région pâteuse où coexistent les deux phases

III.4 Condition initiale et aux limites

III.4.1 Condition initiale

La température initiale dans la paraffine est fixée à 20 °C.

III.4.2 Conditions aux limites

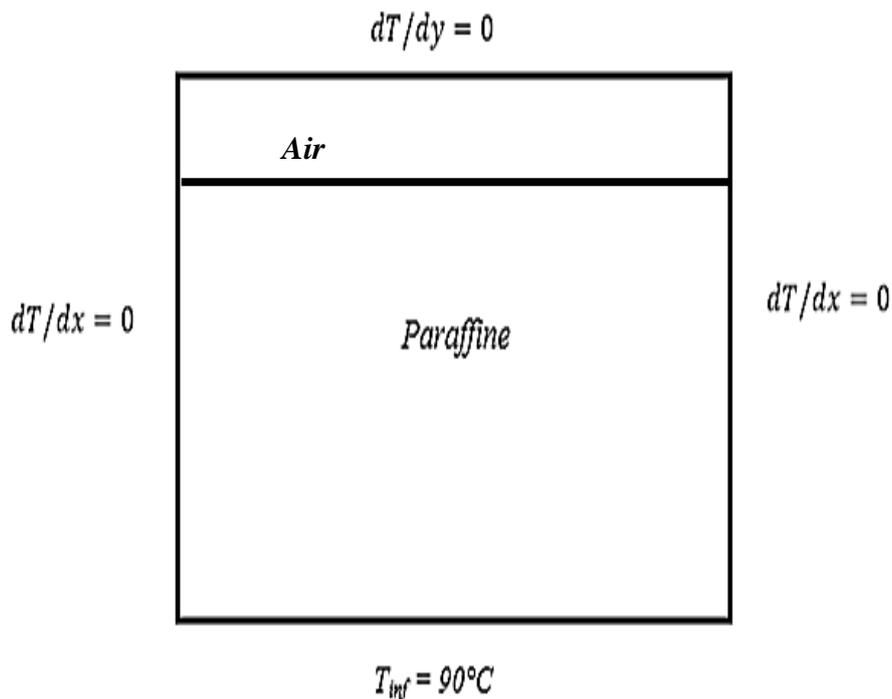


Figure III.4: Conditions aux limites

- La paroi inférieure de la cavité est chauffée avec une température fixe $T_{inf} = 90^{\circ}\text{C}$.
- Les parois extérieures de la cavité sont supposées isolées $\partial T/\partial n = 0$ (n désigne la normale à la surface).
- Ainsi que la condition de non glissement (Type Wall) est imposée (vitesses nulles sur la paroi) : $u = v = 0$

III.5 Simulation numérique

Les calculs numériques ont été effectués par le code du calcul ANSYS Fluent 15.0

III.5.1 Création de la géométrie

L'acquisition géométrique est réalisée dans le logiciel (DESIGN MODELER)

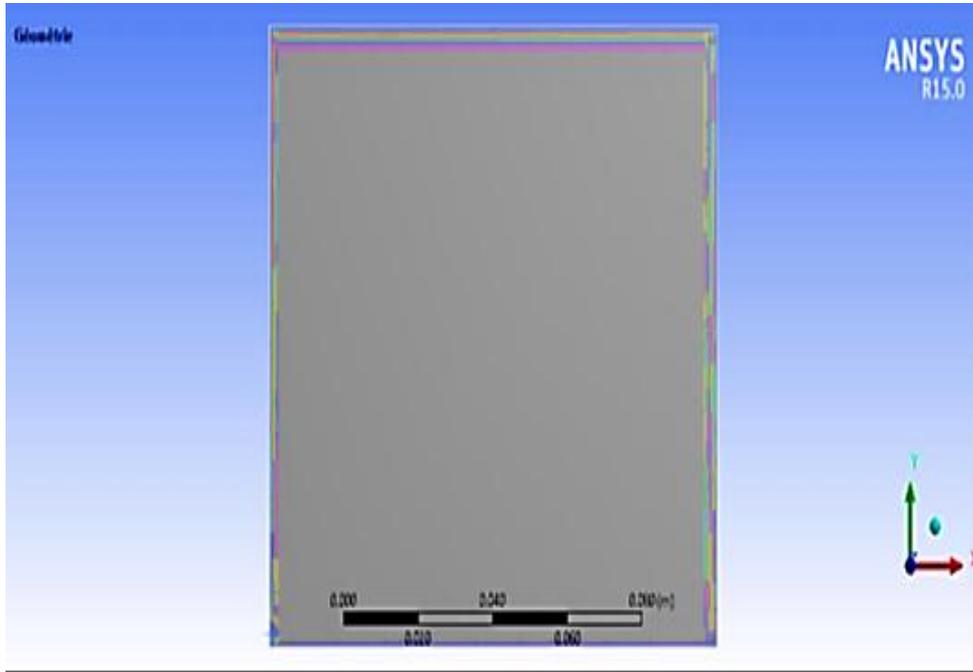


Figure III.5 : Création de la géométrie dans DESIGN MODELER

III.5.2 Maillage de la cavité

La cavité est maillée à l'aide du meilleur Meshing

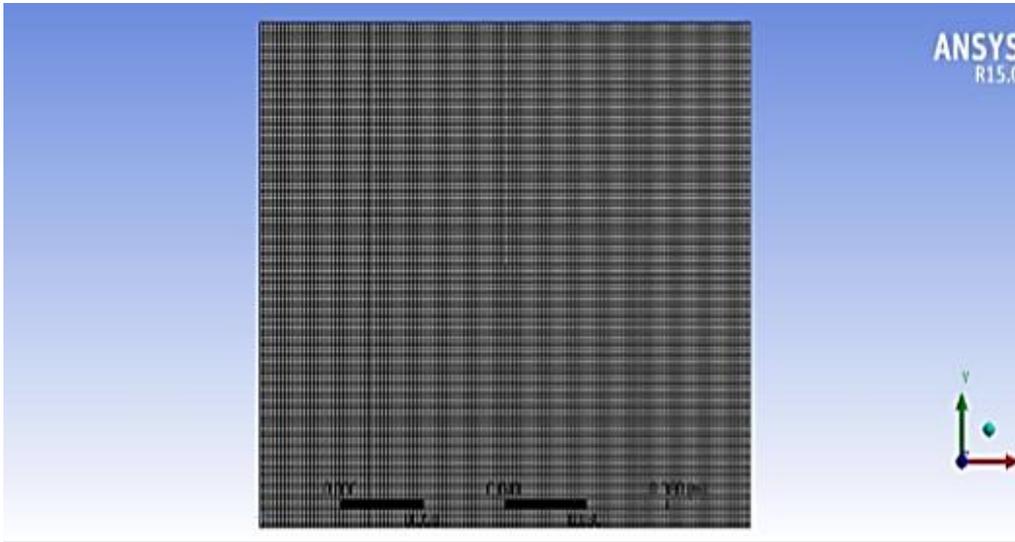


Figure III.6 :Création du maillage dans MESHING

III.5.3 Calcul numérique

Pour Les calculs numériques effectués sous FLUENT, ils sont adoptés les configurations suivantes

1. Le modèle du solveur utilisé est Pressure Based (isolée), cette formulation permet de résoudre les équations de continuité, de quantité de mouvement et celle de l'énergie toutes isolées les unes des autres.
2. La formulation Time : Transient; pour l'étude instationnaire du problème physique.

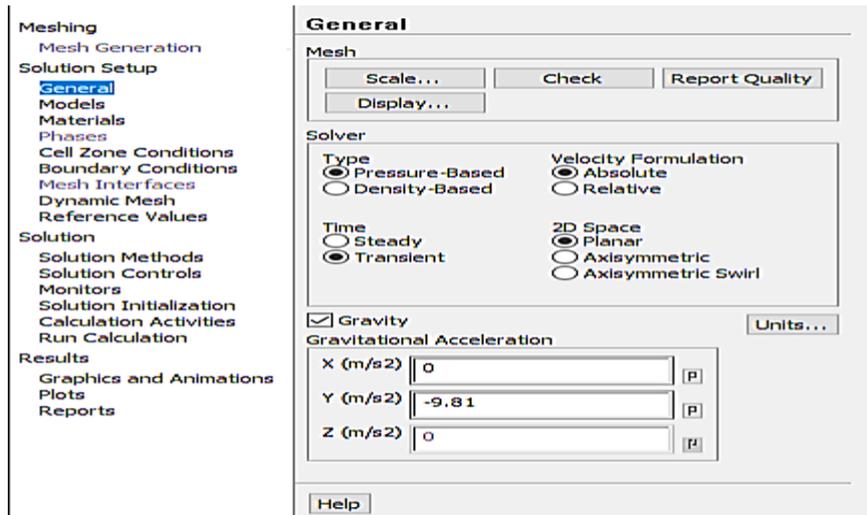


Figure III.7: Interface de Fluent avec les paramètres du solveur utilisé

3. Pour le suivi de la fraction liquide, le modèle melting-solidification est adopté avec une constante de Darcy $C=10^6$.

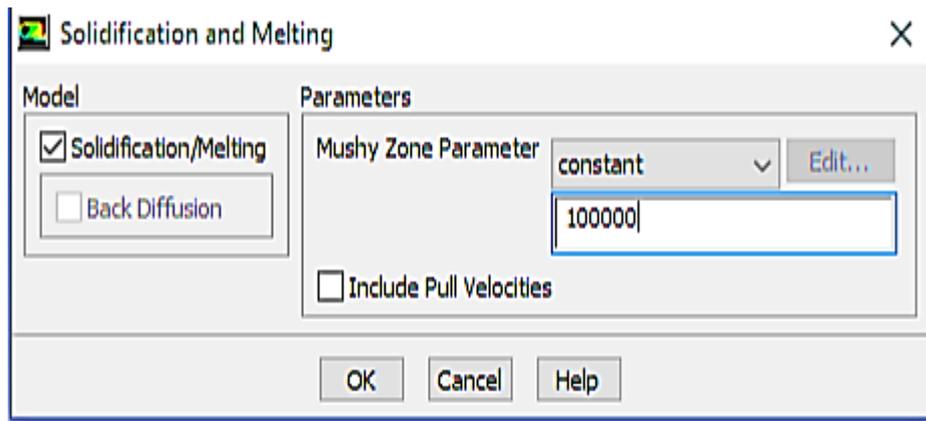


Figure III.8: Constante de Darcy utilisée

4. Définir les paramètres de la résolution : Pour le couplage pression-vitesse dans l'équation de Navier-Stokes, Fluent propose plusieurs schémas, à savoir SIMPLE, PISO et autres. Dans cette étude, le schéma SIMPLE est adopté [50].
5. Les facteurs de sous relaxation qui semblent favoriser la convergence des résultats avec une meilleure stabilité sont données dans la figure III.10 :

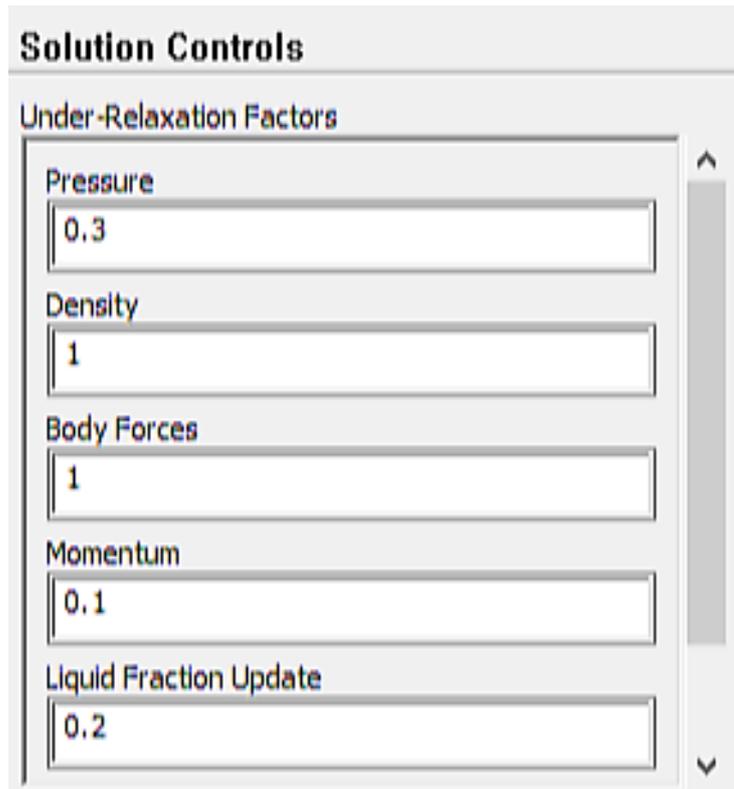


Figure III.9: Facteurs de sous relaxation

III.5.4 Adaptation des régions pour écoulement diphasique

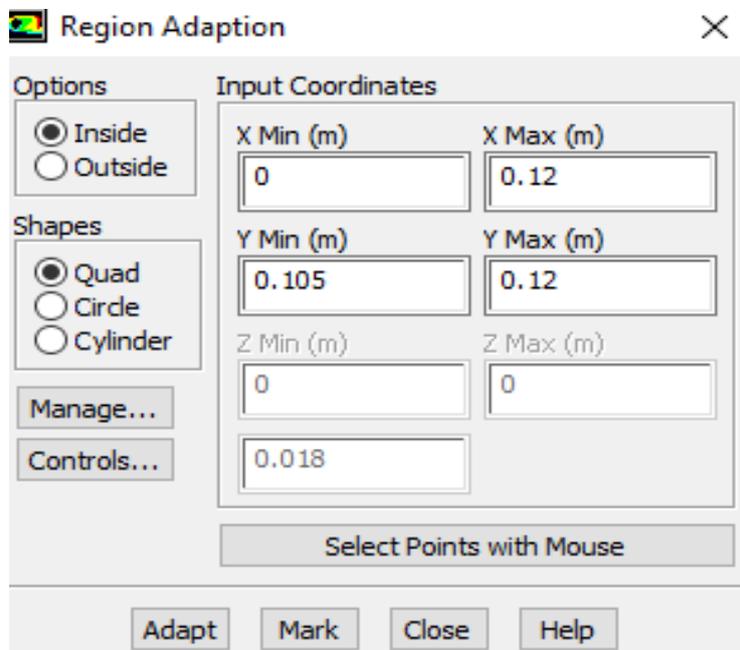


Figure III.10: Adaption de région

III.6 Application à un écoulement diphasique gaz-liquide

Dans ANSYS FLUENT trois modèles multiphasiques sont disponibles

- VOF volume of fluid : est une technique de suivi de surface appliquée à une maille eulérienne fixe. Elle est conçue pour deux ou plusieurs fluides immiscibles ou la position de l'interface entre les fluides présente un intérêt. Dans le modèle VOF, un ensemble unique d'équation de la quantité de mouvement est partagé par les fluides, et la fraction volumique de chaque cellule de calcul est suivie dans tout le domaine.

Les applications du modèle VOF comprennent l'écoulement en surface libre, le remplissage, le balbutiement, le mouvement de grandes bulles dans un liquide après une rupture de barrage, la prévision de la rupture du jet (tension superficielle), et le suivi régulier ou transitoire de toute interface liquide-gaz.

- Mixture : est un modèle conçu pour deux phases ou plus (fluide ou particulaire) comme dans le modèle eulérien, les phases sont traitées comme des continues inter pénétrantes. Le modèle de mélange résout l'équation de la quantité de mouvement du mélange et prescrit des vitesses relatives pour décrire les phases dispersées.

Les applications du modèle de mélange comprennent les écoulements chargés, de particules à faible charge, les écoulements à bulles, les séparateurs à cyclone. Le modèle de mélange peut également être utilisé sans vitesses relatives pour les phases dispersées afin de modéliser l'écoulement homogène multiphasé

- Eulerian : est le plus complexe des modèles multiphasiques dans ANSYS FLUENT. Il résout un ensemble d'équations de momentum et de continuité pour chaque phase. Le couplage est réalisé grâce aux coefficients de pression et d'échange interphase. La manière dont ce couplage est manipulé dépend du type de phases impliquées, les écoulements granulaires (fluide-solide). Pour les écoulements granulaires, les propriétés sont obtenues à partir de l'application de la théorie cinétique. L'échange de la quantité de mouvement entre les phases dépend également du type de mélange modélisé. Les fonctions définies par l'utilisateur d'Ansys FLUENT vous permettent de personnaliser le calcul de

l'échange de momentum. Les applications du modèle eulérien multiphase comprennent des colonnes à bulles, des risers, des suspensions de particules et des lits fluidisés

Nous avons utilisé dans ce travail un modèle de type VOF

Chapitre IV

Résultats et

discussions

IV.1 Test de maillage

Un test de maillage a été effectué pour déterminer les meilleur temps de calculs pour une meilleure approximation (convergence, précision). Trois différentes tailles de maillage ont été testées, à savoir 180×180, 274×274, 360×360.

Tableau IV.1 :Les tailles des trois maillages

Maillage	Nombre des cellules
180×180	32400
274×274	75076
360×360	129600

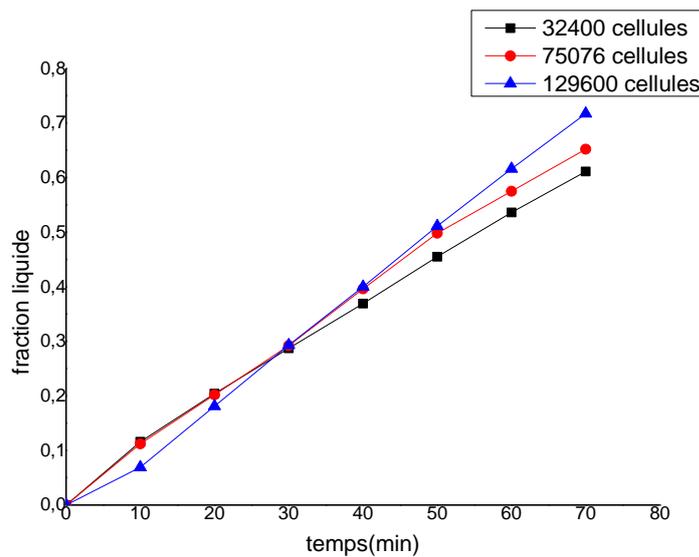
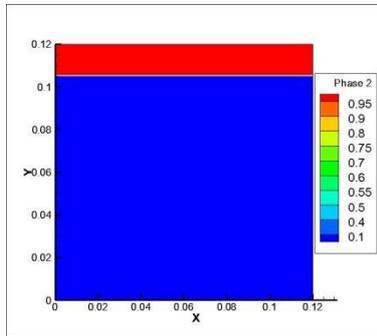


Figure IV.1 :Evolution de la fraction liquide pour les trois maillages

La figure IV.1 représente l'évolution de la fraction liquide en fonction du temps pour les trois maillages testés (32 400, 75076 et 129600) avec un pas du temps 0.02et un coefficient de Darcy $c=10^6$. Le maillage 75076 a été choisi.

IV.2 Evolution de la fraction volumétrique

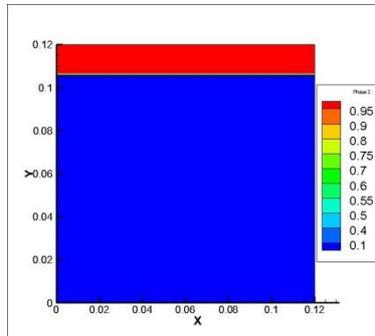
0 min



Paraffine=88%

Air=12%

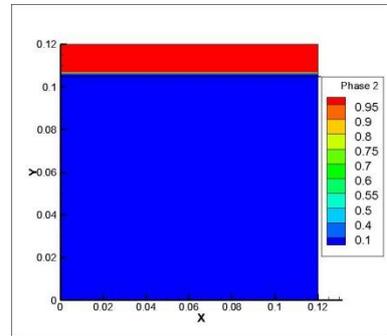
10 min



Paraffine=88.32%

Air =11.67%

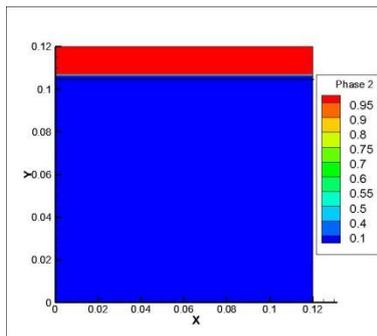
20 min



Paraffine=88.53%

Air=11.46%

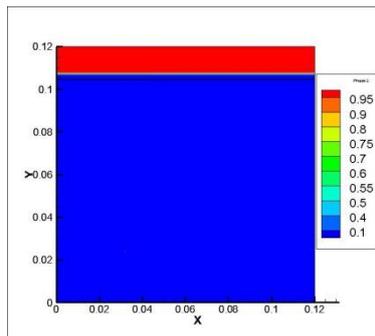
30 min



paraffine=88.70%

Air=11.29%

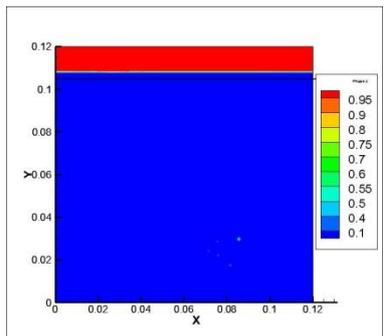
40 min



Paraffine=89.19%

Air=10.80%

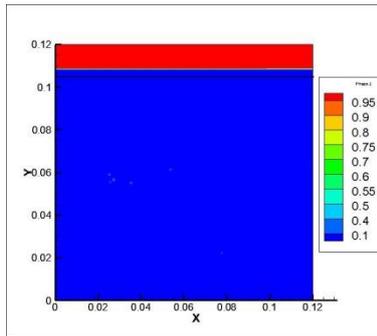
50 min



Paraffine=89.88%

Air=10.11%

60 min



Paraffine= 90.14%

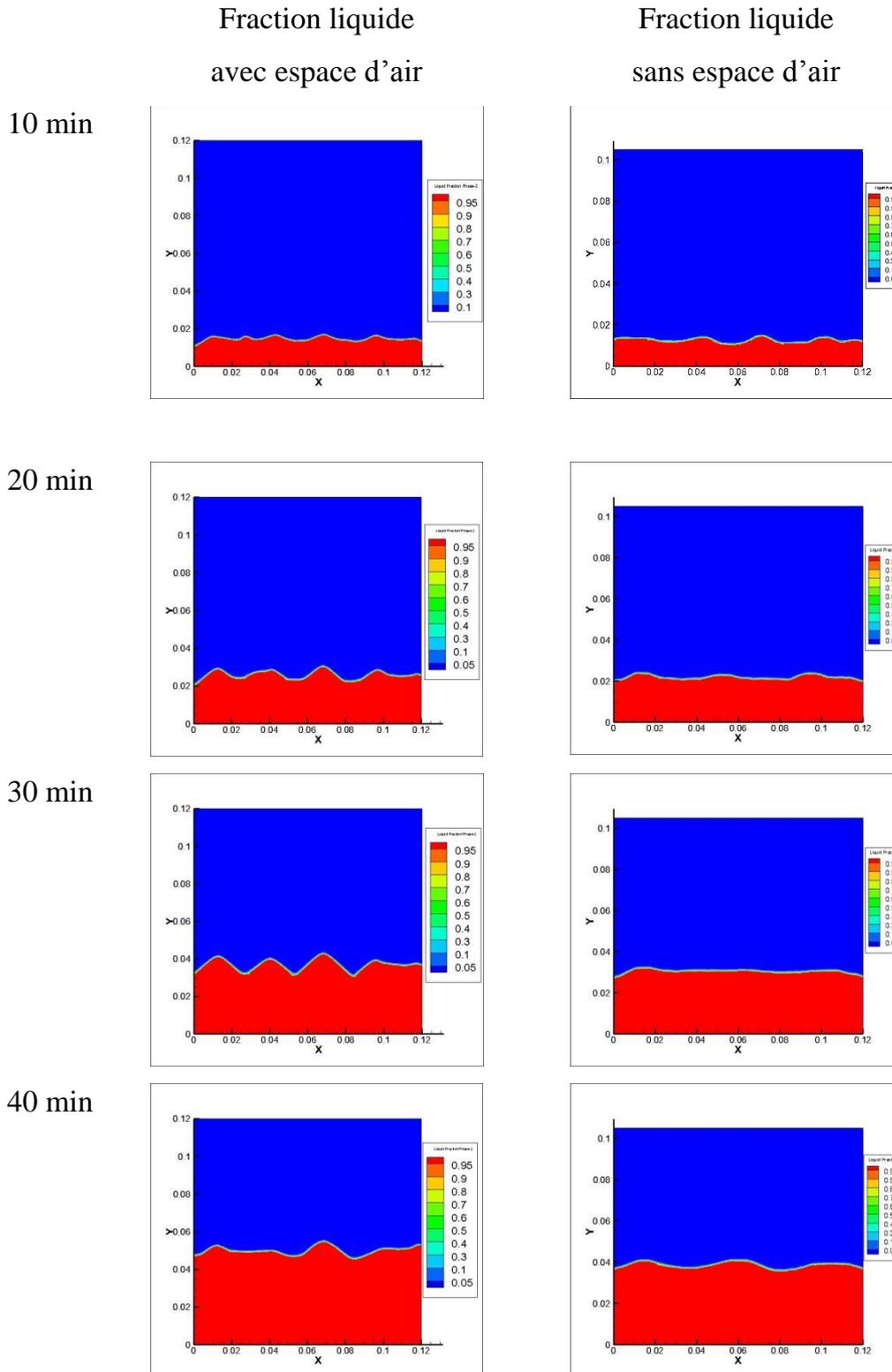
Air= 9.85%

Figure IV.2 : Evolution de la fraction volumique (paraffine-air) en fonction du temps

La Figure IV.2 montre l'évolution de la fraction volumétrique paraffine-air en fonction du temps dans une cavité chauffé par le bas. La couleur bleu représente la paraffine et la couleur rouge représente l'air. Le trait horizontal en noir indique la frontière initiale de la fraction volumique paraffine-air.

A $t=0s$, la cavité est remplie par 87.62% de paraffine et 12.48% d'air. Pendant la fusion le volume de la paraffine commence a augmenté entrainant la diminution du volume d'air jusqu'à atteindre 90.14% de paraffine et 9.85% d'air à $t=60$ min.

IV.3 Comparaison de la fraction liquide avec et sans espace d'air



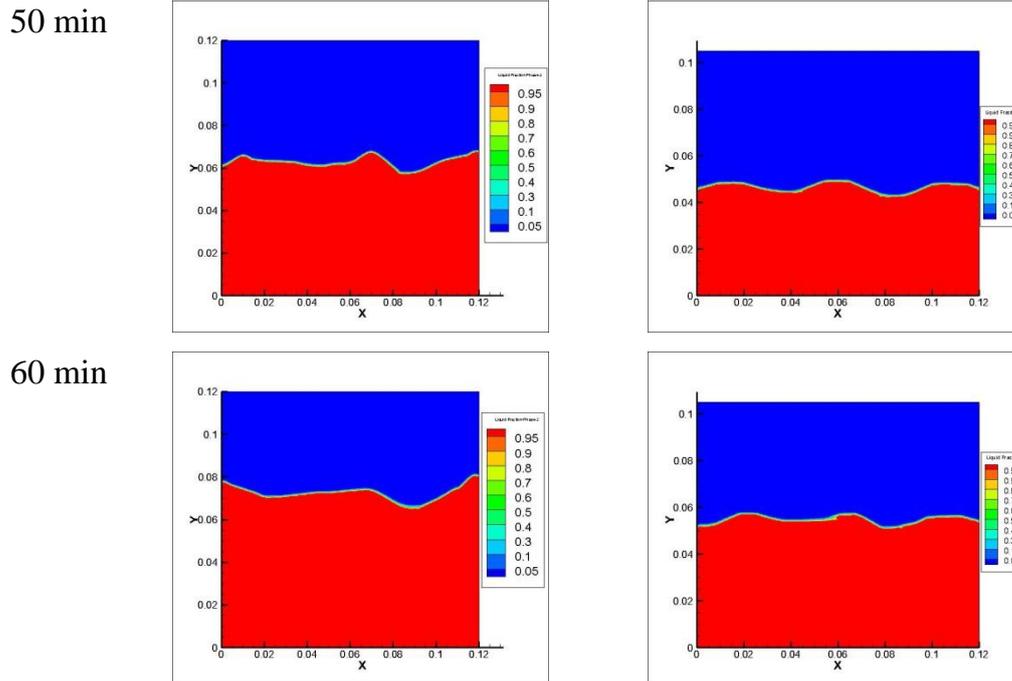


Figure IV.3 :Evolution de la fraction liquide de la paraffine en fonction du temps, sans et avec présence d'un espace d'air.

La figure IV.3 montre une comparaison entre l'évolution de la forme et la position du front de fusion dans les deux cas avec et sans présence d'un espace d'air à la partie supérieure de la cavité. La couleur rouge indique la partie liquide de la paraffine, le bleu indique la partie solide et les différents couleurs indiquent la zone pâteuse (front de fusion).

Au début de la fusion de la paraffine, on remarque que les positions du front de fusion sont identique pour les deux cas avec et sans espace d'air, mais le nombre et les formes des ondulations observées dans le premier cas sont supérieures et assez différentes par rapport au deuxième montrant la complexité de la convection développée dans la phase liquide d'un MCP chauffée par le bas.

Après 30 min, la fusion devienne plus rapide dans la cavité avec la présence d'un espace d'air et le front de fusion s'éloigne pour atteindre 70% de la paraffine liquide à $t=60\text{min}$ et 50% dans l'autre cavité (figure IV.4). Cela du que la présence d'air minimise les pertes au niveau supérieure de la cavité et par conséquent garde la chaleur qui monte vers le haut et chauffe d'avantage la paraffine.

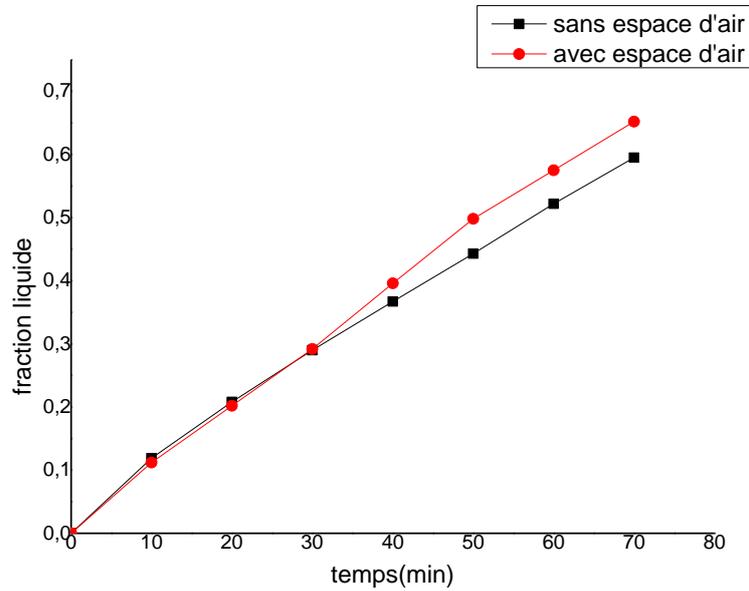
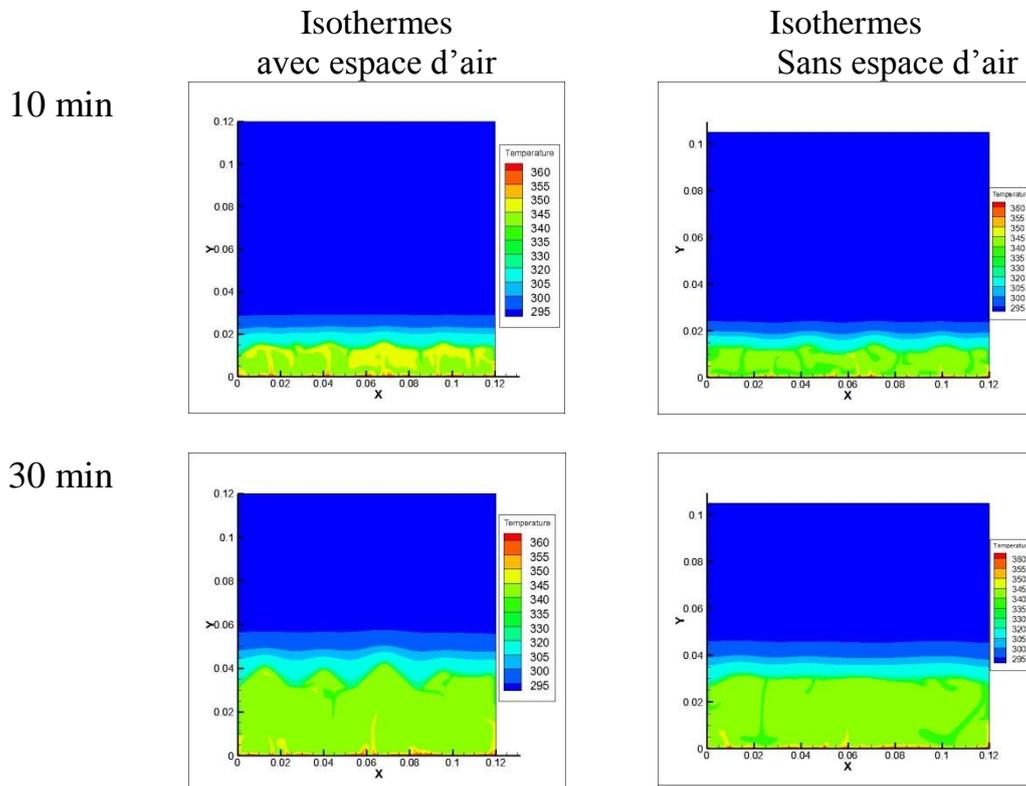


Figure IV.4: Evolution temporelle de la fraction liquide avec et sans espace d'air

IV.4 Comparaison des isothermes avec et sans espace d'air



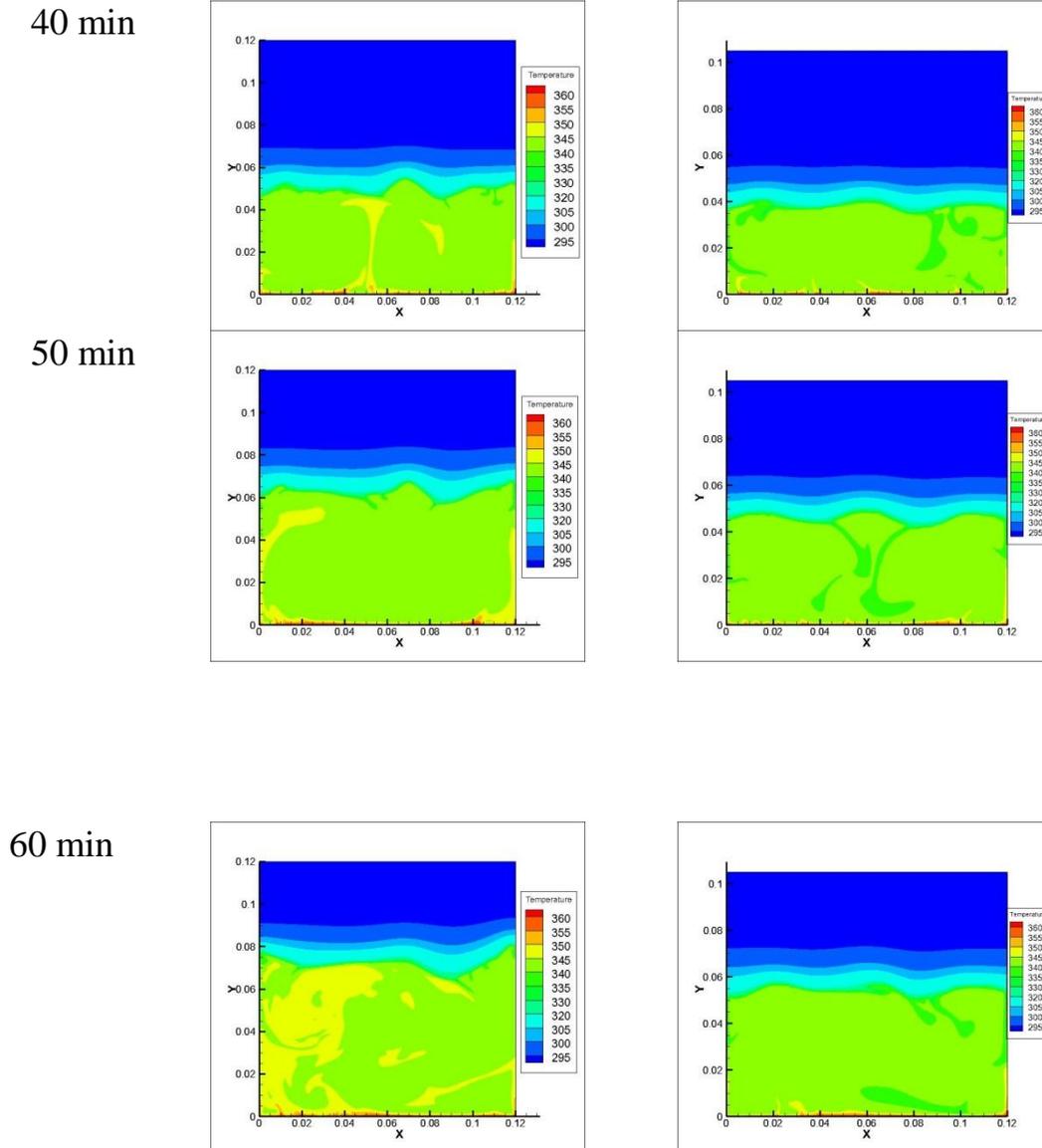
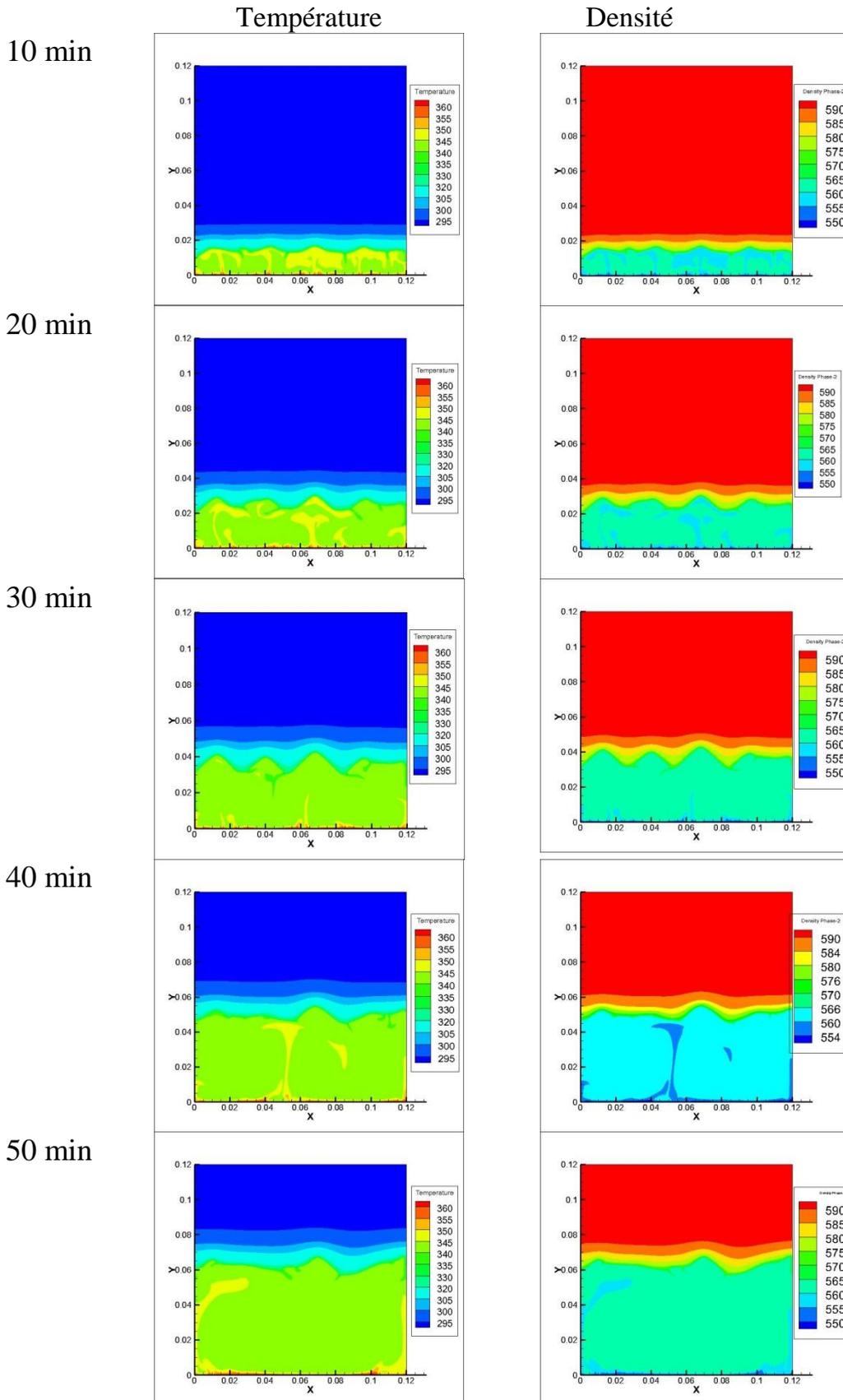


Figure IV.5 : Evolution de la température de la paraffine en fonction du temps, sans et avec présence d'un espace d'air.

La figure IV.5 montre une comparaison entre des isothermes pendant la fusion de la paraffine dans une cavité avec et sans la présence d'air. Au début de la fusion les isothermes sont identiques pour les deux cas. Après 30 min, la chaleur augmente vers la partie supérieure de la cavité à cause de la convection thermique naturelle.

IV.5 Evolution de la Température et la densité



60 min

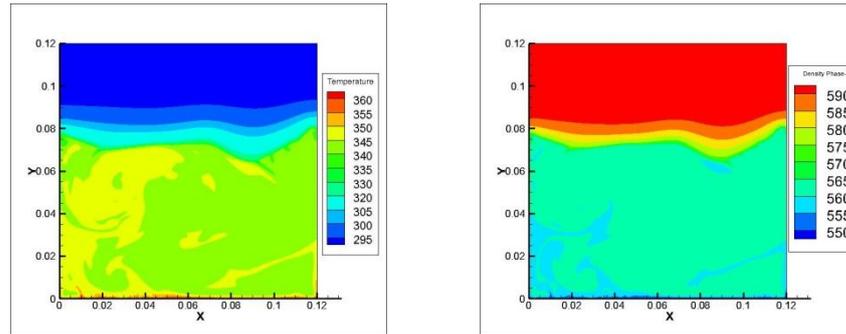


Figure IV.6 : Evolution de la Température et la densité de la paraffine dans une cavité avec espace d'air

La figure IV.6 représente l'évolution de la température et la densité pendant la fusion de la paraffine dans une cavité chauffée par le bas en fonction de temps. On remarque qu'au fur et à mesure que la température de la paraffine augmente dans la cavité, les densités diminuent provoquant l'augmentation du volume de la paraffine.

IV.6 Evolution de la fraction liquide et la densité

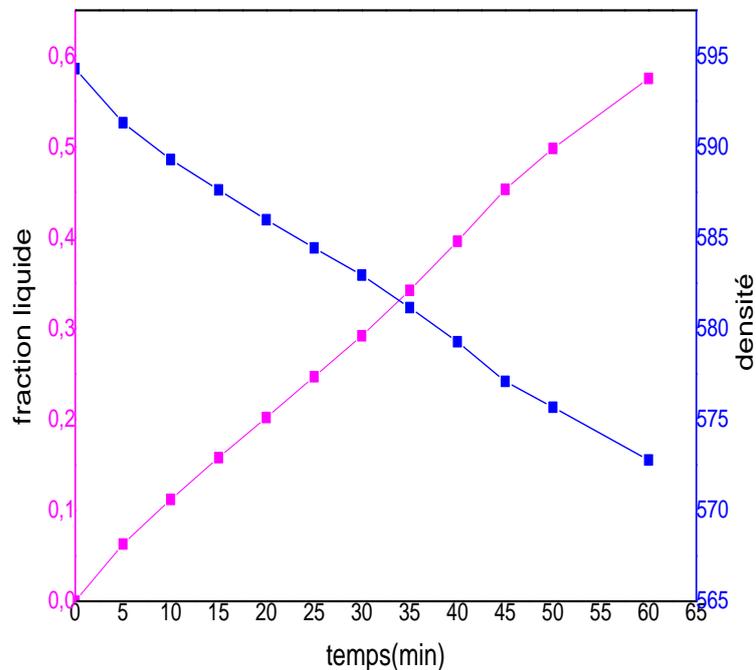


Figure IV.7: Evolution de la fraction liquide et la densité en fonction de temps

La figure IV.7 montre l'évolution de densité et de fraction liquide en fonction du temps. Il est clair que la fraction liquide de la paraffine varie inversement proportionnel par rapport à la densité.

La variation de densité s'avère affecter le processus de transfert de chaleur de manière significative. Avec la diminution de densité causée par l'augmentation de température, une vitesse de fusion plus rapide est observée avec un transfert de chaleur plus élevé.

IV.7 Evolution de coefficient de dilatation

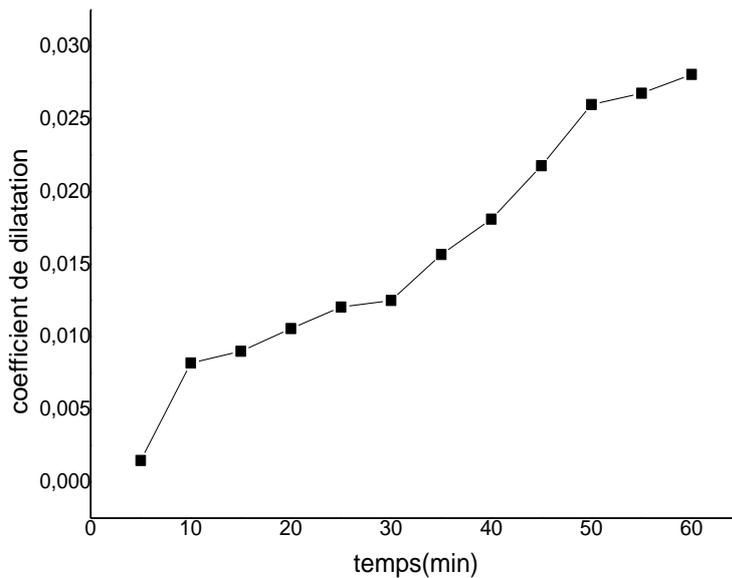


Figure IV.8 : Evolution de coefficient de dilatation

La figure IV.8 montre l'évolution de coefficient de dilatation de la paraffine en fonction du temps.

On remarque que la dilatation de la paraffine à augmenter de 3%

Conclusion générale

Le présent travail porte sur la simulation numérique et l'analyse du comportement dynamique et thermique lors de la fusion d'un matériau à changement de phase (paraffine) dans une cavité chauffée par le bas avec la présence d'un espace d'air. La simulation est développée par le logiciel ANSYS Fluent 15.0. À partir des résultats obtenus, on peut tirer les conclusions suivantes :

- Pendant la fusion de la paraffine dans une cavité avec espace d'air le volume de la paraffine a augmenté de 87.62% à 90.14% entraînant la diminution du volume d'air de 12.48% à 9.85% .
- Le changement de volume d'un matériau à changement de phase lors de la fusion de ce dernier est une conséquence directe de la différence de densité entre les phases.
- Le processus de la fusion est plus rapide dans la cavité avec un espace d'air que dans la cavité sans espace d'air .C'est parce que le flux de chaleur est plus important dans la cavité avec un espace d'air.
- La variation de densité s'avère affecter le processus de transfert de chaleur de manière significative. Avec la diminution de densité causée par l'augmentation de température, une vitesse de fusion plus rapide est observée avec un transfert de chaleur plus élevé.
- Durant la fusion de la paraffine, une dilatation thermique a été enregistrée de 3% dans une cavité avec la présence d'un espace d'air.

En perspective : modélisé la forme réelle de l'interface paraffine-air, plus une confrontation avec l'expérimentale.

Références bibliographique

- [1] Adèle SOUPART-CARON, Stockage de chaleur dans les Matériaux à Changement de Phase, thèse de doctorat, Université de Grenoble ALPES, 2015.
- [2] J.M.P.Q. Delgado, J.C. Martinho, A. VazSá, A.S. Guimarães, V. Abrantes, Thermal Energy Storage with Phase Change Materials A Literature Review of Applications for Buildings Materials, Vol. 8, p. 6, 2019
- [3] A. Shukla, A. Sharma, P.H. Biwolé, Latent Heat-Based Thermal Energy Storage Systems Materials, Applications, and the Energy Market, Vol. 1, p. 7, 2020.
- [4] David Verdier-Gorcias, Stockage thermique de protection à chaleur latente intégré à un récepteur solaire à air pressurisé, thèse de doctorat, Université de Perpignan, 2016.
- [5] Manish K. RathodetJyotirmay Banerjee, Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 18, pp 246–258, 2013.
- [6] Bouaraba Chahraze, Simulation numérique du stockage de l'énergie thermique dans une cavité rectangulaire contenant un matériau à changement de phase, thèse de master, Université M'hamedBougara de Boumerdès.2018
- [7] Amy S. Fleischer, Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials Fundamentals and Applications. Vol. 10, p. 39, 2015.
- [8] Amy S. Fleischer, Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials Fundamentals and Applications. Vol. 10, p. 41, 2015.
- [9] A. Abhat, Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage: Heat Storage Materials, Solar energy, Vol. 30, pp. 312-332, 2018.
- [10] J. Borderon, Intégration des matériaux à changement de phase comme système de régulation dynamique en rénovation thermique, Mémoire de Doctorat: Génie Civil, Université de Lyon, 2012.

- [11] B. Zalba, J.M. Marin, L.F. Caberza, H. Mehling, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *ApplThermEng*, Vol. 23, pp. 251–283, 2003.
- [12] S.D. Sharma, K. Sagara, Latent heat storage materials and systems: a review. *Int J Green Energy*, Vol. 2, pp. 1–56, 2005.
- [13] J. Gasia, A. Gutierrez, G. Peiro, L. Miro, M. Grageda, S. Ushak, L. F. Cabeza, Thermal performance evaluation of bischofite at pilot plant scale, *Applied Energy*, Vol. 155, pp. 826-833, 2015.
- [14] Amy S. Fleischer, *Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials Fundamentals and Applications*. Vol. 10, p. 44, 2015.
- [15] Manish K. Rathod J. Banerjee, Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev*, Vol. 18, pp. 246-256, 2013.
- [16] S.A. Memon, Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review. *Renew. Sustain. Energy Rev*, Vol. 31, pp. 870-906, 2014.
- [17] K. Pielichowska, K. Pielichowski, Phase change materials for thermal energy storage, *Progress in Materials Science*, Vol. 65, pp. 67-123, 2014.
- [18] Mosaffa AH, Infante Ferreira CA, Talati F, Rosen MA. Thermal performance of a multiple PCM thermal storage unit for free cooling. *Energy Convers Manage*;67:1–7,2013.
- [19] Shchukina, E. M., Graham, M., Zheng, Z., & Shchukin, D. G., Nanoencapsulation of phase change materials for advanced thermal energy storage systems. *Chemical Society Reviews*, 47(11), 4156–4175. doi:10.1039/c8cs00099a ,2018.
- [20] Kamkari B, Shokouhmand H and Bruno F. Experimental investigation of the effect of inclination angle on convection-driven melting of phase change material in a rectangular enclosure. *Int J Heat Mass Tran*; 72:186–200, 2014.

- [21] Haddad, Z., Iachachene, F. Melting characteristics of organic phase change material in a wavy trapezoidal cavity. *Journal of Molecular Liquids*, 112132. doi:10.1016/j.molliq.112132,2019.
- [22] N.Hale, R.Viskanta, Solid-Liquid Phase-Change Heat Transfer and Interface Motion in Materials Cooled or Heated From Above or Below. *Heat and Mass Transfer*. pp. 283-292. Vol. 23. 1979.
- [23]. R.Viskanta, B. Webb. Natural-Convection-Dominated Melting Heat Transfer in an Inclined Rectangular Enclosure. *Heat and Mass Transfer*. pp. 183-192. Vol. 29. 1986.
- [24]. M.A Hamdan, F. Elwerr. Thermal energy storage using a phase change material. *Solar Energy*. pp. 183-189. Vol. 56. 1996.
- [25]. B. Binet. Etude de la fusion dans des enceintes munies de sources de chaleur discrètes. Université de SHERBROOKE, Thèse de Doctorat (Philosophiae Doctor) Spécialité: génie mécanique. 1998.
- [26] Erek A, İlken Z, Acar MA, Experimental and numerical investigation of thermal energy storage with a finned tube. *Int J Energy Res* ;29:283–301.2005.
- [27]. A. Arasu, A. Mujumdar. Numerical study on melting of paraffin wax with Al₂O₃ in a square enclosure. *Heat Mass and Transfer*. pp. 8-16. Vol. 39. 2012.
- [28] Mat, S., Al-Abidi, A. A., Sopian, K., Sulaiman, M. Y., & Mohammad, A. T. Enhance heat transfer for PCM melting in triplex tube with internal–external fins. *Energy Conversion and Management*, 74, 223–236. doi:10.1016/j.enconman.05.003.2013.
- [29] Kamkari, B., & Shokouhmand, H. Experimental investigation of phase change material melting in rectangular enclosures with horizontal partial fins. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 78, 839–851. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.07.056.2014.

- [30] B. Kamkari, H.J. Amlashi, Numerical simulation and experimental verification of constrained melting of phase change material in inclined rectangular enclosures, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 88, pp. 211-219, 2017.
- [31] Ji, C., Qin, Z., Low, Z., Dubey, S., Choo, F. H., & Duan, F. Non-uniform heat transfer suppression to enhance PCM melting by angled fins. *Applied Thermal Engineering*, 129, 269–279. doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.10.030.2018.
- [32] Kamkari, B., & Groulx, D. Experimental investigation of melting behaviour of phase change material in finned rectangular enclosures under different inclination angles. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 97, 94–108. doi:10.1016/j.expthermflusci.2018.04.007.2018.
- [33] Y. Wang, J. Dai, D. An, Numerical Investigations on Melting Behavior of Phase Change Material in a Rectangular Cavity at Different Inclination Angles, *Applied Sciences*, Vol. 8, p. 1627, 2018.
- [34]. S. Madruga et al. Experimental and numerical study of melting of the phase change material tetracosane. *Heat and Mass Transfer*. pp. 163-170. Vol. 98. 2018.
- [35] R. Karami, B. Kamkari, Investigation of the effect of inclination angle on the melting enhancement of phase change material in finned latent heat thermal storage units, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 146, pp. 45-60, 2019.
- [36] R. Karami, B. Kamkari, Experimental investigation of the effect of perforated fins on thermal performance enhancement of vertical shell and tube latent heat energy storage systems, *Energy Conversion and Management*, vol 210, pp 112679, 2020.
- [37] B. Kamkari, H. Abolghasemi, V. Safari Experimental and Numerical investigations of thermal performance enhancement in a latent heat storage heat exchanger using bifurcated and straight fins, *Renewable Energy*, vol 174, pp 102-121, 2021.
- [38] M. KHerrafi, M. KHelladi, Simulation numérique et validation de la fusion de la paraffine dans une cavité chauffée par le bas, *Mémoire de Master: Energétique*, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2021.

- [39] Dawei Sun et Suresh V. Garimella Numerical and Experimental Investigation of Solidification Shrinkage , Numerical Heat Transfer, Part A: Applications: An International journal of computation and methodology, 52:2, 145-162, doi: 10.1080/10407780601115079:2007.
- [40] Diwakar Janghel, Shyamprasad Karagadde, Sandip K ; Thermal performance analysis of phase change material based thermal storage system using a generalized numerical model with volumetric expansion and shrinkage; Applied Thermal Engineering; Department of Mechanical Engineering, 2020.
- [41] Julian Vogela , André Thessa , Validation of a numerical model with a benchmark experiment for melting governed by natural convection in latent thermal energy storage. Applied Thermal Engineering, 148, 147-159, 2019.
- [42] Debasree Ghosh and Chandan Guha Numerical and experimental investigation of paraffin wax melting in spherical cavity; Heat and Mass Transfer, 2018.
- [43] Debasree Ghosh, Chandan Guha , Joyjeet Ghose; Numerical investigation of paraffin wax solidification in spherical and rectangular cavity; Heat and Mass Transfer 55:3547–3559; 2019.
- [44] Nikhil Katiyar, Sandip K ; Study of shrinkage effect of aluminium based binary alloys as phase change materials for latent heat thermal energy storage applications; Journal of Energy Storage; Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Bombay, 2022.
- [45] Hasibuzzaman Mahmud et Dewan Hasan Ahmed; Numerical Investigations on Melting of Phase Change Material (PCM) with Different Arrangements of Heat Source- sink Pairs Under Microgravity; Microgravity Science and Technology; 2022.
- [46] I. Marouf, S. Belkadi, Etude expérimentale et numérique de la fusion de paraffine dans une cavité chauffée par le bas, Mémoire de Master: Energétique, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2021.

[47] Abdel Illah Nabil Korti, HocineGuellil,Experimental study of the effect of inclination angle on the paraffin melting process in a square cavity,Journal of Energy Storage,University of Tlemcen,2020

[48] Friedman, The Stefan problem in several space variables, Trans. Amer. Math. Soc. 13351-87,1968

[49] Liu S, Li Y and Zhang Y. Mathematical solutions and numerical models employed for the investigations of PCMs' phase transformations. Renew SustEnerg Rev; 33: 659–674,2014.

[50] L. Tian, X. Liu , S. Chen , Z. Shen, Effect of fin material on PCM melting in a rectangular enclosure, Applied Thermal Engineering, Vol. 167, 114764, 2020