

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



Energétique et Thermique
Appliquée ETAP

MEMOIRE

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

En : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Par :

NASRI Samia

Sujet

Simulation numérique et validation du comportement dynamique et thermique de la fusion d'un MCP dans une cavité chauffée par le coté

Soutenu le 02 décembre 2021 devant le jury composé de :

Mr BENRAMDANE M.	MCB	Univ. Tlemcen	Président
Mr SAIM R.	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur
Mme SAIB H.	MAA	Univ. Tlemcen	Encadrante

Année universitaire : 2020 - 2021

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu qui m'a donnée la santé, la volonté et le courage d'accomplir ce travail.

Mes vifs remerciements vont à mon promoteur, Mme H. SAIB pour son aide ;ses critiques constructives ;ses explications et suggestions pertinentes et pour la qualité de ses orientations tout au long de ce travail en apportant tant de soins à la réalisation de ce mémoire.

Je remercie également les membres de jury, Mr M.BENRAMDANE et Mr R. SAIM qui m'ont fait honneur en acceptant d'examiner et de juger ce travail.

Enfin, un merci tout particulier à tous ceux qui m'ont apportée leur soutien.

ملخص

يركز العمل الحالي على المحاكاة العددية باستخدام برنامج **ANSYS FLUENT 15.0.7** لصهر مادة متغيرة الطور في تجويف جانبي ساخن. من أجل التحقق من السلوك الديناميكي والحراري للعملية ، استخدمنا النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها مسبقاً في الأعمال السابقة. تم إجراء اختبار الشبكة بالإضافة إلى المقارنة مع النتائج التجريبية التي أظهرت انحرافاً كبيراً إلى حد ما ناتج عن تشتت الانتباه عن ظروف الحدود الفعلية.

الكلمات المفتاحية: المحاكاة العددية، الانصهار، مواد تغيير الطور، (PCM)

ANSYS Fluent.

Abstract

The present work focuses on the numerical simulation using ANSYS Fluent 15.0.7 software of the melting of a phase change material in a side-heated cavity. In order to validate the dynamic and thermal behavior of the process, we used experimental results obtained previously in previous works. A mesh test was carried out as well as a comparison with the experimental results which showed a rather large deviation caused by the distraction of the real boundary conditions.

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

Résumé

Le présent travail porte sur la simulation numérique à l'aide de logiciel ANSYS Fluent 15.0.7 de la fusion d'un matériau de changement de phase dans une cavité chauffée par le côté. Afin de valider le comportement dynamique et thermique du processus on a utilisé des résultats expérimentaux obtenus précédemment dans les travaux antérieurs. Un test de maillage a été effectué ainsi qu'une confrontation avec les résultats expérimentaux qui a montré un écart assez important causé par la distraction des conditions aux limites réelles.

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

Table des matières

Liste des figures	1
Liste des tableaux	3
Introduction générale	4
Chapitre I : Recherche bibliographique	
I-1 Introduction :.....	7
I-2 Synthèse bibliographique :.....	7
I-2.1 Convection naturelle dans des enceintes rectangulaires :.....	7
I-2.2 Convection naturelle dans des enceintes munies de sources de chaleur discrètes :	8
I-2.3 Fusion dans des enceintes rectangulaires avec convection naturelle	8
I-2.4 Fusion dans des enceintes munies de sources de chaleur discrète :	9
Chapitre II : Etude des matériaux à changement de phase	
II. 1 Introduction.....	20
II-1.1 Les matériaux à changement de phase	20
II-1.2 Le changement de phase d'un point de vue énergétique.....	20
II-2 Principe de fonctionnement des MCP :	22
II-3 Classification des matériaux à changement de phase.....	23
II-3-1 MCP organiques.....	23
II-3-2 Paraffines.....	24
II.4 Classement des MCP :	25
II.4.1 MCP classe SP :	25
II.4.2 MCP classe RT :	26
II-4.3 Composés organiques non-paraffiniques	28
II-4-4 Composés inorganiques :	29

II-4.5 Composée eutectiques	30
II.4.6. Sels hydratés	30
II-5 Critères de choix d'un matériau à changement de phase :	33
I.5. Phénomènes thermo-physiques liés aux PCM	34
II- 5.2: Intensification du transfert thermique dans les MCP :	34
II-5.3 Macro-encapsulation :	34

Chapter III : Position du Problème

III.1 Introduction :	36
III.2 Problème physique :	37
III.3 Modèle Mathématique :	39
III.3.1 Modèle dynamique :	39
III.3.2 Modèle thermique :	40
III.4 Conditions initiales et aux limites :	41
III.4.1 Conditions initiales :	41
III.4.2 Conditions aux limites :	42
III.5 Simulation numérique	43

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1 Validation numérique :	49
IV.1.1 Test de maillage :	49
IV.2 Evolution de la fraction liquide :	52
IV.3 Evolution de la température :	55
IV.4 Comparaison entre la fraction liquide expérimentale et numérique.	57
Conclusion générale	59
Bibliographie	61

Nomenclatures

C_p	Capacité calorifique massique	[J/kg.K]
m	masse	[kg]
T	Température	[K]
H	Enthalpie	[J]
L_f	Chaleur latente (fusion)	[J/kg]
L_v	Chaleur latente (vaporisation)	[J/kg]
$C_{p_s}(T)$	Capacité de masse thermique du corps à l'état solide	[J/kg.K]
$C_{p_l}(T)$	Capacité de masse thermique du corps à l'état liquide	[J/kg.K]
n	Nombre de moles	[mol]
ΔH_r	Enthalpie de la réaction	[J/mol]
λ	Conductivité thermique	[W/m.K]
t	Temps	[s]
Q	Densité de flux de chaleur	[W/m ²]
ρ	Densité du matériau	[kg/m ³]
P	Puissance	[W]

f_l	Fraction liquide	
s	surface	$[m^2]$
p	Pression	$[Pa]$
h	Coefficient de convection	$[W/m^2.K]$
μ	Viscosité dynamique	$[kg/m.s]$
β	Coefficient de dilatation thermique	$[K^{-1}]$
p	Pression	$[N/m^2]$
S_m	Terme source de l'équation demouvement	$[N/m^3]$
S_e	Terme source de l'équationd'énergie	$[J/m^3.s]$
S_T		
v	Vitesse du fluide	$[m/s]$
u	Vitesse du fluide	$[m/s]$
μ	Viscosité dynamique	$[kg/m.s]$
ε	constante de calcul	

Abréviations

MCP	Matériaux à Changement de Phase
PCM	Phase Change Material
TES	Thermal Energy Storage
SHTES	Sensible Heat Thermal Energy Storage
LHS	Latent Heat Storage
LHTES	Latent Heat Thermal Energy Storage
HTF	Heat Transfer Fluid
SHS	Sensible Heat Storage

Liste des figures

Fig.I.1 Représentation de la cavité inclinée	9
Fig.I.2 Contour des lignes de courant et des isothermes dans la zone de fusion pour un chauffage par le bas ($Ra = 2,844 \times 10^4$)	10
Fig.I.3 Contour des lignes de courant et des isothermes dans la zone de fusion pour un chauffage par le bas ($Ra = 2,844 \times 10^5$)	11
Fig.I.4 Contour de la fraction liquide	13
Fig.I.5 Géométrie étudié	16
Fig.I.6 Effet du nombre des ailettes dans le processus de fusion	16
Fig.I.7. Fraction liquide pou différents configuration	17
Fig.II.1 Nomenclature des changements d'état	21
Fig.II.2 Transformation représentée dans le diagramme des phases	21
Fig.II.3 Principe de fonctionnement des MCP	22
Fig.II.4 classification des MCP	23
Fig.II.5 Structure chimique de la paraffine	24
Fig II.6 Paraffine brutes, en capsulées, en poudre ou en granulées.	25
Fig.II.7 MCP Classe SP.	26
Fig.II.8 MCP Classe RT.	27
Fig.II.9 différents types de Mcp et conductivité thermique	27

Fig.III.1 : Cavité utilisée	36
Fig.III.2 résistance placé du côté droit de la cavité	37
Fig.III.3 Dimensions du modèle physique étudié	38
Fig.III.4 Conditions aux limites	42
Figure III. 1. Evolution de la température de la paroi inférieure	43
Fig.III.6 Géométrie et maillage de la cavité	44
Fig. III.7 Interface de Fluent avec les paramètres du solveur utilisé	45
Fig. III.8 Interface de Fluent pour le coeficient de Darcy	46
Fig.III.2 Température initiale proposée	47
Fig.III.10 Facteurs de sous relaxation	47
Figure IV. 2. Contours des fractions liquides en fonction du temps	50
pour des différents maillages	51
Figure IV. 3. Evolution de la fraction liquide pour les trois maillages	53
Figure IV. 3. Evolution de la fraction liquide pour un maillage 84100 cellules, pas du temps $dt=0.06$ et coef de Darcy $c=10^5$	54
Figure IV. 4. Evolution de la fraction liquide	56
Figure IV.5. Evolution des isothermes pour un maillage 84100 cellules, pas du temps $dt=0.06$ et coef de Darcy $c=10^5$	58

Liste des tableaux

Tableau II.1. propriété thermo-physique des principaux sels hydratés	31
Tableau III.1: Propriétés thermo-physiques de la paraffine utilisée	38

Introduction générale

L'étude de la cinétique des transferts thermiques lors du changement de phase solide-liquide suscite beaucoup d'intérêt dans divers domaines scientifiques et secteurs technologiques. Ces matériaux ont un grand potentiel d'intégration avec différents systèmes thermiques tels que les capteurs solaires thermiques, les cellules solaires, la climatisation des bâtiments et le refroidissement des pièces électroniques.

Dans cet objectif, de nombreuses études et recherches oeuvrent avec la perspective de développer et d'évaluer de nouveaux systèmes par la modélisation et la simulation numérique, plutôt que par des expérimentations ; permettant ainsi un gain de temps et de moyens.

Depuis le travail précurseur de Stefan en 1891 sur l'épaisseur de la couche polaire, les problèmes de transfert de chaleur avec changement de phase solide-liquide portent le nom de problème de Stefan ou 'moving boundary problem'. Ces problèmes ont une importance considérable dans de nombreuses applications techniques et processus naturels : on peut citer l'évolution des banquises, la congélation des aliments, la bio-cryogénie, le moulage, la coulée continue, la croissance cristalline, la sécurité des réacteurs nucléaires, le contrôle thermique des engins spatiaux, le stockage thermique, etc.

Le déplacement de l'interface solide-liquide dépend du taux de transfert de chaleur au sein des phases solide et liquide. En retour, ce taux est dépendant de la position et du déplacement de l'interface. La solution analytique de ce problème n'existe que dans quelques cas particuliers. Pour des applications pratiques, on a généralement recours à des méthodes numériques. Jusqu'à un passé assez récent, la conduction pure a été considérée comme étant le seul mode de transfert de chaleur dans les

problèmes de fusion. Ultérieurement, des études expérimentales ont montré que le transfert de chaleur dans la phase liquide est contrôlé par la conduction au début du processus de la fusion, suivie par une courte période de transition. Puis, comme le volume fondu augmente, le transfert de chaleur par convection naturelle devient prédominant sur la conduction dans le liquide jusqu'à la fin du processus de la fusion. Dans ce contexte.

La fusion d'un MCP est étudiée numériquement en deux dimensions en utilisant la méthode des volumes finis basée sur une formulation enthalpique. Les résultats expérimentaux viennent conforter cette démarche.

Pour atteindre l'objectif fixé dans cette étude, qui est l'étude numérique du comportement complexe de la fusion de la paraffine dans une cavité chauffée par le côté, on a subdivisé le travail en quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique portant sur les publications réalisées sur la fusion des matériaux à changement de phase.

Dans le second chapitre, on a fait une étude sur les différents matériaux à changement de phase, leurs applications et les lois les plus utilisées.

Le troisième chapitre montre le modèle physique, mathématique et numérique du problème étudié.

Le chapitre 4 est consacré à la simulation numérique, la discussion et l'interprétation des résultats, plus une comparaison avec les résultats expérimentaux.

Enfin cette étude est achevée par une conclusion générale regroupant les résultats les plus marquants de ce travail.

Chapitre I

Recherche bibliographique

I-1 Introduction :

A cause de ses applications (fours, capteurs solaires, fenêtres à double paroi, réservoirs d'eau chaude, refroidissement des circuits, croissance de cristaux, contrôle des incendies, industrie métallurgique, ...), il existe une quantité impressionnante de publications scientifiques portant sur l'étude de la convection naturelle dans des enceintes.

Les premiers résultats expérimentaux obtenus à la fin des années 70 sur la fusion dans des enceintes rectangulaires chauffées par une paroi verticale isotherme [1, 2, 3] ont vite démontré que les effets de la convection naturelle dans le MCP liquide dominaient le processus de fusion. Ces études ont par la suite été confirmées et complétées par des travaux numériques [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10] et analytiques [11] au cours des années 80.

Les travaux menés sur la fusion dans des enceintes rectangulaires chauffées uniformément ou discrètement sont alors examinés. Finalement les grandes conclusions de cette recherche bibliographique sont tirées.

I-2 Synthèse bibliographique :

I-2.1 Convection naturelle dans des enceintes rectangulaires :

Un travail de synthèse a été mené par Bejan en 1980 [12] sur l'effet du rapport de forme de l'enceinte sur le transfert thermique dans le cas où les parois horizontales sont isolées et les parois verticales, isothermes ; afin d'unifier les résultats expérimentaux, les quelques simulations numériques disponibles à l'époque et surtout les études analytiques.

Plusieurs résultats numériques viennent par la suite confirmer l'existence d'un rapport de forme optimal dépendant du nombre de Rayleigh [13, 14, 15], ainsi le problème de convection naturelle dans une enceinte carrée est devenu un point de référence afin de comparer les performances des modèles numériques. A

cet égard, l'exercice mené par De Vahl Davis, G et Jones. [16] est abondamment cité afin de valider les codes numériques.

I-2.2 Convection naturelle dans des enceintes munies de sources de chaleur discrètes :

Ho et coll[17] ont examiné numériquement l'effet du rapport de forme ($1 \leq A \leq 10$) sur le transfert de chaleur dans une enceinte munie de 4 sources équidistantes à flux de chaleur uniforme. Leurs résultats montrent que l'augmentation du rapport de forme conduit à une diminution substantielle du transfert de chaleur, ce qui augmente la température des sources de chaleur. Cependant, ils ont remarqué que l'effet diminue lorsque le nombre de Rayleigh augmente.

I-2.3 Fusion dans des enceintes rectangulaires avec convection naturelle

Ho et coll[18] démontrent l'intérêt d'utiliser une paroi de conductivité élevée dans le cas d'une fusion à partir d'un flux de chaleur.

Marušić et al. [19] ont fait trois expériences différentes sur la fusion du nitrate de sodium dans une cavité rectangulaire chauffée par les gauches et refroidie par le côté droit, les autres parois sont adiabatiques. Dans les deux expériences (E1, E2), la cavité était horizontale et dans la troisième expérience (E3), la cavité était inclinée de $5,71^\circ$ dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

Les résultats obtenus sont utilisés pour la validation du modèle numérique. Les conclusions suivantes sont tirées. La valeur de la constante C de la zone pâteuse joue un rôle important dans les simulations. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec des valeurs importantes de 10^9 , beaucoup plus grandes que la plupart des valeurs que l'on trouve dans la littérature.

Korti et al [20] ont démontré qu'une cavité chauffée par le bas accélère le temps global de la fusion de 3h 25 min par rapport à une cavité inclinée à 45° et une

cavité chauffée par le côté. Les deux phénomènes réagissent mutuellement et le nombre de cellules diminue de onze à six rouleaux.

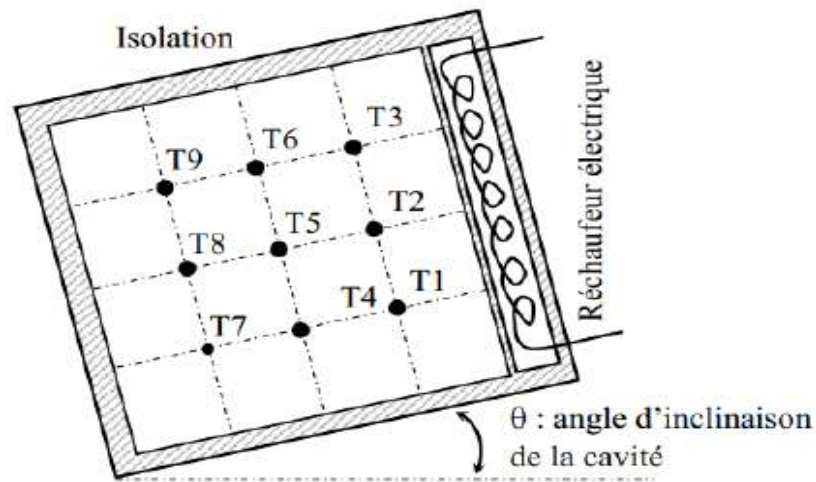


Fig.I.1. Représentation de la cavité inclinée

I-2.4 Fusion dans des enceintes munies de sources de chaleur discrète :

Zhang et chen. [21, 22, 23] ont réalisé quelques expériences de fusion dans une enceinte rectangulaire chauffée par trois sources discrètes de puissance et de position fixes incrustées dans une paroi de Plexiglas verticale [24]. Cette étude démontre que la température des composants électroniques peut être diminuée en faisant fondre un MCP plutôt qu'en les refroidissant par convection naturelle.

Gong et al. [25] ont fait une simulation d'un modèle numérique qui comporte la fusion d'un MCP dans une cavité rectangulaire chauffée par le bas. Le haut et les deux parois verticales sont supposés être adiabatiques. Cette simulation montre que :

- le nombre réel de Rayleigh pour la fusion par le bas varie avec le processus de fusion plus la hauteur de fusion est faible, plus le nombre de Rayleigh est faible. Sous un petit nombre de Rayleigh les effets de convection libre sont petits.

Chapter I : Synthèse bibliographique

- Le nombre de cellules de convection est indépendant du temps.
- Une comparaison des images de rationalisation à différents chiffres de Rayleigh montre que les flux sont complètement différents selon les valeurs de Rayleigh.

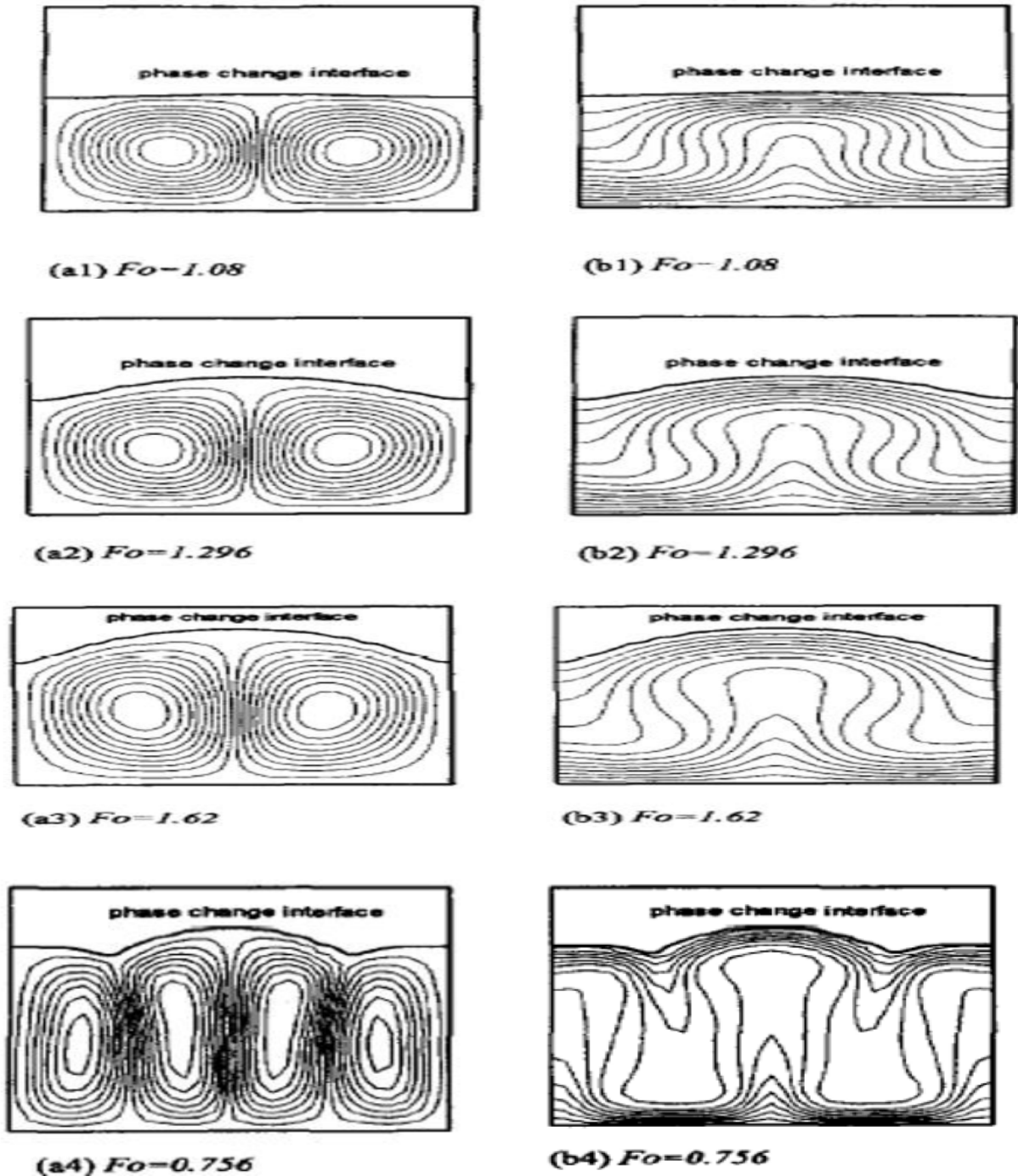


Fig.I.2 Contour des lignes de courant et des isothermes dans la zone de fusion pour un chauffage par le bas ($Ra = 2,844 \times 10^4$)

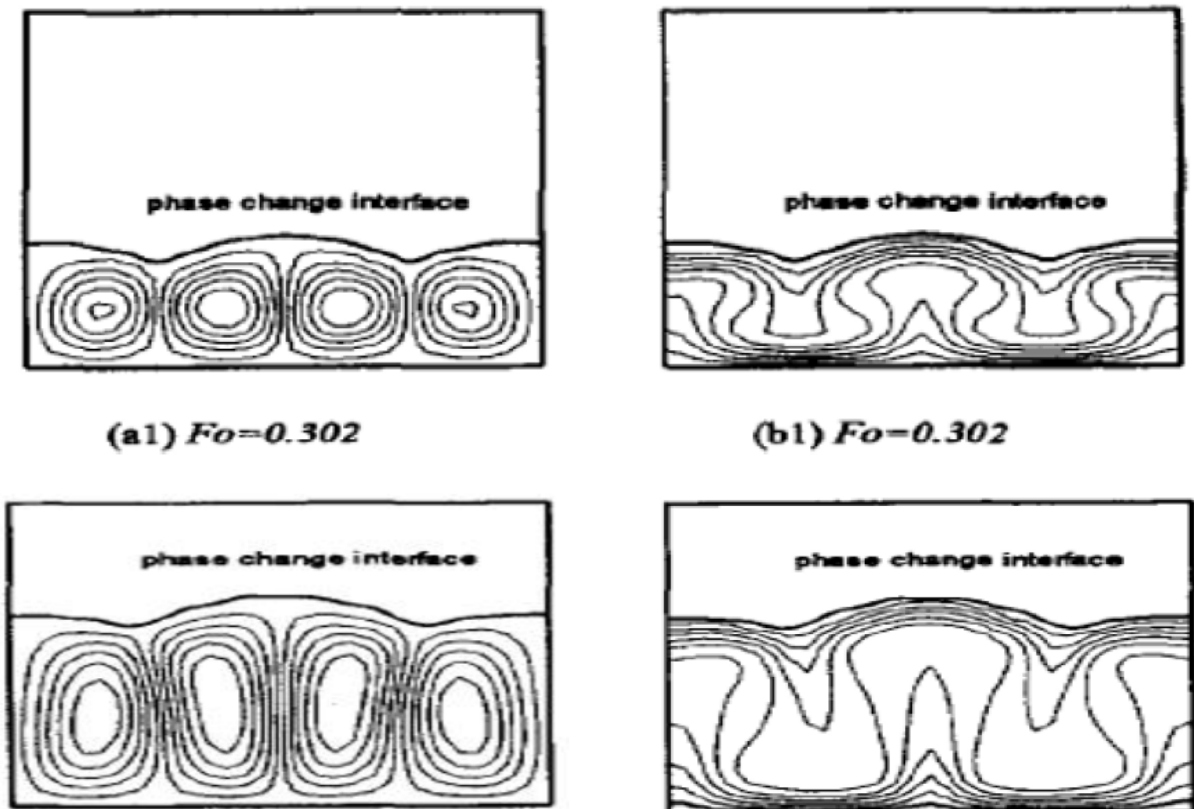


Fig.I.3 Contour des lignes de courant et des isothermes dans la zone de fusion pour un chauffage par le bas ($Ra = 2,844 \times 10^5$)

M.GHalambaz et al. [26] ont présenté une étude sur les effets des nanoparticules hybrides sur le processus de fusion d'un matériau à changement de phase nano-amélioré (NEPCM) à l'intérieur d'une enceinte. Le côté inférieur de la cavité est isotherme à une température chaude, tandis que la paroi supérieure est isotherme à une température froide et que les parois gauche et droite sont isolées. Les deux chercheurs ont constaté que l'augmentation des valeurs de la fraction volumique des nanoparticules, des paramètres de viscosité et de conductivité entraîne des variations importantes de l'interface solide-liquide pour des valeurs importantes de l'indice de Fourier.

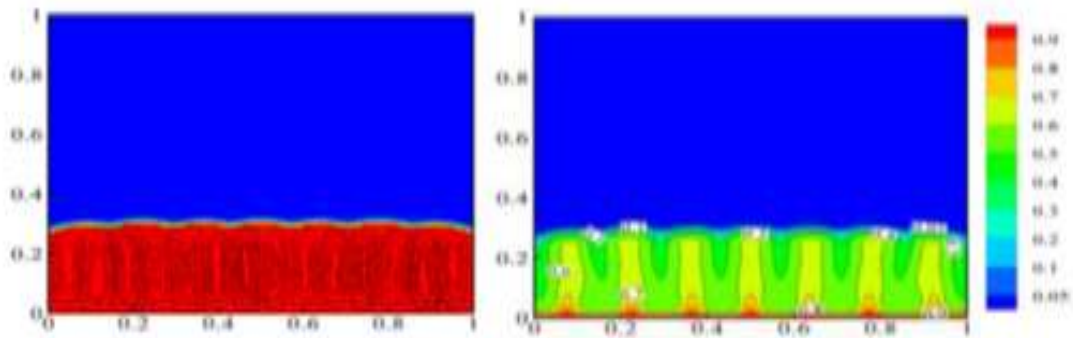
De plus, l'augmentation du paramètre de conductivité et la diminution du paramètre de viscosité peuvent entraîner une augmentation de la fraction liquide.

Chapter I : Synthèse bibliographique

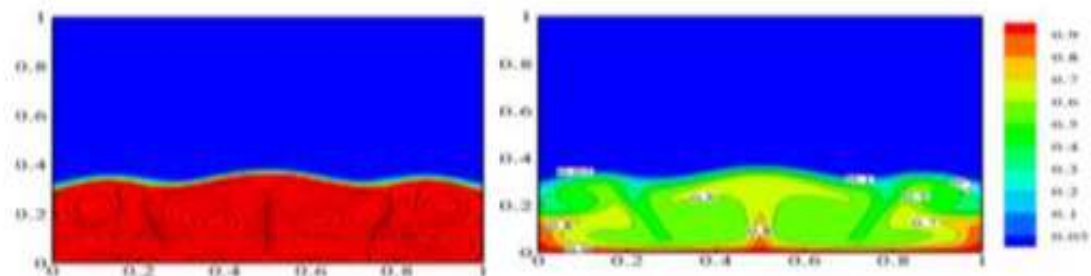
Conformément aux résultats de la présente étude, l'utilisation de nanoparticules ayant un paramètre de conductivité thermique élevé N_c et un paramètre de viscosité dynamique faible N_v , améliore finalement le taux de transfert de chaleur du stockage thermique

Lignes de courant

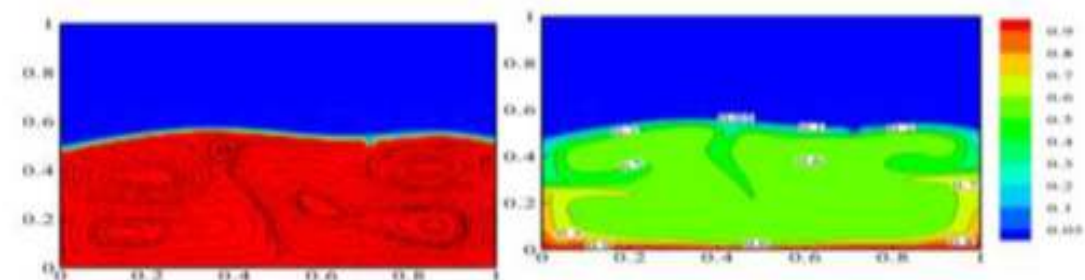
Isothermes



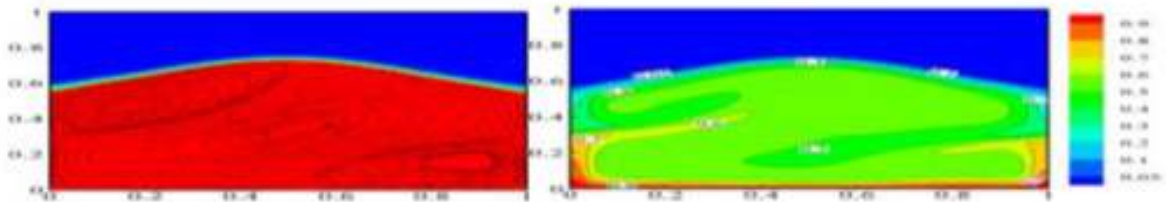
(a-1): $\phi=0\%$, $N_c=16$, $N_v=0$



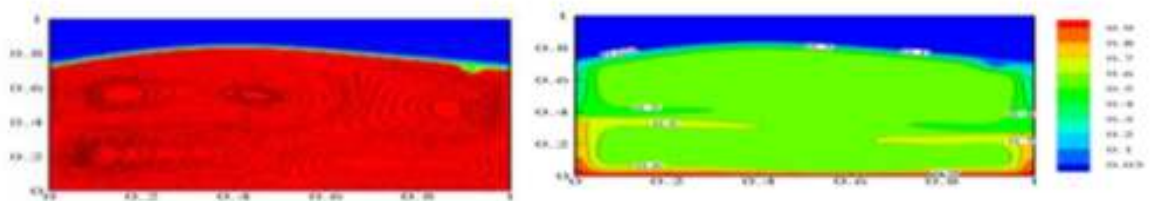
(a-2): $\phi = 5\%$, $N_c = 16$, $N_v = 4$



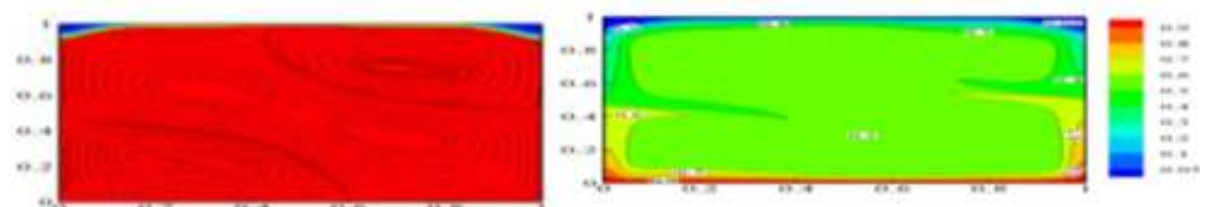
(b-1): $\phi=0\%$, $Nv=0$



(b - 2): $\phi = 5\%$, $Nc = 16$, $Nv = 4$



(c-1): $\phi=0\%$, $Nv=0$



(c - 2): $\phi = 5\%$, $Nc = 16$, $Nv = 4$

Fig.I.4 Contour de la fraction liquide

Kamkari et al. [27] ont fait la simulation de la fusion de l'acide laurique dans une enceinte rectangulaire d'une largeur de $W=5$ cm et une hauteur de $L=12$ cm remplie d'acide laurique sous forme de MCP. La paroi droite de la cavité est réglée à une température constante (T_w) et les autres parois sont adiabatiques. Une simulation numérique a été menée et les résultats ont été comparés aux

Chapter I : Synthèse bibliographique

données expérimentales. Les simulations ont été effectuées pour des enceintes avec des angles d'inclinaison de 90° , 45° et 0° à trois différents nombre de Stephan modifiés de 0,36, 0,43 et 0,55. Les remarques finales tirées des résultats obtenus sont comme suit :

- Dans la cavité verticale ($\theta = 90^\circ$), les simulations numériques bidimensionnelles peuvent prédire avec précision les fractions liquides et la forme des interfaces.
- Dans les cavités inclinées ($\theta = 45^\circ$ et $0^\circ = 0$), la simulation prédit raisonnablement les fractions liquides avec un écart maximum inférieur à 6,5 %.
- Les formes des interfaces capturées en simulation montrent quelques divergences par rapport à l'expérimentale en raison de la formation de structures d'écoulement tridimensionnelles dans le MCP liquide.
- Quel que soit le nombre de Stephan, les réductions du temps de fusion pour les enceintes inclinées à 0° et 45° sont respectivement d'environ 52 % et 37% par rapport à l'enceinte verticale.

Yadava et al. [29] ont fait une recherche expérimentale et numérique de la fusion de MCP dans une cavité rectangulaire de $200\text{mm} \times 160\text{mm} \times 20\text{mm}$. Un système d'accumulation d'énergie thermique est analysé. L'expérimentation, ainsi que la simulation numérique sont analysées pour quatre valeurs différentes de flux de chaleur fourni à la cire de paraffine enfermée dans une enceinte rectangulaire.

Les résultats de la simulation sont validés par rapport aux résultats expérimentaux. L'échauffement de la paroi conduit la fusion du MCP à partir du haut de la cavité et progresse ensuite vers le bas.

Chapter I : Synthèse bibliographique

Deux modes de transfert de chaleur (la conduction et la convection naturelle) ont été observés, dans le processus de fusion. La conduction prédomine sur la convection dans les premiers stades et vice versa. Au fur et à mesure que le temps passe, le volume de la fraction de fusion et la longueur de l'interface de fusion augmente et la fusion est dominée par la convection naturelle de plus en plus.

Ce qui réduit le taux de transfert de chaleur, qui à son tour diminue le taux de fusion dans les dernières étapes du processus de fusion. C'est pourquoi 29, 25, 17 et 16 % de la cire de paraffine reste aussi solide même après 330 minutes de fusion à un échauffement de 1500, 1930, 2500 et 3100 W/m² respectivement.

B. Binet [17] a étudié 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 source de chaleur sur le phénomène de fusion sont examinés.

Birli Fekadu et Mebratu Assaye [18] ont étudié l'amélioration des performances de fusion des matériaux à changement de phase dans une enceinte rectangulaire avec différents angles d'inclinaison d'ailettes.

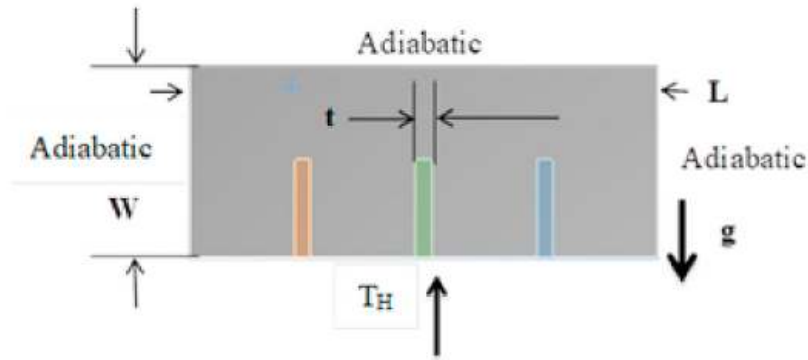


Fig.I.5 Géométrie étudié

L' étude démontre que le temps de fusion d'un nombre optimisé d'ailettes qui est de deux est réduit de 43% par rapport à une enceinte rectangulaire horizontale sans ailettes.

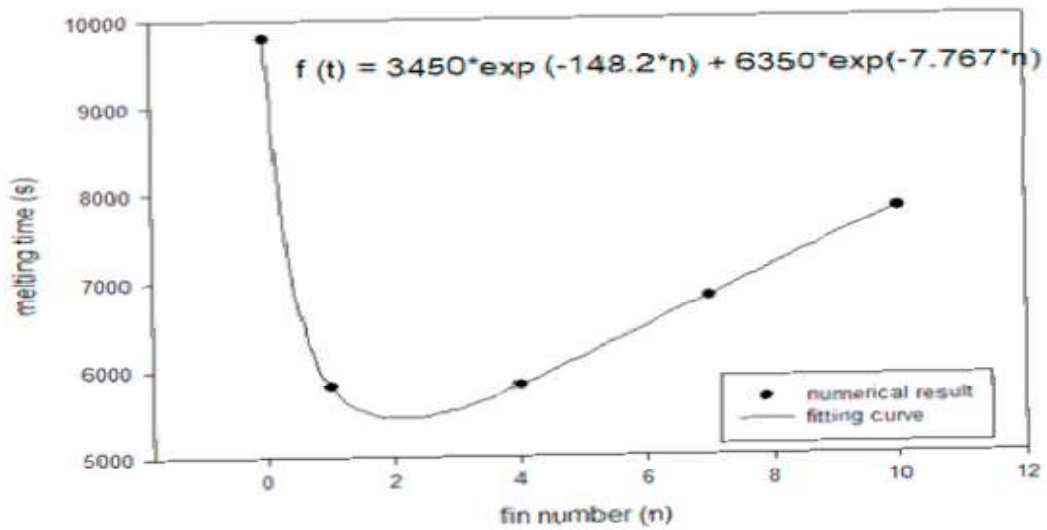


Fig.I.6 Effet du nombre des ailettes dans le processus de fusion

Chapter I : Synthèse bibliographique

Les ailettes inclinées à 45° peuvent réduire le temps de fusion du PCM dans une enceinte rectangulaire à un taux élevé.

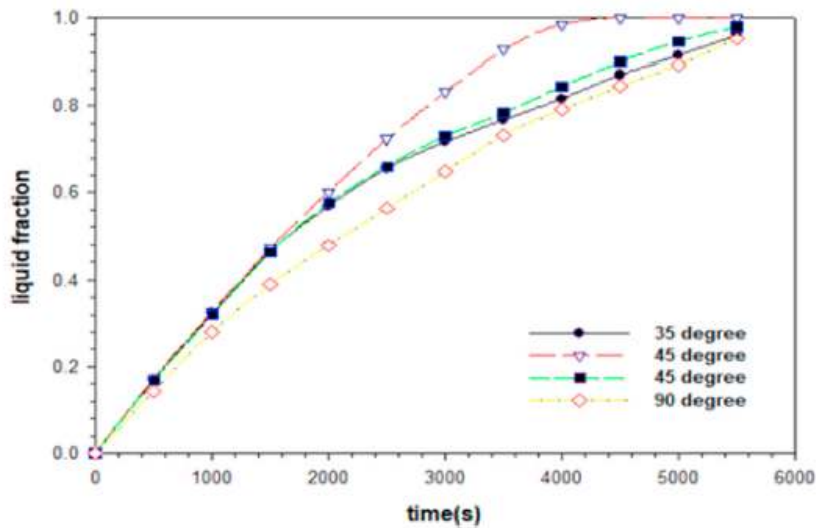


Fig.I.6 comparaison entre les angles de l'inclinaison

Lin. Li et Tiana.b.[19] ont analysé numériquement l'influence des caractéristiques et des mécanismes du matériau des nageoires sur la fusion du PCM dans une enceinte rectangulaire. Six indicateurs, y compris le nombre de Nusselt moyenné en surface, la fonte, le temps, l'énergie totale stockée et la puissance moyenne, qui étaient couramment utilisés, l'énergie stockée par masse et le coût par énergie stockée qui ont été proposés dans cette étude, ont été évalués.

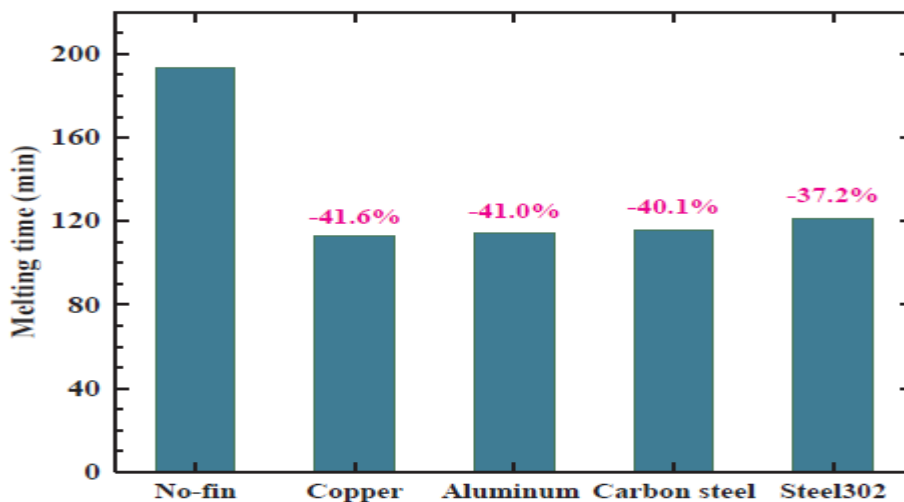


Fig.I.7. Fraction liquide pour différents configuration

Chapter I : Synthèse bibliographique

Les conclusions suivantes ont été tirées :

1. Le Nu diminue avec la fusion pour tous les schémas ; contrairement au schéma sans ailettes. Diviser le processus de fusion en quatre étapes est plus raisonnable pour le schéma des nageoires.

Plus la conductivité thermique est élevée, plus la transition pour chaque étape se produit tôt.

2. L'amélioration de la fusion dépend des matériaux des ailettes.

3. L'insertion d'ailettes augmente significativement la puissance moyenne, l'influence de la conductivité thermique est beaucoup plus grande que le produit de la densité et la capacité thermique massique pour la puissance moyenne.

4. L'énergie massique emmagasinée diminue notamment en ajoutant des ailettes.

5. La sélection du matériau de la nageoire dépend de l'évaluation employée indicateurs extrêmement.

6. il est préférable d'utiliser un matériau avec une capacité thermique spécifique élevée, une conductivité thermique plus élevée, une faible densité et un faible coût d'ailerons.

Chapitre II

**Etude des matériaux
à changement de phase**

II. 1 Introduction

II-1.1 Les matériaux à changement de phase

Les matériaux à changement de phase sont des matériaux thermiques de stockage par chaleur latente. À la différence des matériaux conventionnels de stockage par chaleur sensible, quand les MCP atteignent leur point de fusion, ils absorbent de la chaleur sans s'échauffer. Quand la température du milieu ambiant baisse, ces matériaux se solidifient, libérant ainsi la chaleur latente stockée.

Le stockage de la chaleur dans le changement de phase a l'avantage de la compacité, puisque la chaleur latente de la plupart de ces matériaux est grande comparée à leur capacité de chaleur sensible au-dessus d'une température de l'ordre de 20 degrés.

II-1.2 Le changement de phase d'un point de vue énergétique

a) Changement de phase d'un corps pur idéal

Une phase d'un corps pur est définie comme une zone dans l'espace des paramètres thermodynamiques (T, P, V) d'un système composé uniquement d'un corps pur, dans lequel l'énergie libre est une fonction analytique. Pour un volume V d'un corps pur, le diagramme des phases représente l'espace occupé par chacune des phases dans le plan d'abscisse la température et d'ordonnée la Pression.

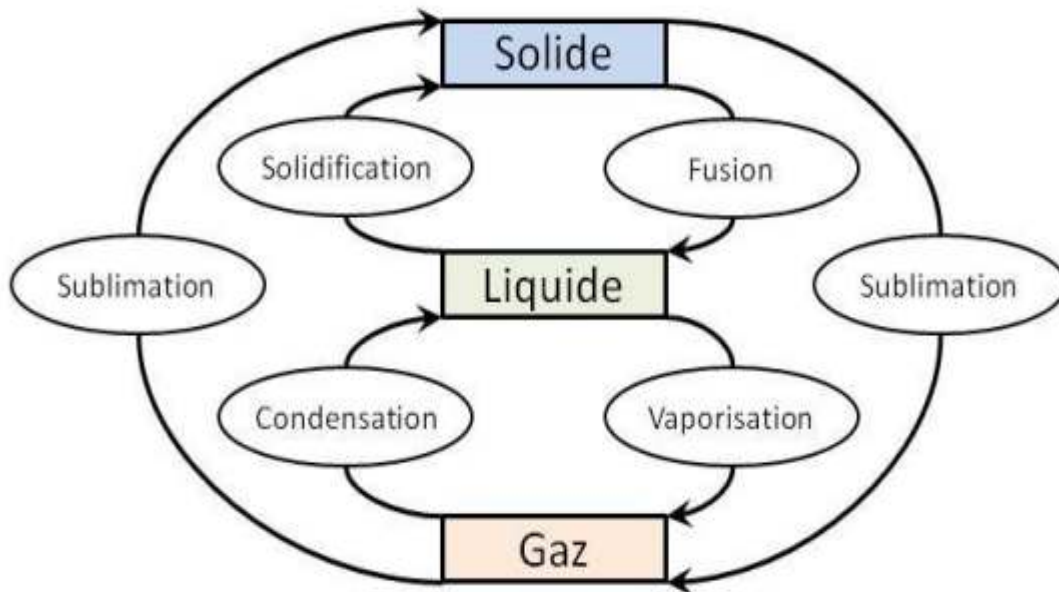


Fig.II.1 Nomenclature des changements d'état

La pression peut être considérée comme constante durant le processus de transformation pour les mises en œuvre de matériaux qui nous intéressent. Il s'agit soit de la pression atmosphérique soit de la pression dans le système pour les cas d'intégration de MCP dans des systèmes actifs.

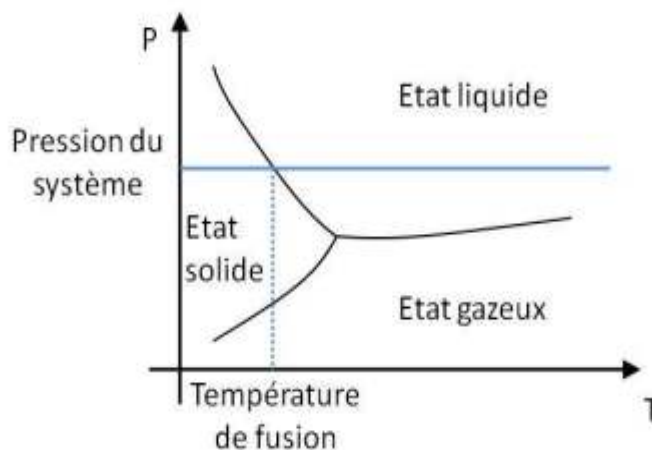


Fig.II.2 Transformation représentée dans le diagramme des phases

Chapter II : Etude des matériaux à changement de phase

La Fig.II.2 représente un changement d'état à une pression donnée pour un passage de l'état solide à l'état liquide repéré sur le diagramme des phases. L'évolution de la température du système se traduit par un déplacement sur la ligne bleue horizontale. Cette ligne coupe la frontière liquide / solide donc lorsque la température du système atteint ce point sur la frontière, il y a changement de phase et la température est appelée température de fusion.

Le passage de l'état thermodynamique initial stable à l'état thermodynamique final stable se fait en trois étapes.

II-2 Principe de fonctionnement des MCP :

La chaleur latente des matériaux à changement de phase est destinée à contrôler la température dans une plage déterminée. Quand la température dépasse certains points, les liaisons chimiques dans le matériau commencent à se rompre et le matériau absorbe la chaleur dans un processus endothermique où il passe de l'état solide à l'état liquide. Lorsque la température baisse, le matériau libère de l'énergie et retourne à l'état solide.

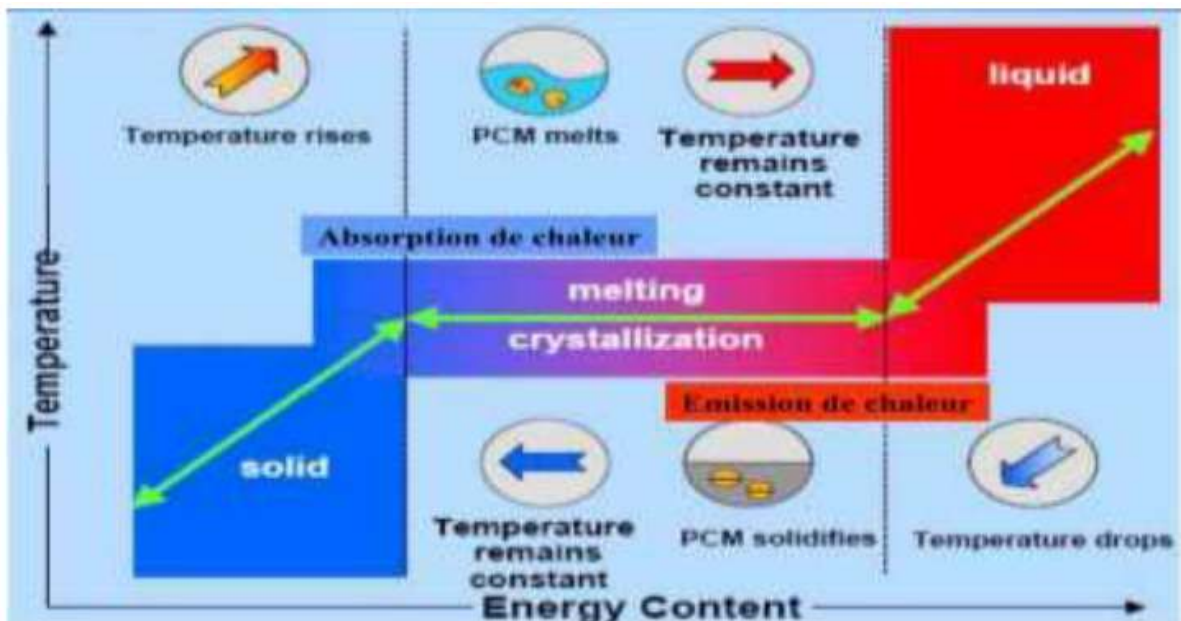


Fig.II.3 Principe de fonctionnement des MCP

II-3 Classification des matériaux à changement de phase

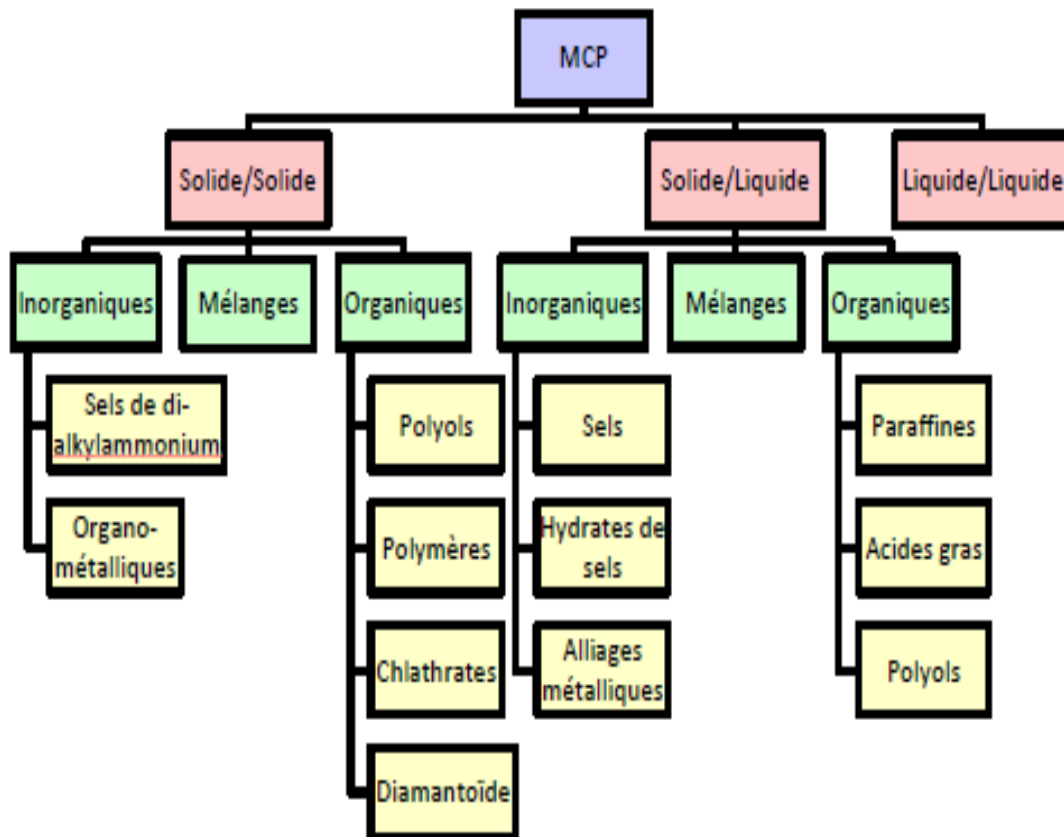


Fig.II.4classification des MCP

On peut classer les MCP couramment utilisés selon trois catégories :

Les composés organiques, inorganiques et eutectiques.

II-3-1 MCP organiques

Constitués en grande partie par les paraffines et les acides gras. Leur avantage majeur est leur chaleur latente relativement élevée, entre 50 à 300 J/g. Cependant, plusieurs inconvénients majeurs ont freiné leurs applications. Parmi ces inconvénients on peut citer :

- l'inflammabilité
- Une faible conductivité thermique

–Une température de travail inférieure à 150°C.

L'application principale est le stockage de la chaleur et du froid dans les bâtiments.

II-3-2 Paraffines

Les paraffines sont constituées de matériaux organiques, composés de mélanges d'hydrocarbures saturés lesquels sont également des alcanes obtenues à partir du pétrole brut [20], soit fabriquées par synthèse selon le procédé Fischer-Tropsch. Après raffinement, elles sont inodores, non dangereuses et sans goût. Ces hydrocarbures saturés présentent des molécules à chaîne droite (hydrocarbures n-paraffiniques) ou à plusieurs branches (hydrocarbures iso-paraffiniques). Pour le stockage thermique, les n-paraffines sont les plus fréquemment utilisées du fait de leur plus grande capacité de stockage. Parmi les paraffines présentant un intérêt pour le stockage thermique, on trouve celles qui se présentent sous forme solide à température normale et que l'on appelle cires de paraffine.

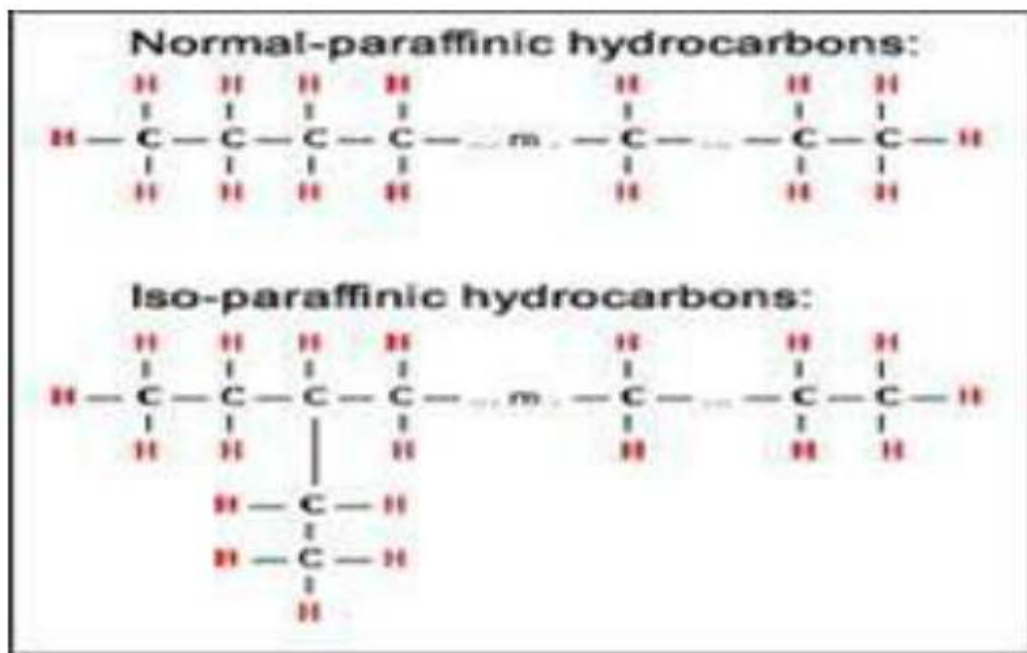


Fig.II.5 Structure chimique de la paraffine



FigII.6 Paraffine brutes, en capsulées, en poudre ou en granulées.

Les paraffines sont disponibles dans une large plage de températures, ce qui les rend attrayants pour plusieurs applications thermiques.

II.4 Classement des MCP :

Il existe différentes classes de MCP, dont les plus utilisés :

II.4.1 MCP classe SP :

Le mélange de chaleur latente SP a donné naissance à une nouvelle classe innovante de MCP non inflammables. La SP est constituée d'une combinaison unique d'hydrates de sel et de composés organiques qui permet de stabiliser véritablement le cycle sans détérioration dans le temps [21].



Fig.II.7MCP Classe SP.

II.4.2 MCP classe RT :

Un stockage d'énergie thermique avec un matériau RT consiste à assimiler une grande quantité de chaleur, nommée chaleur latente, avec une température assez constante. Quand ce processus de changement de phase est inversé, le stockage de la chaleur latente est libéré. Le procédé RT est accessible dans une vaste plage de températures de fonctionnement allant de -10°C jusqu'à environ 82°C [22].



Fig.II.8MCP Classe RT.

Les paraffines sont disponibles dans une large plage de températures comme le montre la figure 1.2 ; ce qui les rend attractifs pour plusieurs applications thermiques.

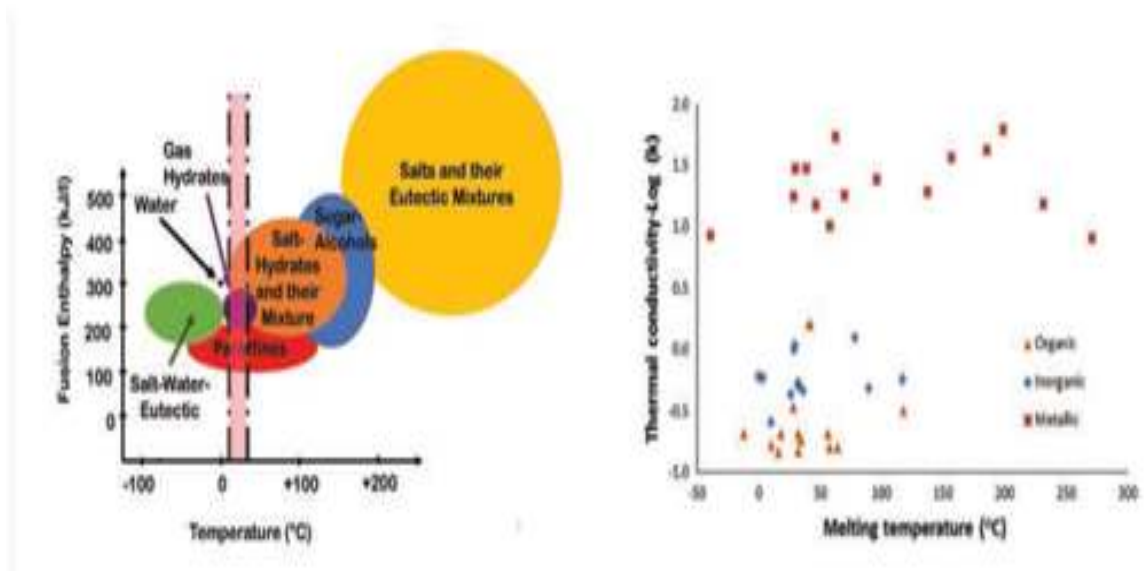


Fig.II.9différents types de Mcpet conductivité thermique

Chapter II : Etude des matériaux à changement de phase

Ils ont une enthalpie de fusion qui varie entre 180 et 230 kJ/kg. Cette valeur est grande par rapport à celle des autres matériaux organiques dont la capacité thermique massique est de 2,1 kJ/kgK. En tenant compte des deux valeurs (chaleur sensible et chaleur latente), on obtient une densité importante d'énergie de stockage. La capacité volumique de stockage de chaleur est 4-5 fois supérieure à celle de l'eau.

La surfusion est négligeable. La pression de vapeur de fusion est faible même à des températures relativement hautes. Elles sont stables chimiquement mais il faut les protéger de l'air pour éviter l'oxydation. En particulier quand elles sont chaudes, leur dégradation est similaire à celle des acides organiques. Il n'y a pas de ségrégation de phase. Elles présentent également un coût raisonnable ; une fiabilité ; un comportement prévisible et une faible conductivité thermique (0.18-0.25W /mk) qui peut être compensée par une grande surface d'échange ou par un conditionnement adapté. Elles sont non corrosives et chimiquement inertes avec presque tous les matériaux ; sauf avec le cuivre et certains plastiques. En effet, les cires paraffiniques sont utilisées pour protéger les matériaux de la corrosion (vernis de protection dans l'industrie automobile).

Elles ne présentent aucun danger écologique. Elles sont non – toxiques et 100% recyclables.

Les cires paraffiniques sont facilement inflammables.

Dans certains cas, elles ne sont pas compatibles avec les contenants en plastique.

II-4.3 Composés organiques non-paraffiniques

Il s'agit de la plus importante catégorie de matériaux aptes pour le stockage de la chaleur latente. Ces matériaux sont les MCP les plus nombreux ; avec des propriétés très variées. Chacun de ces matériaux possède ses propres propriétés, contrairement aux paraffines, qui ont des propriétés très similaires. Ces matériaux

Chapter II : Etude des matériaux à changement de phase

sont inflammables et ne devraient donc pas être exposés aux trop hautes températures, aux flammes ou aux agents oxydants.

Les matières organiques non-paraffiniques sont divisées en deux groupes : les acides gras et les autres matières organiques.

La formule chimique générale des acides gras est $\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_{2n} \text{COOH}$ et ils ont relativement une haute enthalpie de changement de phase . Les acides gras ont une haute stabilité thermique et ne subissent pas le phénomène de sous-refroidissement. Ils sont plus chers que les paraffines et sont corrosifs .

Certaines des caractéristiques de ces matériaux organiques sont les suivantes :

- forte chaleur de fusion,
- inflammabilité,
- faible conductivité thermique,
- faible point d'éclair,
- niveau variable de toxicité,
- instabilité à haute température.

II-4-4 Composés inorganiques :

La température de fusion des matériaux ou substances inorganiques est de -100°C à $+1000^\circ\text{C}$. Les plus couramment utilisées sont : l'eau, les solutions salines aqueuses, les sels hydratés, les mélanges de sels, les mélanges de métaux. Ils possèdent plusieurs avantages : ils ont une chaleur latente élevée et une grande conductivité thermique. Ils ont un point de fusion net. Ils sont ininflammables et leur coût d'investissement est raisonnable. Généralement, ils sont aisément disponibles. Les principaux inconvénients de leur utilisation sont liés à la ségrégation, à la corrosion et à la surfusion, ce qui nécessite l'utilisation d'agents de nucléation pour être efficace [14]

II-4.5 Composés eutectiques

Ce sont des substances composées de plusieurs MCP purs. En général, ce sont des Mélanges de MCP organiques et inorganiques. Ils ont deux principaux avantages un point de fusion net et des chaleurs latentes volumétriques légèrement supérieures à celle des composés organiques purs .On a peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux et ils sont peu utilisés au niveau des systèmes industriels.

Avantages Ils présentent les avantages suivants :

- Leur changement de phase se fait sur une plage de température restreinte comparable à celle des corps purs.
- Leur chaleur latente est supérieure à celle des composés purs. - Ils ne présentent pas de ségrégation de phase contrairement aux hydrates de sels. De par leur chaleur latente élevée et leur faible coût, les fluorures et les chlorures ont été envisagés dans des compositions eutectiques. Les compositions de sels à base de nitrates, carbonates et hydroxydes sont également d'un intérêt considérable

Inconvénients L'inconvénient majeur de ce type de mélange est de réussir à déterminer le point eutectique exact afin d'avoir une température de fusion unique, comme pour un corps pur.

II.4.6. Sels hydratés

On peut les considérer comme des alliages de sels minéraux et d'eau formant un solide cristallin typique de formule générale AB_nH_2O . Ils ont une plage de températures de fusion comprise entre 5°C et 130°C D'autres mélanges de sels, des mélanges de métaux ont une température de fusion supérieure à 150°C..

Les plus importantes propriétés des hydrates de sels sont les suivantes :

- température de fusion élevée ;
- haute enthalpie de fusion ;

Chapter II : Etude des matériaux à changement de phase

- conductivité thermique élevée, une compatibilité

Avec les conteneurs en plastiques, ils sont non-inflammables. Ainsi, ils possèdent une grande densité de stockage latent. Cependant, le majeur problème limitant leur utilisation manifesté par le phénomène de décomposition (ségrégation des phases) qui accompagne la fusion de ces sels.

Ce phénomène est dû à la grande différence entre les densités des deux phases solide et liquide du même sel. Les sels hydratés présentent aussi un problème de corrosion et un degré de sous-refroidissement assez élevé [25].

En dépit de ces propriétés, les hydrates de sels ont certains inconvénients importants tels que la fusion accompagnée de la séparation de phase, le sous-refroidissement et d'être corrosifs.

Les caractéristiques thermo-physiques des principaux sels hydratés sont récapitulées sur le **tableau II.1**

tableau II.1 : Propriétés thermo-physiques des principaux sels hydratés [19]

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

a) Composés organiques non-paraffiniques

Il s'agit de la plus importante catégorie de matériaux aptes pour le stockage de la chaleur latente. Ces matériaux sont les MCP les plus nombreux ; avec des propriétés très variées. Chacun de ces matériaux possède ses propres propriétés, contrairement aux paraffines, qui ont des propriétés très similaires. Ces matériaux

Chapter II : Etude des matériaux à changement de phase

sont inflammables et ne devraient donc pas être exposés aux trop hautes températures, aux flammes ou aux agents oxydants.

Les matières organiques non-paraffiniques sont divisées en deux groupes : les acides gras et les autres matières organiques.

La formule chimique générale des acides gras est $\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_{2n} \text{COOH}$ et ils ont relativement une haute enthalpie de changement de phase. Les acides gras ont une haute stabilité thermique et ne subissent pas le phénomène de sous-refroidissement. Ils sont plus chers que les paraffines et sont corrosifs.

Certaines des caractéristiques de ces matériaux organiques sont les suivantes :

- forte chaleur de fusion,
- inflammabilité,
- faible conductivité thermique,
- faible point d'éclair,
- niveau variable de toxicité ,
- instabilité à haute température.

b) Composés inorganiques :

La température de fusion des matériaux ou substances inorganiques est de -100°C à $+1000^\circ\text{C}$. Les plus couramment utilisées sont : l'eau, les solutions salines aqueuses, les sels hydratés, les mélanges de sels, les mélanges de métaux. Ils possèdent plusieurs avantages : ils ont une chaleur latente élevée et une grande conductivité thermique. Ils ont un point de fusion net. Ils sont ininflammables et leur coût d'investissement est raisonnable. Généralement, ils sont aisément disponibles. Les principaux inconvénients de leur utilisation sont liés à la ségrégation, à la corrosion et à la surfusion, ce qui nécessite l'utilisation d'agents de nucléation pour être efficace [14].

II-5 Critères de choix d'un matériau à changement de phase :

Des critères seront mis en place pour faciliter le choix d'un MCP pour une application donnée [12] :

a- Propriétés thermiques :

- température de changement de phase qui dépend de l'application.
- valeur de la chaleur latente de fusion (>130 kJ / kg pour être concurrentiel).
- Conductivité thermique élevée pour une cinétique de charge et de décharge plus rapide.
- Basse pression de vapeur pour minimiser les problèmes de résistance à la pression du système de stockage.

b-Propriétés physiques :

- Petit changement de volume lors du changement d'état pour le dimensionnement du stockage et la résistance à la pression.
- densité élevée pour que le MCP puisse réaliser un stockage suffisant dans le plus petit volume possible.
- fusion coïncidente lorsque l'on utilise un corps composé.
- c-Considérations cinétiques :
 - cinétiques de charge et de décharge sont rapides.
 - Pas de surfusion qui réduit la cinétique et empêche le déstockage.
 - **Considérations de stabilité et de compatibilité avec les autres matériaux**
 - stabilité du corps pendant les cycles thermiques.
 - tolérance aux matériaux du réservoir de stockage pour chaque phase afin d'éviter tout risque de corrosion, de réactivité chimique ou électrochimique.
- d-Considérations chimiques :
 - stabilité chimique des corps en fonction du temps et de la température.
 - Taux de cristallisation élevé. Non inflammable et non toxique.
- e-Considérations économiques :
 - Coût acceptable et bonne accessibilité.

I.5. Phénomènes thermo-physiques liés aux PCM

Chaque catégorie de PCM comme candidats potentiels possède ses avantages et ses inconvénients, qui peuvent s'avérer plus ou moins pénalisants selon l'application visée. Plusieurs publications ont traité ce sujet, Zalba et al. [18],

Le tableau présente les différents avantages et inconvénients associés à chaque type de matériaux.

II- 5.2: Intensification du transfert thermique dans les MCP :

La majorité des MCP ne répondent pas aux critères exigés pour servir de supports appropriés à un stockage de chaleur. En effet, aucun matériau ne peut avoir intrinsèquement toutes les propriétés requises pour un support de stockage thermique idéal. Aussi ces matériaux sont employés tout en recherchant les voies et moyens qui permettent d'éviter ou de compenser les inconvénients qu'ils présentent par des techniques appropriées adaptées à chaque application. Par exemple, des ailettes métalliques ont été employées pour augmenter la conductivité thermique des PCM, la surfusion peut être évitée par addition d'un agent de nucléation dans le matériel de stockage, et la fusion non congruente est empêchée en ajoutant dans le PCM un agent épaississant ou un gélifiant approprié. Pour ces deux principaux leviers peuvent être utilisés : la conductivité thermique du MCP et/ou la surface d'échange thermique

II-5.3 Macro-encapsulation :

La macro-encapsulation consiste à piéger une quantité significative de MCP dans des capsules de différentes géométries et de les utiliser dans un échangeur à lit fixe

Micro-encapsulation :

Dans le cas de la micro-encapsulation, le MCP est contenu dans de petites sphères dont le diamètre est de l'ordre du micromètre. Cette technique permet de mettre en mouvement le MCP dans les échangeurs par convection forcée.

Chapter III

Position du Problème

Chapter III : Position du Problème

III.1 Introduction :

Pour mieux comprendre le processus de la fusion et le phénomène de la convection naturelle, nous avons développé une simulation numérique par le logiciel ANSYS Fluent 15.0.7 pour faire une comparaison entre des résultats expérimentaux déjà réalisés à l'université de Tlemcen (ABOU BEKR BELKAID) au sein du laboratoire de recherche énergétique et thermique appliquée n°63 ETAP[*][**] et nos résultats numériques.

L'étude porte sur le comportement dynamique et thermique d'un matériau à changement de phase dans une cavité remplie de paraffine et chauffée par le côté jusqu'à la fusion (**Fig.III.3**).



Fig.III.4 : Cavité utilisée



Fig.III.2 résistance placé du côté droit de la cavité

III.2 Problème physique :

Une cavité rectangulaire de 12 cm de large et 11 cm de hauteur remplie d'un matériau à changement de phase (paraffine). La cavité est soumise à un flux thermique constant par le côté droit. Les autres côtés de la cavité sont isolés thermiquement de manière non parfaite, induisant des pertes thermiques quantifiées expérimentalement. La figure III.3 montre le système de coordonnées et le modèle physique de la cavité. Les caractéristiques thermo-physiques de la paraffine utilisée dans les calculs sont indiquées dans le tableau 1.

Chapter III : Position du Problème

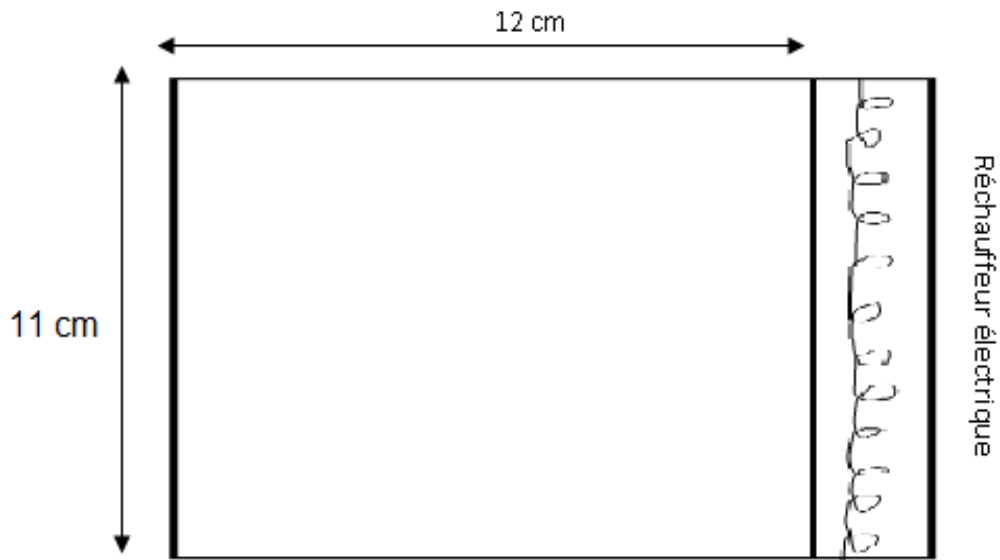


Fig.III.3 Dimensions du modèle physique étudié

Tableau III.2: Propriétés thermo-physiques de la paraffine utilisée

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

Chapter III : Position du Problème

Conductivité thermique (solide) [W/m.K]	λ	0.21
Masse volumique (solide à 24°C) [kg/m ³]	ρ	916
Viscosité dynamique [kg/m.s]	μ	0.0036
Coefficient de dilatation thermique [K ⁻¹]	β	9.1×10^{-4}

III.3 Modèle Mathématique :

III.3.1 Modèle dynamique :

Le modèle d'écoulement est basé sur les équations de Navier-Stokes régissant l'écoulement d'un fluide incompressible et instationnaire, modifiées pour tenir compte des spécificités de changement de phase. Les équations gouvernantes sont celles de la conservation de la masse et de la quantité de mouvement :

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

Pour un fluide incompressible ρ est constante donc l'Eq. (III.1) devient :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (\text{III.2})$$

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

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

Chapter III : Position du Problème

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho g \beta (T - T_{ref}) + S_v \quad (\text{III.4})$$

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

$$S_u = -A \frac{(1-f_l)^2}{(f_l^3 + \varepsilon)} u \quad (\text{III.5})$$

$$S_v = -A \frac{(1-f_l)^2}{(f_l^3 + \varepsilon)} v \quad (\text{III.6})$$

p : désigne la pression

$\rho g \beta (T - T_{ref})$: désigne l'approximation Boussinesq

β est le coefficient de la dilatation thermique.

L'approximation de Boussinesq :

Dans les écoulements du fluide accompagnés d'un transfert de chaleur, la densité ρ du fluide varie avec la température, cette variation de la densité est la cause du mouvement du fluide. Si la variation est petite on peut traiter la densité comme constante dans le terme transitoire et le terme convectif et la traiter comme uniformément variable dans le terme source.

III.3.2 Modèle thermique :

En tenant compte du phénomène de changement de phase du MCP, trois régions distinctes peuvent être considérées : une région solide, une région liquide et une région pâteuse où coexistent les deux phases. Pour tenir compte de la présence de ces trois régions, nous avons adopté un modèle enthalpique porosité dont l'équation gouvernante est celle de l'énergie :

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + S_T \quad (\text{III.7})$$

Chapter III : Position du Problème

$$\text{Avec : } S_T = -\rho L \left(\frac{\partial f_l}{\partial t} + u \frac{\partial f_l}{\partial x} + v \frac{\partial f_l}{\partial y} \right) \quad (\text{III.8})$$

Pour modéliser les problèmes de changement de phase, le code commercial ANSYS Fluent utilise la technique de l'enthalpie-porosité. Dans cette technique, le suivi explicite du front de fusion n'est pas pris en compte et la proportion de fusion est calculée en utilisant l'équilibre enthalpique. Le front de fusion est une variation de la proportion de fusion de 0 (solide) à 1 (liquide). On traite la zone solide-liquide comme une zone poreuse avec un écart de porosité de 1 (liquide) à 0 (solide).

, on peut définir comme suit :

$$f_l = 0 \quad \text{si} \quad T < T_{\text{solidus}} \quad (\text{III.9})$$

$$f_l = \frac{T - T_{\text{solidus}}}{T_{\text{liquidus}} - T_{\text{solidus}}} \quad \text{si} \quad T_{\text{solidus}} < T < T_{\text{liquidus}} \quad (\text{IV.10})$$

$$f_l = 1 \quad \text{si} \quad T > T_{\text{liquidus}} \quad (\text{IV.11})$$

III.4 Conditions initiales et aux limites :

III.4.1 Conditions initiales :

La température initiale dans la paraffine correspond à la moyenne des températures initiales mesurées lors des essais expérimentaux. La température initiale du système est fixée à 20 °C.

III.4.2 Conditions aux limites :

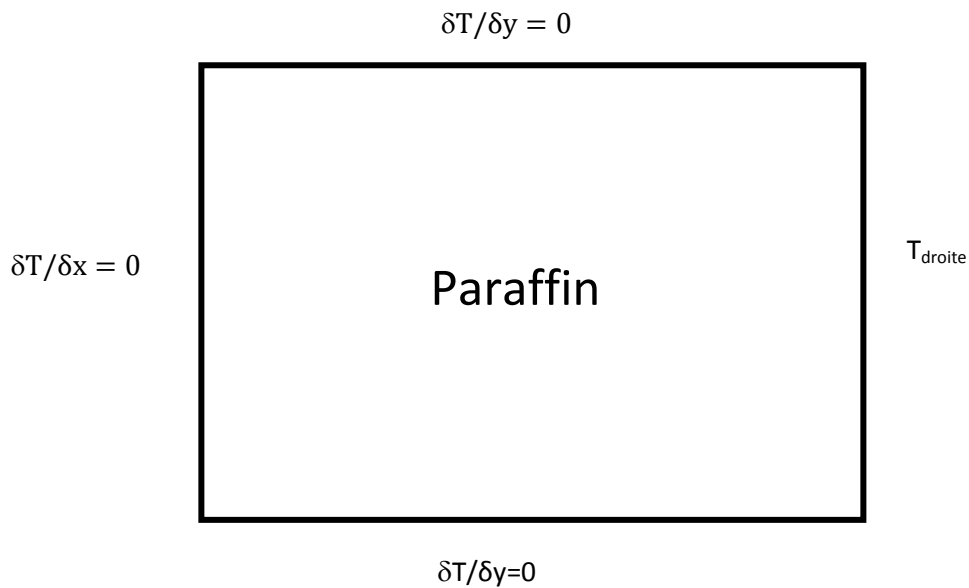


Fig.III.4 Conditions aux limites

- Les parois extérieures de la cavité sont supposées isolées $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$.
- la condition de non glissement (**Type Wall**) est imposée (vitesses nulles sur la paroi) : $u = v = 0$
- La paroi droite de la cavité est chauffée avec une température temporelle

$$T = 366.25436 - 78.67946 \cdot \exp(-0.00157 \cdot t)$$

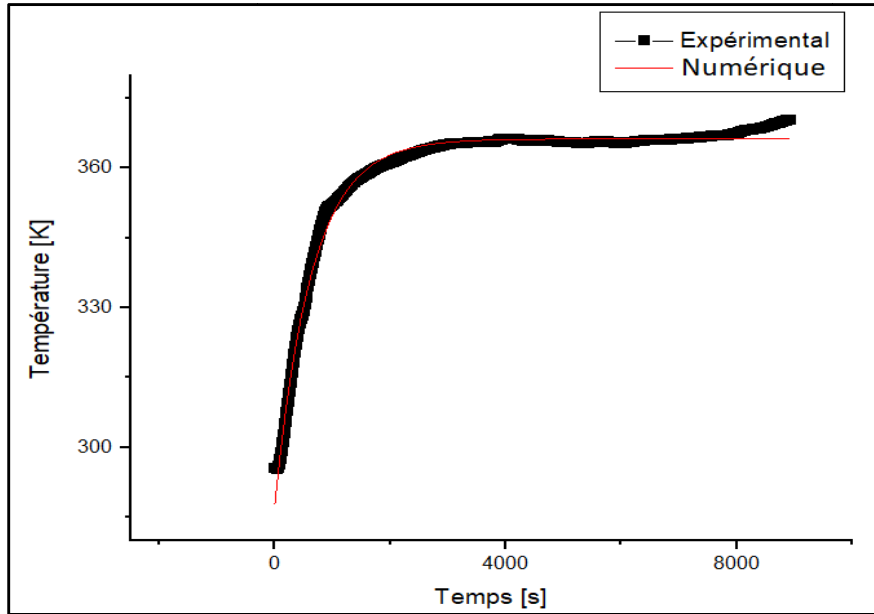


Figure III. 4. Evolution de la température de la paroi inférieure

III.5 Simulation numérique

Les calculs numériques ont été effectués par le code du calcul ANSYS Fluent 15.0.7.

III.5.1 Géométrie et maillage

La géométrie est dessinée dans le logiciel **DESIGN MODELER** et la cavité est maillée à l'aide du mailleur **Meshing**.

Chapter III : Position du Problème

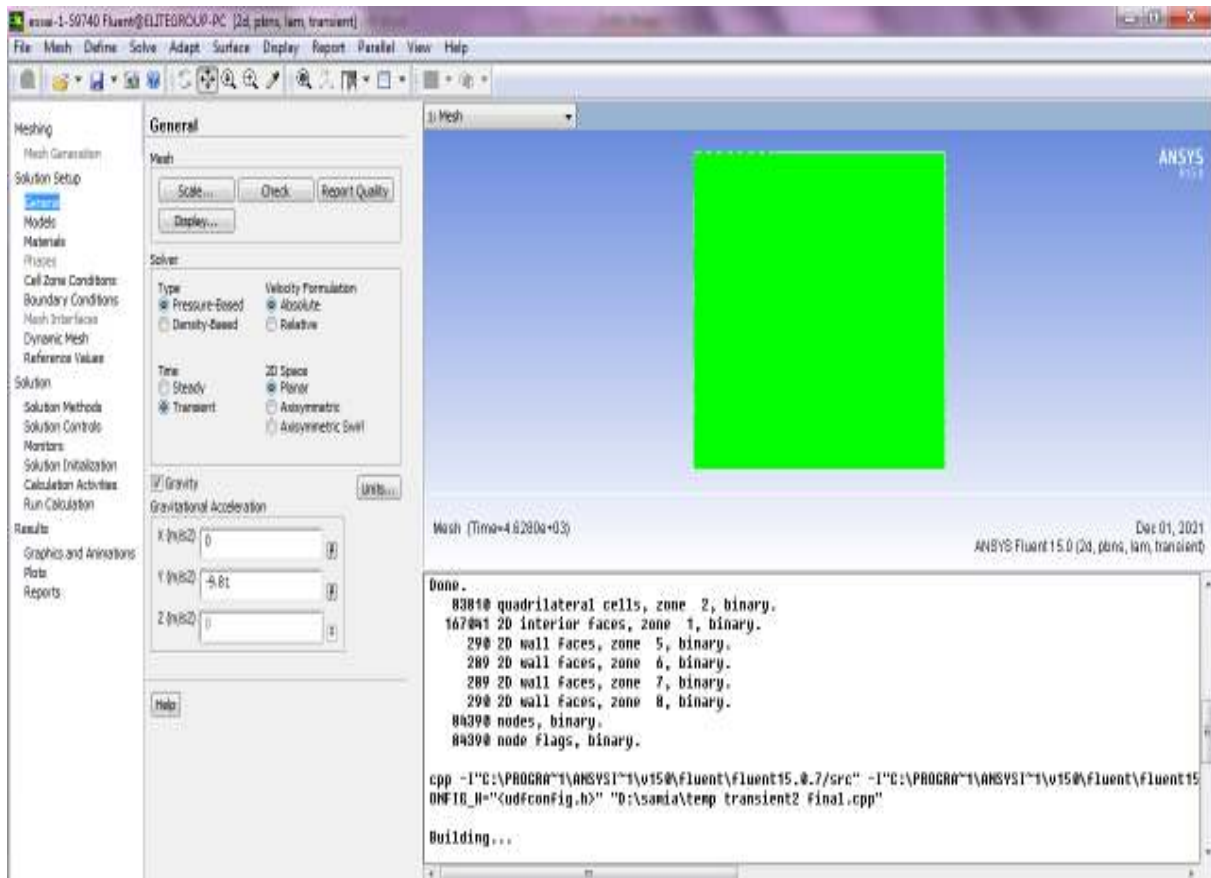


Fig.III.6 Géométrie et maillage de la cavité

III.5.2 Calcul numérique :

Pour les calculs numériques effectués sous FLUENT, nous avons adopté 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.

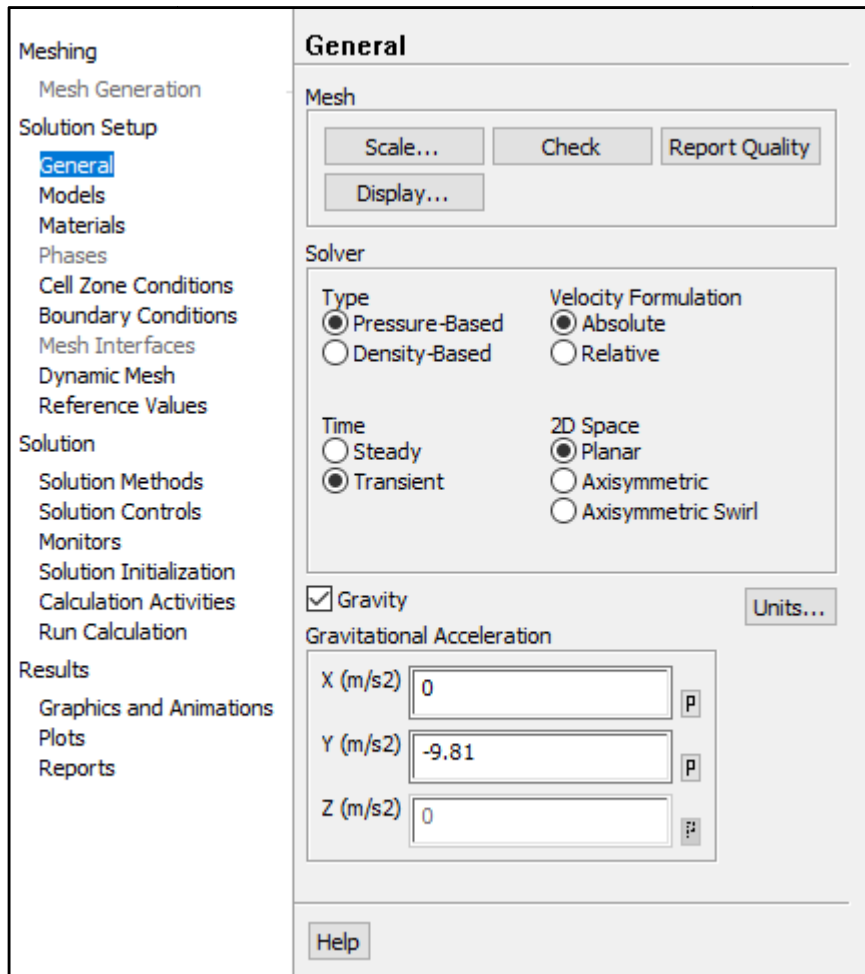


Fig. III.7 Interface de Fluent avec les paramètres du solveur utilisé

3. pour le suivi de la fraction liquide, le modèle melting-solidification est adopté avec une constante de Darcy $C=10^5$.

Chapter III : Position du Problème



Fig. III.8 Interface de Fluent pour le coefficient de Darcy

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 (Kamkari2017).

5. Les calculs sont initialisés à une température de $T_{\text{initiale}}=20^{\circ}\text{C}$.

Chapter III : Position du Problème

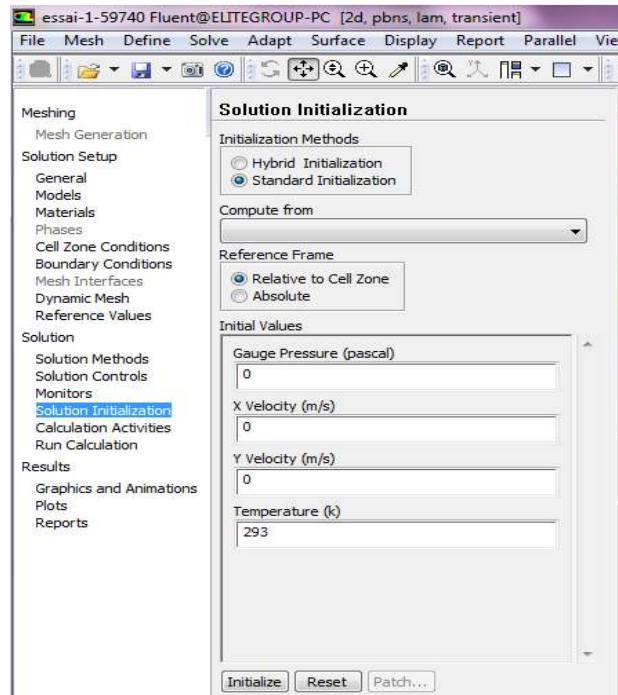


Fig.III.5 Température initiale proposée

6. Les facteurs de sous relaxation qui semblent favoriser la convergence des résultats avec une meilleure stabilité sont données dans la figure III.9:

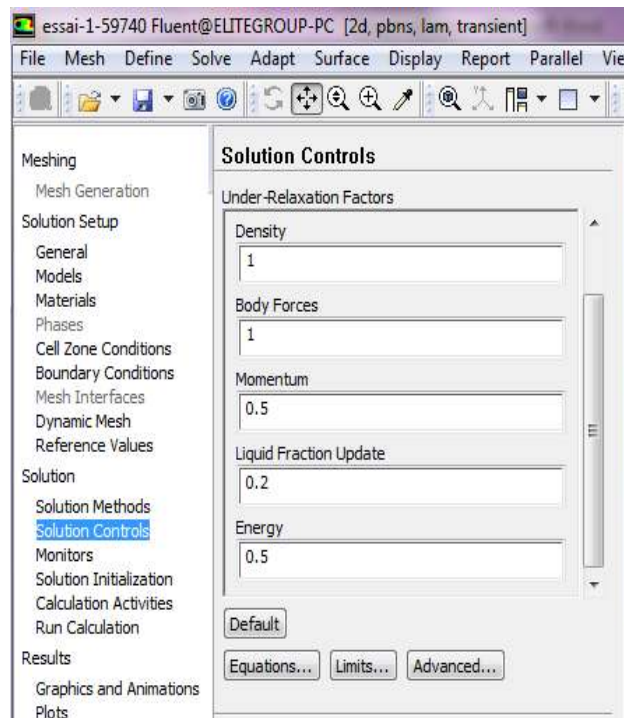


Fig.III.10 Facteurs de sous relaxation

Chapitre IV :
Résultats et discussions

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1 Validation numérique :

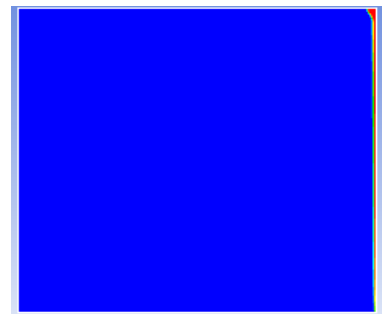
IV.1.1 Test de maillage :

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 (57600, 84100, 115600 cellules).

57600

84100

115600



T=10 min



T=15 min



T=20 min

Figure IV. 5. Contours des fractions liquides en fonction du temps
pour des différents maillages

La figure IV.1 représente l'évolution de la fraction liquide de la paraffine en fonction du temps respectivement pour les quatre tailles de maillage testées. La couleur rouge indique la partie liquide, le bleu indique la partie solide et les différents couleurs indiquent la zone pâteuse (front de fusion).

Nous remarquons que la paraffine commence à fondre près de la plaque chauffante au même temps pour les trois maillages testés. Il est bien clair qu'un maillage raffiné (115600cellules) nous permet d'avoir une forme du front de fusion bien tracé. Après 10 min, on remarque aussi qu'il y a une déformation du front de fusion identique pour le maillage 57600cellules.

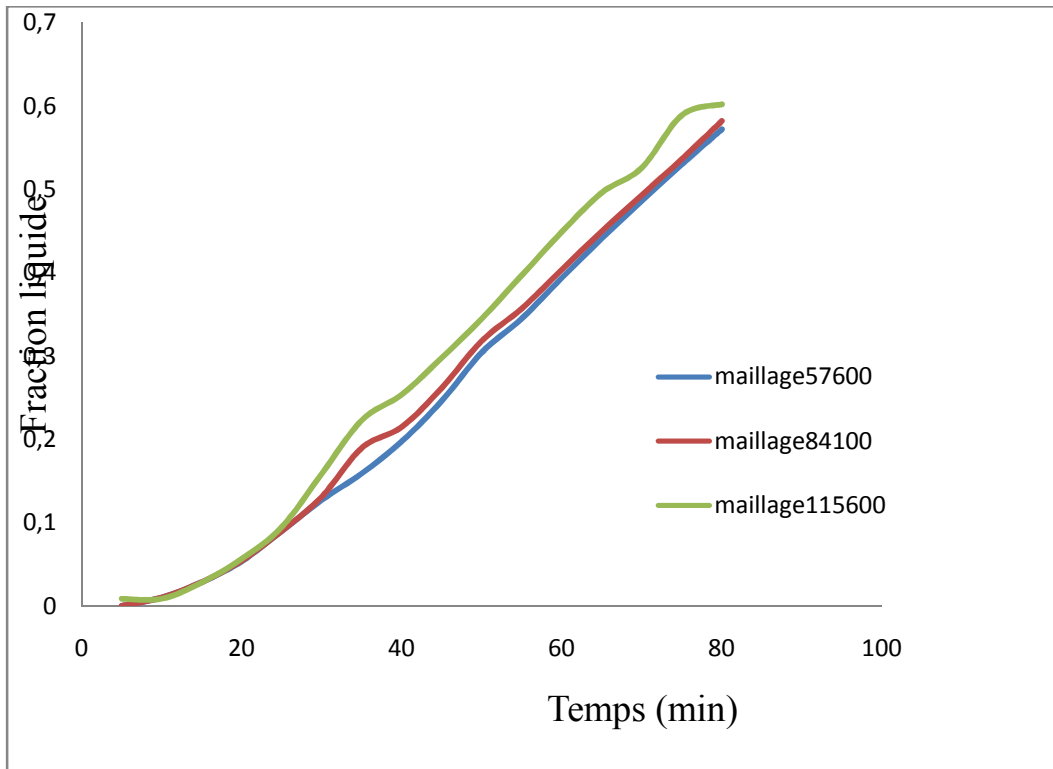


Figure IV. 6. Evolution de la fraction liquide pour les trois maillages

La figure IV.2 représente l'évolution de la fraction liquide en fonction du temps pour les trois maillages testés. Un très faible écart entre les courbes est observé. Cependant, pour avoir une forme régulière du front de la fusion, un maillage plus raffiné de 115600 est conseillé mais il n'est plus recommandé, car le temps de calcul de ce dernier est une véritable contrainte et un maillage de 84100 cellules est adopté.

IV.2 Evolution de la fraction liquide :

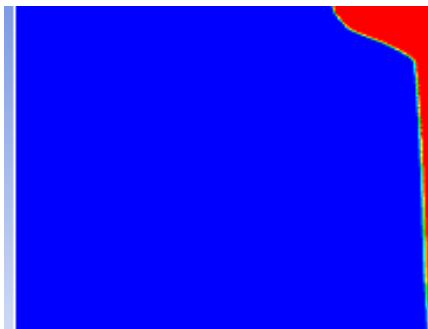
t= 10 min



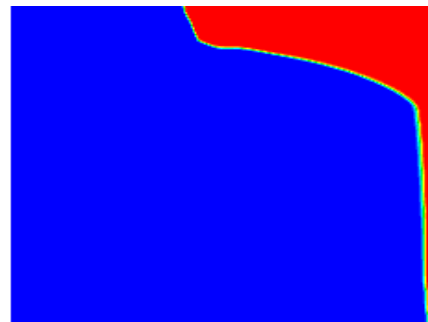
t=15min



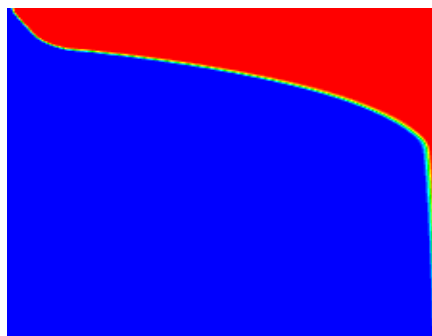
t=20 min



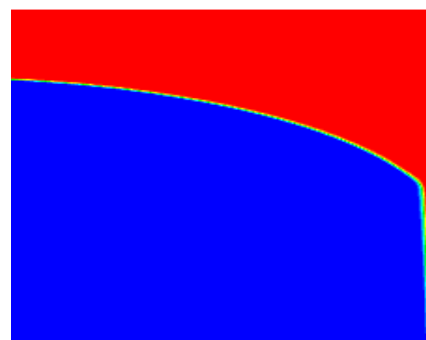
t=30 min



t=40 min



t=50 min



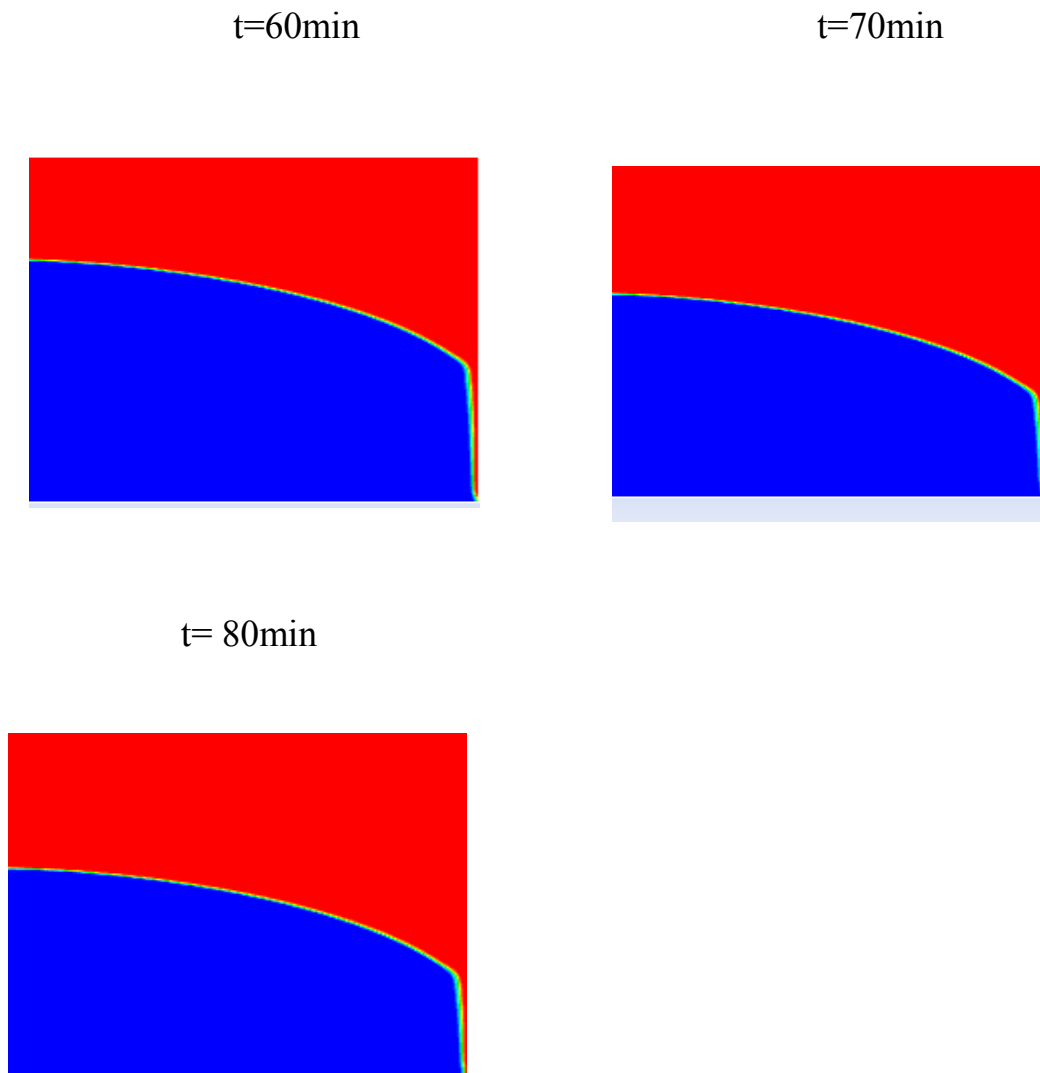


Figure IV. 3. Evolution de la fraction liquide pour un maillage 84100 cellules, pas du temps $dt=0.06$ et coef de Darcy $c=10^5$

La figure IV.3 montre l'évolution temporelle du processus de la fusion de la paraffine dans une cavité chauffée par le côté droit, pour un maillage de 84100 cellules, Un pas du temps $dt=0.06$ et un coefficient de Darcy $c=10^5$.

La paraffine commence à fondre près de la source chaude à partir de 10 min où l'interface solide-liquide apparait comme une couche fine parallèle à la paroi droite. Après 15min le front de fusion progresse et enregistre une certaine

Chapitre IV : Résultats et discussions

inclinaison par le haut. Ce phénomène traduit le développement de la convection dans la paraffine liquide. La chaleur monte en haut de la cavité et accélère la fusion dans cette région.

Au cours du temps, la convection naturelle s'intensifie et la courbure du front de la fusion devient plus important. Par conséquent, la fusion de la paraffine se développe avec trois zones : une phase liquide montant vers le haut de la cavité, une phase solide qui reste en bas et une phase pâteuse entre les deux.

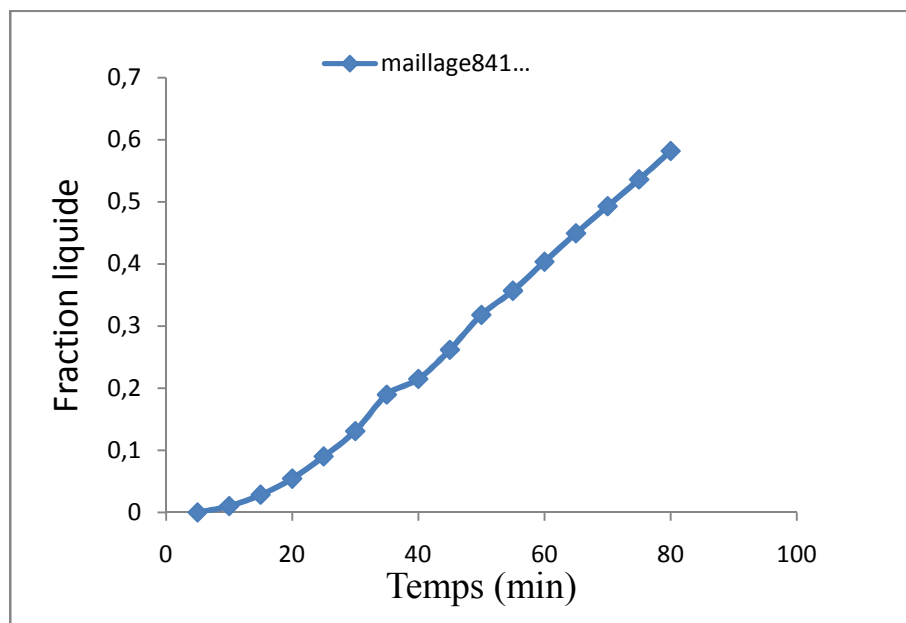


Figure IV. 4. Evolution de la fraction liquide

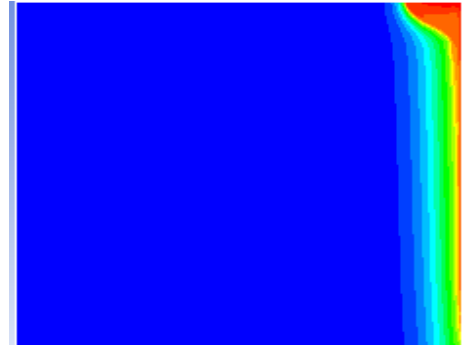
La figure IV.4 représente l'évolution de la fraction liquide en fonction du temps pour un maillage de 84100 cellules, un pas du temps $dt=0.06$ et un coefficient de Darcy $c=10^5$.

IV.3 Evolution de la température :

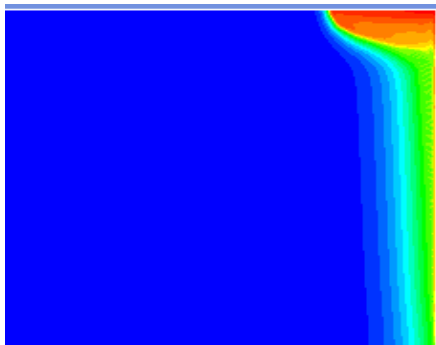
t= 10 min



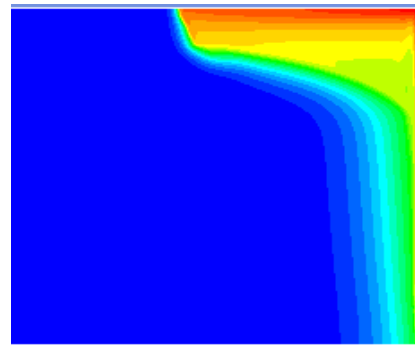
t=15min



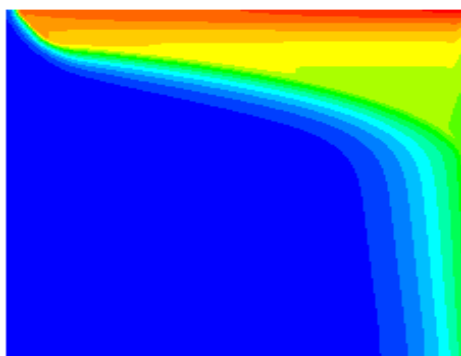
t= 20 min



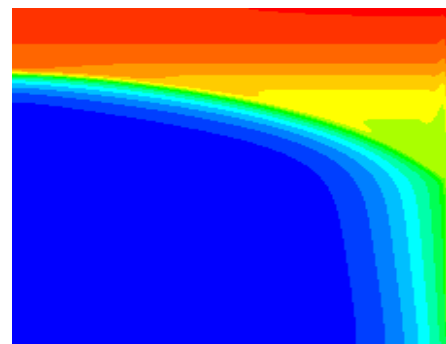
t= 30 min



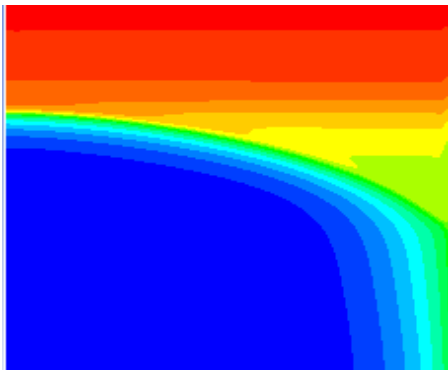
t=40 min



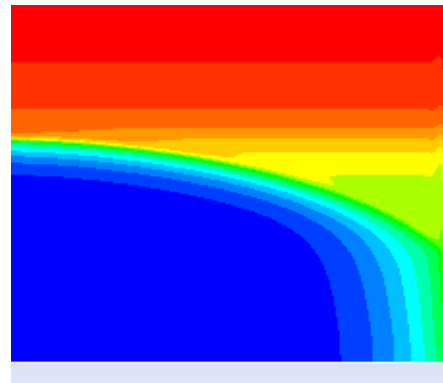
t=50 min



t=60min



t=70min



t= 80min

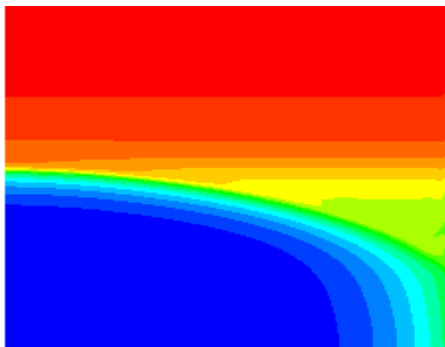


Figure IV.5. Evolution des isothermes pour un maillage 84100 cellules, pas du temps $dt=0.06$ et coef de Darcy $c=10^5$

La figure IV.5 montre l'évolution temporelle de la température dans une cavité chauffée par le côté droit, pour un maillage de 84100 cellules, un pas du temps $dt=0.06$ et un coefficient de Darcy $c=10^5$.

On observe clairement qu'après 10 min, les isothermes sont sous forme de droites parallèles à la paroi chaude. Le transfert de chaleur est dominé par la conduction.

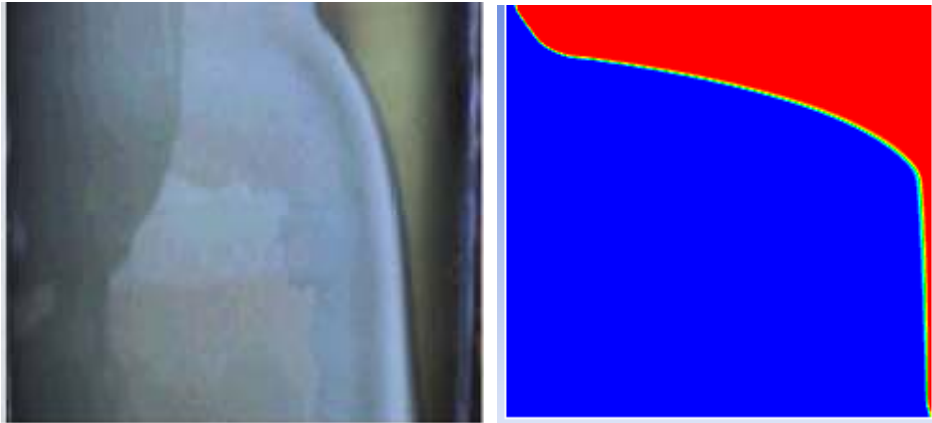
Chapitre IV : Résultats et discussions

Après ,la chaleur qui se propage vers la gauche est accélérée par le haut entraînant une forme courbée inclinée des isothermes. De ce fait, la convection naturelle est développée dans la phase liquide et va être *---dominante.

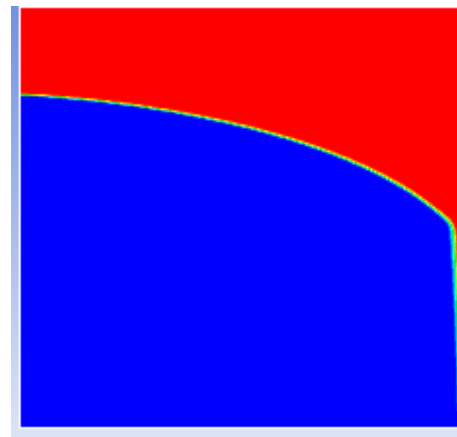
IV.4 Comparaison entre la fraction liquide expérimentale et numérique.

expérience

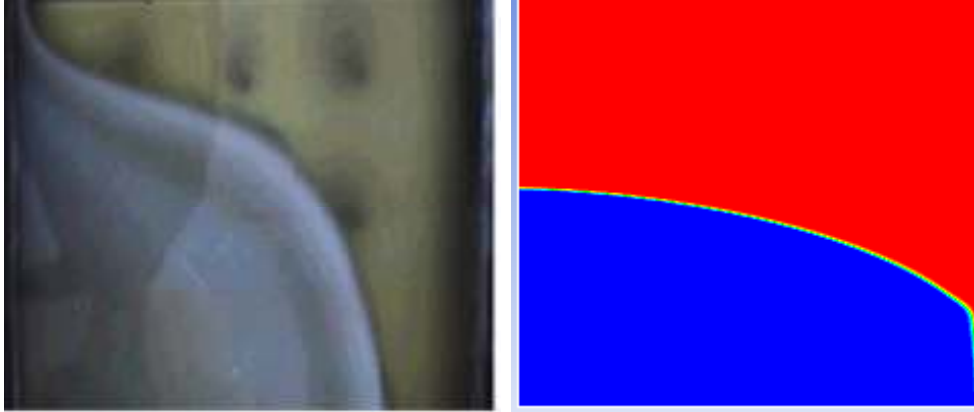
simulation



t=40 min



t=50 min



t=80 min

Figure IV. 6. Comparaison entre la fraction liquide expérimentale et numérique

La figure IV.6 représente une comparaison entre la fraction liquide expérimentale et celle obtenue numériquement avec un maillage de 84100 cellules, un pas du temps de 0.06s et une constante de Darcy égal à 10^5 . On remarque que l'évolution obtenue numériquement est nettement plus rapide que celle expérimentalement qui est dû à la distraction des conditions aux limites réelles des pertes thermiques.

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 côté. La simulation est développée par le logiciel ANSYS Fluent 15.0.7 et validée par les résultats expérimentaux obtenus précédemment [*]. À partir des résultats obtenus, on peut tirer les conclusions suivantes :

1. Un maillage raffiné de 115600 cellules nous permet de mieux capter la courbure du front de fusion, mais il n'est plus recommandé, car le temps de calcul de ce dernier est une véritable contrainte
2. Un faible pas de temps de 0.06 s est adopté et un maillage de 84100cellules est utilisé.
3. Deux modes de transfert de chaleur dominant le processus de fusion, à savoir la conduction et la convection naturelle. La conduction régit la fusion au début du processus et contrôle la propagation de la fusion dans la paraffine solide. Au fur et à mesure que le temps passe, le volume de la fractionliquide augmente et la fusion est dominée progressivement par la convection naturelle.
4. les isothermes sont sous forme de droites parallèles à la paroi chaude parce que le transfert de chaleur est dominé par la conduction. Après la chaleur qui se propage vers la gauche est accélérée par le haut entraine à une forme courbé inclinée des isothermes. De ce fait, la convection naturelle est développée dans la phase liquide et elle sera dominante.

5. La confrontation avec les résultats expérimentaux montre un écart assez important causé par la distraction des conditions aux limites réelles.

Enfin, il est important d'intégrer les conditions aux limites réelles pour améliorer la précision et s'approcher de la réalité.

Bibliographie

[1]Hale, N.W.Jr. et Viskanta, R., Photographic observation of the solid-liquid interface motion during melting of a solid. Marshall, R.H., Natural convection effects in rectangular enclosures containing a phase change material, dans Thermal Storage and Heat Transfer in Solar Energy Systems, ASME,

[2]Marshall, R.H., Natural convection effects in rectangular enclosures containing a phase change material, dans Thermal Storage and Heat Transfer in Solar Energy Systems, ASME, 1978

[3]Van Buren, P.D., et Viskanta, R., Interferometric measurement of heat transfer during melting from a vertical surface, Int. J. Heat and Mass Transfer, vol. 23, no 4, p. 568-571,

[4]Benard, C., Gobin, D. et Martinez, F., Melting in rectangular enclosures: experiments and numerical simulations, J. Heat Transfer, vol. 107, p. 795-803, 1985

[5]Gadgil, A. et Gobin, D., Analysis of two-dimensional melting in rectangular enclosures in presence of convection, J. Heat Transfer, vol. 106, p. 21-27, 1984

[6]Gobin, D., Changement d'état solide-liquide: Evolution temporelle du couplage entre la convection naturelle dans la phase liquide et la conduction dans la phase solide. Etude numérique et expérimentale, thèse de doctorat d'état, Université Paris VI, 1984

[7]Ho, C.J. et Viskanta, R., Heat transfer during melting from an isothermal vertical wall, J.

Heat Transfer, vol. 106, p. 12-19, 1984

- [8]Lacrok, M., Computation of heat transfer during melting of a pure substance from an isothermsl wall. Numerical Heat Transfer Part B, vol. 15, p. 191-210, 1989
- [9]Okada, M., Analysis of heat transfer during melting from a vertical wall, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 27 no 11, p. 2057-2066, 1984
- [10].Webb, B.W. et Viskanta, R., Analysis of heat transfer during melting ot a pure metal from an isothermal vertical wall, Numerical Heat Transfer, vol. 9, p. 539-558, 1986
- [11]Jany, P. et Bejan, A., Scaling theory of melting with natural convection in an enclosure, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 31 no 6, p. 1221-1235, 1988
- [12]. Bejan, A., A synthesis of analytical results for natural convection heat transfer acrossrectangular enclosures. Int. J. Heat and Mass Transfer, vol. 23, p. 723-726, 1980
- [13]Inaba, H., Seki, N., Fukusako, S. et Kanayama, K., Natural convective heat transfer in ashallow rectangular cavity with different end temperatures, Numerical Heat Transfer, vol. 4, p. 459-468, 1981
- [14]. Raithby, G.D., et HoUands, K.G.T., Natural convection, dans Handbook of heat transferfundamentals 2 edition, edite par W.M. Rohsenow, J.P. Hartnett et E.N. Ganic, McGraw-Hill, 1985

- [15]. Raithby, G.D., et Wong, H.H., Heat transfer by natural convection across vertical air layers, Numerical Heat Transfer, vol. 4, p. 447-457, 1981
- [16] De Vahl Davis, G. et Jones, I.P., Natural convection in a square cavity: a comparison exercise, Int. J. for Num. Meth. Fluids, vol. 3 p. 227-248, 1983
- [17] Ho, C.J. et Chang, J.Y., A study of natural convection heat transfer in a vertical rectangular enclosure with two-dimensional discrete heating: effect of aspect ratio, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 37 no 6, p. 917-925, 1994
- [18] Ho, C.J. et Chu, C.H., Periodic melting within a square enclosure with a oscillatory surface.
- [19] **Ante Marušić, Dražen Lončar**, Experimental validation of high-temperature latent heat storage model using melting front propagation data. Thermal Engineering. vol 164. (2020). 114520
- [20] **A. Korti et G. Guellil**, Journal of Energy Storage 32 journal home page: www.elsevier.com/locate/est « Effet de l'orientation de la surface chauffante d'une cavité carrée sur la fusion de la paraffine » , 11-12, 2020.
- [21] **F. Draou, F. Gadiri**, Effet de l'inclinaison sur le processus de la fusion de la paraffine, Mémoire de Master: Energétique, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2019.

- [22] -Zhang, Y., Chen, Z. et Wang, Q., Analysis of melting in an enclosure with discrete heating at constant rate. *Int. J. Heat and Fluid Flow*, vol. 15 no 1, p. 79-82, 1994
- [23] .Zhang, Y., Chen, Z., Wang, Q. et Wu, Q., Melting in an enclosure with discrete heating at a constant rate, *Exp. Thermal and Fluid Science*, vol. 6, p. 196-201, 1993
- [24] Zhang, Y., Chen, Z., Wang, Q. et Wu, Q., Melting in an enclosure with discrete heating at a constant rate, *Exp. Thermal and Fluid Science*, vol. 6, p. 196-201, 1993
- [25]**Z.X. Gong, A.S. Mujumdar**, Flow and heat transfer in convection-dominated melting in a rectangular cavity heated from below, *Int. J. Heat Mass Transf.* 41 (17) (1998) -2573-2580.
- [26] **M. Ghalambaz ,A. Doostani , E. Izadpanahi , A.J. Chamkha**, Phase-change heat transfer in a cavity heated from below: The effect of utilizing single or hybrid nanoparticles as additives. *the Taiwan Institute of Chemical Engineers* .pp 1-12.2017.
- [27] **Ankit Yadav, Sushant Samir**, Experimental and numerical investigation of spatiotemporal characteristics of thermal energy storage system in a rectangular enclosure .*Energy Storage*. vol 21.pp 405-417..2019
- [28] Lacrok, M., Computation of heat transfer during melting of a pure substance from an isothermal wall. *Numerical Heat Transfer Part B*, vol. 15, p. 191-210, 1989

[29] Okada, M., Analysis of heat transfer during melting from a vertical wall, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 27 no 11, p. 2057-2066, 1984

[30] Webb, B.W. et Viskanta, R., Analysis of heat transfer during melting of a pure metal from anisothermal vertical wall, Numerical Heat Transfer, vol. 9, p. 539-558, 1986

[31] Jany, P. et Bejan, A., Scaling theory of melting with natural convection in an enclosure, Int. J.

Heat Mass Transfer, vol. 31 no 6, p. 1221-1235, 1988

[32] **Bruno Binet**, *étude de la fusion dans des enceintes munies de sources de chaleur discrètes*, UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE, Thèse de Doctorat (Philosophiae Doctor) Spécialité: génie mécanique, 199

Enhancement of phase change materials melting performance in a rectangular enclosure under different inclination angle of fins
Birlie Fekadu *, Mebratu Assaye
Effect of fin material on PCM melting in a rectangular enclosure

[33] Lin-Li Tiana, b, Brighton, temperature, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 36 no 3, p. 725-733, 1993

ملخص

يركز العمل الحالي على المحاكاة العددية باستخدام برنامج لصهر مادة متغيرة الطور في تجويف جانبي ساخن. من أجل التحقق من السلوك الديناميكي والحراري للعملية ، استخدمنا النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها مسبقاً في الأعمال السابقة. تم إجراء اختبار الشبكة بالإضافة إلى المقارنة مع النتائج التجريبية التي أظهرت انحرافاً كبيراً إلى حد ما ناتج عن تشتيت الانتباه عن ظروف الحدود الفعلية.

Abstract

The present work focuses on the numerical simulation using ANSYS Fluent 15.0.7 software of the melting of a phase change material in a side-heated cavity. In order to validate the dynamic and thermal behavior of the process, we used experimental results obtained previously in previous works. A mesh test was carried out as well as a comparison with the experimental results which showed a rather large deviation caused by the distraction of the real boundary conditions.

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

Résumé

Le présent travail porte sur la simulation numérique à l'aide du logiciel ANSYS Fluent 15.0.7 de la fusion d'un matériau de changement de phase dans une cavité chauffée par le côté. Afin de valider le comportement dynamique et thermique du processus ,on a utilisé des résultats expérimentaux. Un test de maillage a été effectué ainsi qu'une confrontation avec les résultats expérimentaux qui a montré un écart assez important causé par la distraction des conditions aux limites réelles.

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