

Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf - Mila
Institut des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique et Electromécanique



N° Ref :... ..

Projet de fin d' étude préparé en vue de l' obtention du
diplôme de **MASTER**
en Génie Mécanique
Spécialité : **ÉNERGÉTIQUE**

**Stockage d' énergie thermique dans les
matériaux à changement de phase (PCM)**

Réalisé par :

BEHAIMI Bachir

BOUNEMEUR Zinedine

Soutenu devant le jury :

Me. ABDDEDAIM Imene

M.C.B

Président

M. BERRAHIL Farid

M.C.A

Encadreur

M. SAOULI Salah

Prof.

Co-encadreur

M. HAMIDANE Abbas

M.A.A

Examineur

Année universitaire : 2024/2025

Dédicace

On dédie ce travail :

A nos parents, notre source de force et d'inspiration.

A nos professeurs et encadrants, pour leurs expertises, leurs conseils éclairés et leurs patiences.

A tous ceux qui croient en nous, pour leur confiance qui nous a porté et nous donné la motivation nécessaire pour aller de l'avant.

Remerciement

Nous remercions Allah qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.

Nous remercions notre encadreur Dr. Berrahil Farid pour ses encouragements, et sa présence totale et ses suggestions avisées qui nous ont conduits à terminer ce travail.

Nos remerciements vont également à Pr. Saouli Salah, co-encadreur de ce mémoire, pour la valeur ajoutée de ses conseils, son expertise et son soutien technique tout au long de ce travail.

Nous remercions nos parents de nous avoir toujours appris à poursuivre nos rêves, ainsi que nos frères et sœurs pour leur soutien constant.

Enfin nous remercions nos amis, nos collègues de l' institut des Sciences et de la Technologie ainsi que l' ensemble des enseignants et responsables.

Résumé

Ce mémoire porte sur l' étude, la sélection et la simulation numérique de matériaux à changement de phase (PCM) pour le stockage thermique d' énergie, dans le but de concevoir un système de transport médical efficace pour les médicaments sensibles à la température.

Le travail s' est articulé autour de deux volets : une validation du modèle numérique en comparant les résultats de simulation du gallium avec ceux de l' étude expérimentale de Viskanta, puis une application pratique avec la simulation d' une pochette thermique intégrant une paraffine sélectionnée.

Les résultats obtenus montrent que le matériau choisi est capable de maintenir la température dans la plage critique ($2^{\circ}\text{C} - 8^{\circ}\text{C}$), répondant ainsi aux exigences du transport médical.

Mots clés :

Matériaux à changement de phase (PCM), Stockage thermique, Transport médical, Paraffine.

Abstract

This thesis focuses on the study, selection, and numerical simulation of Phase Change Materials (PCMs) for thermal energy storage to design an efficient medical transport system for temperature-sensitive medications.

The work is structured into two main parts: validation of the numerical model by comparing simulation results for gallium with the experimental study conducted by Viskanta, followed by a practical application involving the simulation of a thermal pouch incorporating selected paraffin.

The results obtained show that the chosen material can maintain the temperature within the critical range ($2^{\circ}\text{C} - 8^{\circ}\text{C}$), thereby meeting the requirements for medical transport.

Keywords:

Phase Change Materials (PCM), Thermal Storage, Medical Transport, Paraffin

الملخص

يتناول هذا المذكرة دراسة، اختيار ومحاكاة عددية للمواد ذات التغير الطوري (PCM) لتخزين الطاقة الحرارية، بهدف

تصميم نظام فعال لنقل الأدوية الحساسة لدرجة الحرارة

وقد تمحور العمل حول شقين:

الأول تمثل في التحقق من صحة النموذج العددي من خلال مقارنة نتائج محاكاة مادة الغاليوم مع نتائج الدراسة

التجريبية التي أجراها فيسكانتا

أما الشق الثاني فيتمثل في تطبيق عملي من خلال محاكاة كيس حراري يحتوي على نوع محدد من البارافين.

تظهر النتائج أن المادة المختارة قادرة على الحفاظ على درجة الحرارة ضمن النطاق الحرج ($2^{\circ}\text{C} - 8^{\circ}\text{C}$)، مما يلبي

متطلبات النقل الطبي.

الكلمات المفتاحية:

المواد ذات التغير الطوري (PCM)، التخزين الحراري، النقل الطبي، البارافين.

Table des matières

NOMENCLATURE

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURE

Introduction générale	10
CHAPITRE I Généralités et recherche bibliographique	
<i>I.1 - Matériaux à changement de phase</i>	
<i>I.1.1 Introduction</i>	12
<i>I.1.2 Définitions et principes fondamentaux</i>	12
a) <i>Matériaux à changement de phase (MCP)</i>	12
b) <i>Principe de fonctionnement des Matériaux à Changement de Phase (MCP)</i>	12
<i>I.1.3 Types de Matériaux à Changement de Phase (MCP)</i>	13
a) <i>MCP organiques</i> :	13
b) <i>MCP inorganiques</i> :	14
c) <i>MCP eutectiques</i> :	15
<i>I.1.4 Caractéristiques des Matériaux à Changement de Phase (PCM)</i>	15
<i>I.1.5 Conditionnement des MCP</i>	16
<i>I.1.6 Applications des Matériaux à Changement de Phase</i>	17
<i>I.2 Stockage de l'énergie</i>	19
<i>I.2.1 Introduction</i>	19
<i>II.2.2 Le stockage de l'énergie</i>	19
<i>II.2.3 Moyens de stockage de l'énergie</i>	19
<i>II.2.3.1. Sous forme d' énergie chimique</i>	19
<i>II.2.3.2 Sous forme d' énergie thermique</i>	20
<i>II.2.4 Les différentes technologies de stockage thermique</i>	22
<i>II.2.5 Comparaison des systèmes de stockage</i>	23
<i>II.2.6 Avantages et inconvénients du stockage d' énergie dans les matériaux à changement de phase (MCP) :</i>	24
<i>II.2.7 Conclusion</i>	24

II.Recherche bibliographique	25
------------------------------------	----

CHAPITRE II

II.1 Configuration Géométrique	31
II.1.1 Introduction	31
II.1.2 Configuration géométrique du système :	31
II.1.3 :Hypothèse	32
II .2 Formulation Mathématique :	32
II.2.1 Equation de conservation de masse	32
II.2.2 L' èxpression de l' enthalpie en fonction de la température dans l' èquation d' énergie	32
II.2.3 Conditions aux limites hydrodynamique et thermique	33
II.2.4 Simulation de la situation expérimentale avec la fusion du gallium :	33
II.2.5 Conclusion	35

CHAPITRE: III Methode numerique

III .1-Introduction	37
III .2-Effet de maillage :	37
III .3-Choix du maillage :	38
III.4-Etapes de travail sur ANSYS Fluent	39
III.5-Conclusion	45

CHAPITRE: IV Methode numerique

IV.1 Validation du modèle physiqueIV	47
IV.2 Résultats et discussion	48
Conclusion générale	56
BIBLIOGRAPHIE	57

NOMENCLATURE

Symbole	Désignation	Unité
Gr	Nombre de Grashof	Sans unité
$L = L_f$	Chaleur latente de fusion	J/kg
Nu	Nombre de Nusselt	Sans unité
P	Pression dynamique	Pa
Q_{latent}	Chaleur latente (pendant le changement de phase)	J
$Q_{sensible}$	Chaleur sensible (hors changement de phase)	J
Ra	Nombre de Rayleigh	Sans unité
Ste	Nombre de Stefan	Sans unité
T	Température locale	K ou $^{\circ}C$
$T_e = T_m$	Température de fusion (transition de phase)	K
<i>Symbole</i>	Désignation	Unité
c_s, c_l	Capacité calorifique massique (solide / liquide)	$J/(kg \cdot K)$
cp	Capacité calorifique apparente	$J/(kg \cdot K)$
$f = f(T)$	Fraction liquide du PCM (fonction de température)	Sans unité ($0 \leq f \leq 1$)
h	Enthalpie	J/kg
k, k_l	Conductivité thermique (kl : liquide)	$W/(m \cdot K)$
p	Pression dynamique	Pa
t^*	Temps sans dimension	Sans unité
T^*	Température sans dimension	Sans unité
u, v	Composantes de la vitesse selon x, y	m/s
β_l	Coefficient de dilatation thermique (liquide)	K^{-1}
μ	Viscosité dynamique	$Pa \cdot s = kg/(m \cdot s)$
ρ_0, ρ_s, ρ_l	Masse volumique de référence / solide / liquide	kg/m^3
ν_l	Viscosité cinématique du liquide	m^2/s
S_u, S_v	Termes sources de la résistance liée au changement de phase (modèle de Darcy)	<i>Variable selon modélisation</i>
δT	Intervalle de transition de phase	K



LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1: Certaines propriétés thermiques de certains MCP	16
Tableau I.2: Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20 ° C [66] .	21
Tableau I.3 : Comparaison des différents types de stockage en fonction de leur densité énergétique[23]	23
Tableau II.1: Propriétés thermophysiques de gallium liquide	33
Tableau II.2: Propriétés thermophysiques de gallium slide	34
Tableau II.3: Propriétés thermophysiques de paraffine RT-4 [100]	35

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Principe de fonctionnement des Matériaux à Changement de Phase (MCP) ...	13
Figure I.2: Types de Matériaux à Changement de Phase (MCP)	15
Figure I.3: MCP micro-encapsulés: (a) état liquide et état poudre :(b) image microscopique électronique à balayage de nombreuses capsules	17
Figure I.4: Profil de changement de phase pour le stockage par chaleur latente	21
Figure I.5: Equivalence entre la chaleur latente nécessaire pour fondre 1 kg de glace et la chaleur sensible nécessaire pour chauffer l'eau liquide	22
Figure I.6 : Configuration étudiée et domaine de calcul avec les conditions aux limites .	26
Figure II.1: compartiment pour les médicaments	35
Figure III.1: Maillage.	38
Figure III.2: caractéristiques général.	39
Figure III.3: méthodes de solution.	40
Figure III.4: caractéristiques du modèles.	40
Figure III.5: propriété des matériaux.	41
Figure III.6:Exécution de calculs.	42
Figure III.7: contrôle de solution	43
Figure III.8: évolution des résidus.	44
Figure III.9: Contours de liquide fraction.	45
Figure III.1: Comparaison les résultats de profils de température à l'instant $t = 10$ min ce travail et les résultats des calculs de Beckermann et Viskanta.	50
Figure III.2: Isothermes : comparaison des résultats numériques : a) ce travail, b) Beckermann	51

Figure III.3: Vecteurs de vitesse (a), isothermes (b) et la fraction du liquide (c) pour t= 1000 s.	52
Figure III.4: Vecteurs de vitesse (a), isothermes (b) et la fraction du liquide (c) pour t= 3000 s.	53
Figure III.5: Vecteurs de vitesse (a), isothermes (b) et la fraction du liquide (c) pour t= 9000 s.	54
Figure III.6: Vecteurs de vitesse (a), isothermes (b) et la fraction du liquide (c) pour t= 15000 s.	55
Figure III.7: Vecteurs de vitesse (a), isothermes (b) et la fraction du liquide (c) pour t= 21000 s.	56

Introduction générale

L'énergie est un moteur essentiel du dynamisme économique mondial et atteindre sa durabilité est l'un des plus grands défis de notre époque. Avec une demande énergétique en augmentation, l'attention s'est portée sur des sources de plus en plus renouvelables comme l'énergie solaire et éolienne qui, malgré leur abondance et leurs références écologiques, tendent à être incohérentes. De telles variations nécessitent le développement de solutions de stockage efficaces afin de garantir la disponibilité constante de l'énergie renouvelable. Les matériaux à changement de phase (PCM) sont une solution qui apparaît dans ce contexte. Ces matériaux absorbants et libèrent de l'énergie lorsqu'ils participent à un changement d'état physique, en faisant un moyen de stockage de l'énergie de pointe qui augmente l'efficacité énergétique et réduit le coût de ces technologies.

L'amélioration des systèmes de stockage d'énergie constitue un levier essentiel pour favoriser l'intégration rapide et efficace des énergies renouvelables. Bien qu'écologiquement avantageuses, ces sources présentent un caractère intermittent et ne produisent pas de manière continue. Les matériaux à changement de phase (PCM) offrent une solution pertinente à cette problématique, grâce à leur capacité à stocker l'énergie thermique sur de longues périodes à un coût réduit. Leur polyvalence et leur potentiel d'adaptation à une vaste gamme d'applications industrielles et commerciales ont suscité un intérêt croissant, stimulant des avancées technologiques rapides dans ce domaine. Ainsi, les PCM s'imposent comme l'un

des axes majeurs de recherche, avec un impact significatif sur la durabilité énergétique à long terme.

Dans le but de mener à bien cette étude, le contenu a été réparti en quatre chapitres fondamentaux :

Le premier chapitre est consacré aux généralités, aux définitions fondamentales ainsi qu' à une synthèse bibliographique.

Le deuxième chapitre traite de la modélisation mathématique du phénomène étudié. Il présente d' abord la configuration physique du système, puis développe les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l' énergie, accompagnées des conditions aux limites appropriées.

Le troisième chapitre est dédié à l' approche numérique à l' aide du logiciel ANSYS Fluent. Il détaille les différentes étapes de la création de la géométrie, du maillage, des schémas de discrétisation, ainsi que l' algorithme de résolution appliqué.

Le quatrième chapitre présente les résultats de la simulation numérique, en mettant en évidence l' évolution temporelle du phénomène physique étudié.

Enfin, une conclusion générale récapitule les principaux apports de cette étude.

CHAPITRE I

Généralités et recherche

bibliographique

I .1 - Matériaux à changement de phase

I.1.1 Introduction

De grandes quantités d' énergie peuvent être stockées et libérées à l' aide d' un système de stockage d' énergie thermique à base de matériaux à changement de phase (PCM). Ce système repose sur la capacité du matériau à absorber ou libérer de la chaleur lors d' un changement d' état, comme la fusion, la solidification ou l' évaporation. Lors de la transition d' un état solide à un état liquide, par exemple, le matériau absorbe de la chaleur ; inversement, il en libère en repassant à l' état solide. Ainsi, les PCM permettent un stockage et une restitution d' énergie thermique de manière prévisible, en fonction de la quantité d' énergie associée à leur transition de phase [1].

I .1.2 Définitions et principes fondamentaux

a) Matériaux à changement de phase (PCM)

Les matériaux à changement de phase (Phase Change Materials - PCM) sont des substances capables de changer d' état physique (solide ↔ liquide) sous l' effet des variations de température [2]. Lorsqu' ils absorbent de la chaleur, ils passent de l' état solide à l' état liquide, stockant ainsi l' énergie thermique sous forme de chaleur latente. Inversement, lorsqu' ils libèrent cette énergie, ils repassent à l' état solide, restituant la chaleur stockée. Ces matériaux sont largement utilisés pour le stockage thermique, notamment afin d' améliorer l' efficacité énergétique des bâtiments et des systèmes solaires.

b) Principe de fonctionnement des Matériaux à Changement de Phase (PCM)

Les matériaux à changement de phase (PCM) possèdent des propriétés thermo-physiques particulières leur permettant d' absorber ou de restituer une grande quantité d' énergie thermique lors de leur transition entre l' état solide et l' état liquide. Cette transition s' effectue à température quasi constante, ce qui constitue un atout majeur pour les applications de stockage thermique. Ainsi, lorsqu' un PCM solide est exposé à une température supérieure à son point de fusion, il fond en absorbant une quantité significative de chaleur, stockée sous forme de chaleur latente, jusqu' à ce que la transition soit complète. Inversement, lorsque le PCM liquide est soumis à une température inférieure à son point de solidification, il cristallise en libérant l' énergie thermique emmagasinée lors de la fusion. Ce cycle réversible d' absorption

et de restitution d' énergie thermique permet aux PCM de contribuer efficacement à la régulation thermique dans divers systèmes fonctionnant à température constante.

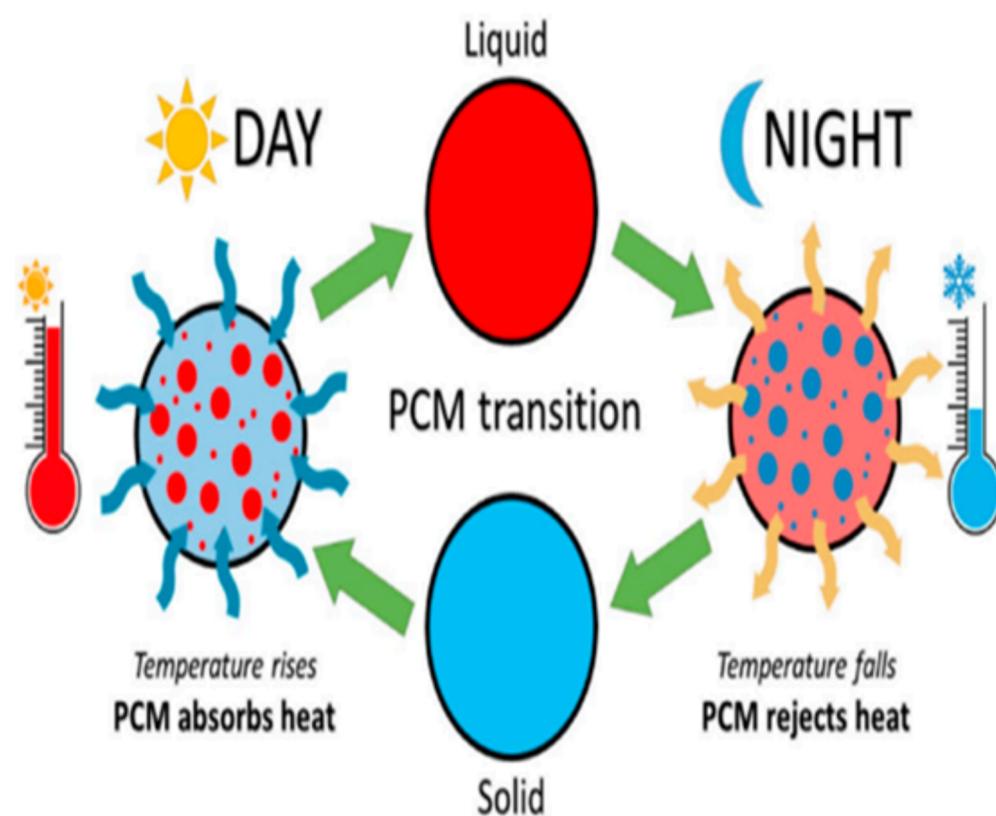


Figure I.1: Principe de fonctionnement des Matériaux à Changement de Phase (PCM) [3]

I.1.3 Types de Matériaux à changement de phase (PCM)

Les matériaux à changement de phase (PCM) sont généralement classés en trois catégories : organiques, inorganiques et eutectiques.

a) PCM organiques :

Les PCM organiques sont généralement dérivés de la paraffine ou d'autres matériaux issus du pétrole, des plantes ou des animaux [4]. Un exemple bien connu est la cire de paraffine.

a.1 – Les paraffines :

Les principaux constituants des paraffines sont des hydrocarbures saturés à chaînes linéaires ou ramifiées, parfois associés à des groupements méthyles substitués à l'extrémité des chaînes. Les paraffines ainsi constituées sont relativement pures, et leurs points de fusion peuvent être utilisés comme identifiants. Il s'agit cependant d'une plage de fusion plutôt que d' un point unique, car les paraffines sont souvent présentes sous forme de mélanges. Les n-paraffines, qui possèdent les meilleures propriétés thermiques, sont les plus couramment utilisées pour les applications de stockage thermique. Les paraffines intéressantes sont celles qui cristallisent à des températures adaptées aux besoins de stockage, appelées "cires paraffiniques". Plus le

nombre d'atomes de carbone augmente, plus le point de fusion des alcanes s'élève. Bien que les paraffines offrent des avantages tels qu'une fusion congruente et une bonne capacité de nucléation, elles présentent également des inconvénients : elles sont modérément inflammables, peu compatibles avec certains plastiques, et possèdent une faible conductivité thermique.

a.2 – Avantages des paraffines :

- L'enthalpie de fusion est comprise entre 180 et 230 kJ/kg. Comparée à d'autres matériaux organiques, cette valeur est relativement élevée. De plus, la capacité calorifique massique est d'environ 2,1 kJ/kg.K. En tenant compte de la chaleur sensible et de la chaleur latente, la densité d'énergie stockée devient significative.
- La capacité volumétrique de stockage thermique est environ quatre à cinq fois supérieure à celle de l'eau.
- Les paraffines présentent peu de surfusion. Même à des températures relativement élevées, leur pression de vapeur reste faible.
- Elles sont chimiquement stables. Toutefois, pour éviter leur oxydation, elles doivent être protégées de l'air.
- Leur dégradation est comparable à celle des acides organiques, surtout lorsqu'elles sont chauffées.
- Elles ne présentent pas de ségrégation de phase.
- Le terme « paraffine » désigne une substance chimiquement inerte, compatible avec la majorité des matériaux, à l'exception de certains plastiques et du cuivre. Il convient donc de prendre des précautions pour éviter tout phénomène de corrosion.
- Les composés à base de paraffine ne présentent aucun danger pour l'environnement. Ils sont non toxiques, recyclables, et sans effet nocif sur les micro-organismes, les plantes, les animaux ou l'eau.
- Les paraffines commerciales sont adaptées aux applications d'énergie solaire. Par exemple, une couche de 3 cm d'épaisseur de paraffine est thermiquement équivalente à une paroi en béton de 40 cm d'épaisseur.
- La masse volumique des paraffines varie entre 750 et 850 kg/m³ à l'état liquide, et entre 800 et 900 kg/m³ à l'état solide [5]. Cela implique une dilatation volumique d'

environ 15 % lors du changement de phase. Ce problème peut être atténué par un conditionnement approprié.

- Les paraffines ordinaires sont souvent des mélanges d' hydrocarbures bon marché. Selon leur composition, leurs points de fusion peuvent varier. En revanche, les cires paraffiniques pures sont plus coûteuses.

a.3 – Inconvénients :

- Leur conductivité thermique est très faible (environ 0,25 W/m·K).
- Elles présentent une expansion volumique importante (environ 15 %) et une densité relativement faible (environ 800 kg/m³ [6]).
- Les réservoirs en plastique doivent être utilisés avec précaution, car les paraffines peuvent migrer dans certains plastiques et les ramollir.

b) PCM inorganiques :

Cette catégorie regroupe des matériaux tels que les hydrates de sel et certains alliages métalliques. Ils présentent une conductivité thermique élevée et une forte capacité de stockage de chaleur latente, ce qui les rend particulièrement adaptés aux applications de gestion thermique [4].

c) PCM eutectiques :

Les PCM eutectiques sont constitués de mélanges de composants sélectionnés avec précision pour obtenir une température de fusion optimisée, idéale pour le stockage et la restitution de l' énergie thermique [4].

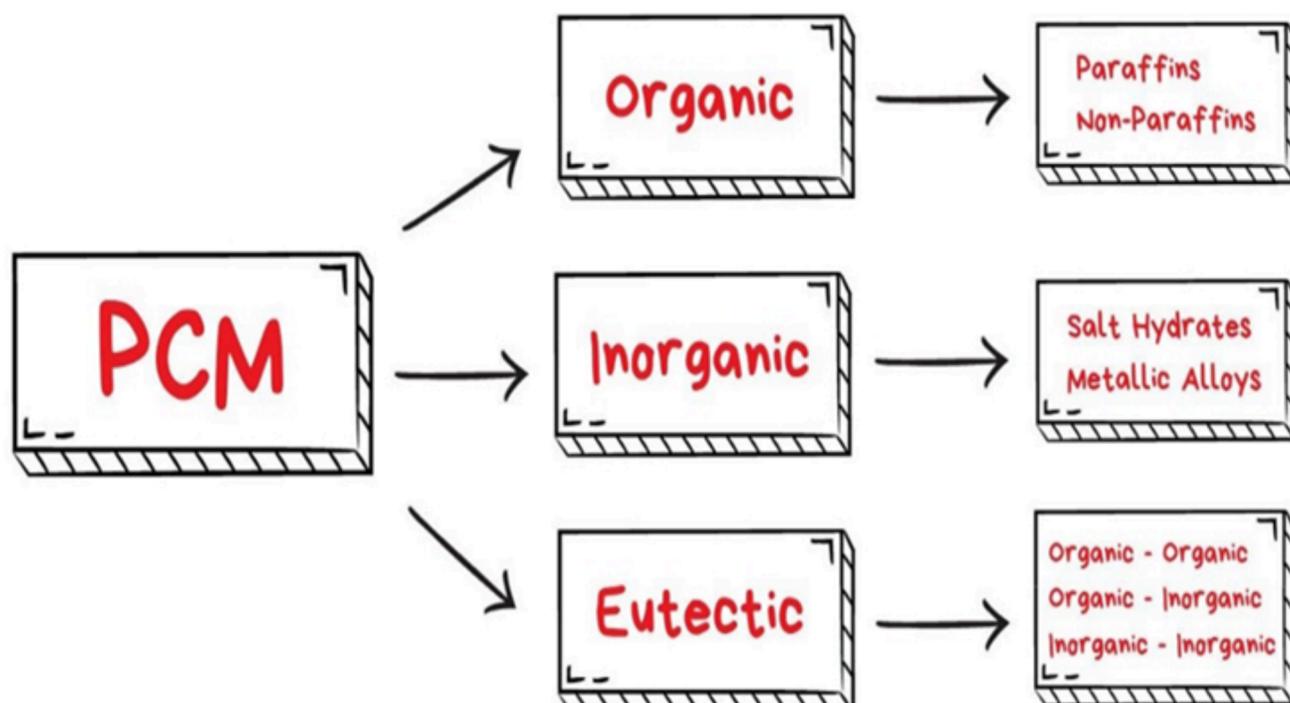


Figure I.2: Types de Matériaux à Changement de Phase (PCM) [7]

1.1.4 Caractéristiques des Matériaux à Changement de Phase (PCM)

Les matériaux à changement de phase (Phase Change Materials - PCM) possèdent plusieurs caractéristiques qui les rendent idéaux pour le stockage de l' énergie thermique. Parmi ces caractéristiques, on trouve :

a) Capacité thermique élevée

Capacité d' absorber une grande quantité d' énergie thermique lors du changement d' état (par exemple, de solide à liquide et inversement) [8].

b) Coût et disponibilité

Les matériaux doivent être facilement disponibles et peu coûteux pour assurer la viabilité économique des applications [8].

c) Température de transition de phase

Le choix du PCM dépend de la température de transition adaptée à l' application, qu' elle soit basse (pour le chauffage et le refroidissement) ou élevée (pour les applications industrielles) [8].

d) Stabilité du changement de phase

Le changement de phase doit être répétitif sans altérer la composition du matériau ni dégrader ses propriétés au fil du temps [8].

e) Conductivité thermique

Une conductivité thermique élevée est préférable pour assurer un échange rapide de chaleur entre le matériau et son environnement. Celle-ci peut être améliorée en ajoutant des matériaux conducteurs comme le graphène ou les métaux [9].

f) Compatibilité chimique et environnementale

Le matériau doit être non toxique, chimiquement stable et respectueux de l' environnement afin de garantir une utilisation sécurisée [9].

Le Tableau représente certaines propriétés thermiques de certains PCM .

	Matériaux	Temperature de fusion (° C)	Enthalpie de fusion (kj/kg)
PCM _s	Eau	0	333.6
Organiques	Stéarate de butyle	19	140
	L'acide caprique – laurique	21	143
PCM _s	KF.4H ₂ O	18.5	231
inorganiques	Mn(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	25.8	125.9
	Na ₂ SO ₄ . 4.10H ₂ O	32	251
PCM _s	66,6%CaCl ₂ .CH ₂ O+33,3%Mgcl ₂ O.6H ₂ O	25	127
Eutectiques	48%CaCl ₂ +4,3%NCl+47,3%H ₂ O	26.8	188
	47%Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O+53%Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	30	136

Tableau I.1: Certaines propriétés thermiques de certains PCM

1.1.5 Conditionnement des PCM

Les matériaux à changement de phase (PCM) peuvent être encapsulés dans de petites billes plastiques et mélangés avec du plâtre ou du béton, ou bien être incorporés dans les pores d'un matériau porteur via un procédé d'imprégnation. La micro-encapsulation consiste à enfermer le PCM dans de petites sphères dont le diamètre est de l'ordre du micromètre, formant ainsi un matériau de stockage appelé « coulis ». En revanche, la macro-encapsulation implique d'emballer le PCM dans des récipients dont la taille varie de quelques centimètres à plusieurs mètres. L'avantage principal de l'encapsulation des PCM est l'augmentation de la surface de transfert thermique. Lane a répertorié plus de 200 matériaux utilisés pour le stockage thermique avec changement de phase dans une plage de température allant de 10 à 90 ° C. [4] Il a également évalué la faisabilité technique et économique de l'utilisation des PCM encapsulés dans des applications de chauffage solaire résidentiel, tout en développant des techniques d'encapsulation dans des contenants métalliques et plastiques. L'intégration de ces PCM sous forme de capsules dans les surfaces pourrait améliorer le stockage d'énergie dans l'enveloppe des bâtiments.



Figure I.3: PCM micro-encapsulés: (a) état liquide et état poudre :(b) image microscopique électronique à balayage de nombreuses capsules [11].

1.1.6 Applications des Matériaux à Changement de Phase

Voici quelques applications des matériaux à changement de phase (PCM) que l'on peut retrouver dans un éventail diversifié d'industries. Voici quelques exemples d'implémentations impressionnantes qui démontrent leur importance.

a) Secteur Médical

Les matériaux thermo-rétractables sont essentiels dans le secteur de la santé pour le transport sécurisé des produits sensibles à la température, [7] tels que les médicaments, les vaccins et autres appareils médicaux. Ces matériaux sont la colonne vertébrale des soins aux patients et des efforts de santé publique essentiels, car ils garantissent l'efficacité et la sécurité des produits de santé critiques en préservant la température nécessaire pendant le transport.

b) Bâtiments Haute Performance

Cachés à l'intérieur des murs—une composante courante des bâtiments—les PCM changent la façon dont nous pensons et concevons les bâtiments économes en énergie en se concentrant sur le secteur de la construction. Ces matériaux aident à contrôler les températures intérieures en absorbant l'excès de chaleur pendant la journée et en la libérant la nuit. Cela signifie une dépendance réduite vis-à-vis des systèmes de chauffage et de refroidissement constants, ce qui entraîne des économies d'énergie substantielles et une empreinte carbone réduite, en accord avec les principes de l'architecture durable.

c) Transport et Logistique de la Chaîne du Froid

La technologie PCM est largement utilisée dans le secteur de la logistique [10], notamment dans le domaine de la logistique de la chaîne du froid. Les PCM sont utilisés pour maintenir des

températures optimales dans les véhicules de réfrigération passive où les denrées périssables sont stockées. L' utilisation active des PCM pendant le transport élimine le besoin de solutions de refroidissement actives, exploitant ainsi l' efficacité énergétique et promouvant la durabilité environnementale en minimisant le risque de détérioration des aliments et des fournitures médicales.

d) Solutions d' Energie Solaire

Les PCM sont également essentiels dans le domaine des énergies renouvelables, en particulier dans les systèmes de chauffage solaire de l' eau. Non seulement augmentent-ils le potentiel de stockage de ces systèmes, mais ils fournissent également efficacement un flux constant d' eau chaude pendant les journées nuageuses. Les PCM permettent une utilisation plus stable et efficace de l' énergie solaire dont la transition est largement prônée comme une alternative énergétique plus propre puisque la chaleur latente peut être utilisée lorsque nécessaire.

I.2 Stockage de l'énergie

I.2.1 Introduction

Les systèmes de stockage de l'énergie thermique utilisent des matériaux à changement de phase (PCM) pour stocker l'énergie thermique pendant les heures creuses et la restituer pendant les heures pleines, réduisant ainsi la consommation et les coûts de l'énergie. Ces systèmes sont couramment utilisés dans les bâtiments, les centrales électriques et les processus industriels pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire les émissions.

II.2.2 Le stockage de l'énergie

Le stockage de l'énergie (ES) est le stockage de l'énergie qui peut ensuite être utilisée pour effectuer une opération utile. Les dispositifs qui stockent l'énergie sont parfois appelés accumulateurs. Toutes les formes d'énergie peuvent être de l'énergie potentielle (telle que l'énergie chimique ou l'énergie gravitationnelle), de l'énergie cinétique, de l'énergie électrique ou de l'énergie thermique, et toutes ces formes d'énergie peuvent être stockées à l'aide de méthodes, de systèmes et de technologies appropriés. En d'autres termes, toutes les formes d'énergie sont elles-mêmes des dispositifs de stockage [12].

II.2.3 Moyens de stockage de l'énergie

II.2.3.1. Sous forme d' énergie chimique

On peut percevoir tout combustible comme une réserve d'énergie sous forme chimique. Lorsqu'il est brûlé, le composé libère de l'énergie sous forme de chaleur pouvant être récupérée et valorisée [13].

a) Stockage inhérent Hydrocarbures

Actuellement, les hydrocarbures liquides sont la forme principale de stockage d'énergie en termes de volume, particulièrement pour le domaine des transports. Les combustibles sont extraits des énergies fossiles et affichent une efficacité de 75% [13] du « point de départ à la pompe ». Les biocarburants, quant à eux, proviennent de la biomasse et présentent un taux de conversion de 70% « de la biomasse à la pompe ».

b) Biomasse

Le terme « biomasse » fait référence à toutes les matières organiques susceptibles de se transformer en sources d'énergie. En ce qui concerne les plantes, c'est une manière de conserver l'énergie solaire : les substances organiques sont dérivées du CO₂ absorbé pendant la photosynthèse. La biomasse peut être exploitée directement (comme le bois-énergie), après avoir été méthanisée pour produire du biogaz, ou à la suite de transformations chimiques supplémentaires pour devenir du biocarburant.

Cependant, cette méthode de stockage d'énergie est longue, s'étalant sur plusieurs mois, et présente un faible rendement. Effectivement, seulement 1% des radiations solaires utilisées durant le processus de photosynthèse est restitué sous forme de biomasse [13].

c) Production d'hydrogène

L'hydrogène, généralement désigné sous le nom de dihydrogène, n'est pas présent à l'état naturel. Toutefois, il est très répandu sur notre planète sous sa forme atomique H (dans l'eau, les hydrocarbures, etc.). Il existe divers procédés de production, tels que le reformage des combustibles fossiles par la vapeur d'eau (à 900° C) et l'électrolyse de l'eau. L'électrolyse, processus de séparation de la molécule d'eau en hydrogène et en dioxygène, requiert de l'électricité (ce qui est avantageux si le coût de production de l'électricité est faible). L'hydrogène est capable de libérer de l'énergie, ce qui le rend particulièrement attrayant comme moyen de stockage.

Il peut être employé directement comme carburant pour les véhicules munis de moteurs à combustion fonctionnant au gaz. Il peut également être emmagasiné pour être ultérieurement transformé en énergie via une pile à combustible, produisant ainsi de l'électricité et de la chaleur. Il est également prévu de l'utiliser pour des applications fixes (électricité et chauffage domestique).

L'hydrogène a l'avantage d'être généré à partir de toutes les sources d'énergie primaire (fossiles, éolien, solaire). Cependant, les systèmes de production d'hydrogène par électrolyse et leur utilisation dans les piles à combustible présentent un coût initial très important, tout en offrant une efficacité globale inférieure à 50% [13]. Par ailleurs, leur longévité s'avère inadéquate dans le contexte d'applications liées au réseau électrique.

II.2.3.2 Sous forme d' énergie thermique

a) Le stockage de chaleur sensible

Le stockage de chaleur sensible est une technique ancienne permettant d' analyser l' énergie sur différentes durées. Il s' agit d' en utilisant une source de chaleur pour augmenter la température d' un matériau sans changer son état. L'idée de base est la suivante : une quantité appropriée de chaleur élève la température d' un matériau « monophasé » (solide ou liquide), stockant ainsi l'énergie sous forme de chaleur perceptible. La restauration de cette chaleur permet à la température du matériau de baisser et libérer l' énergie énergie stockée [14].

$$Q_{\text{sensible}} = m \times C_p \times \Delta T$$

si $T_2 > T_1$ on parlera de stockage du chaud.

si $T_2 < T_1$ on parlera de stockage du froid.

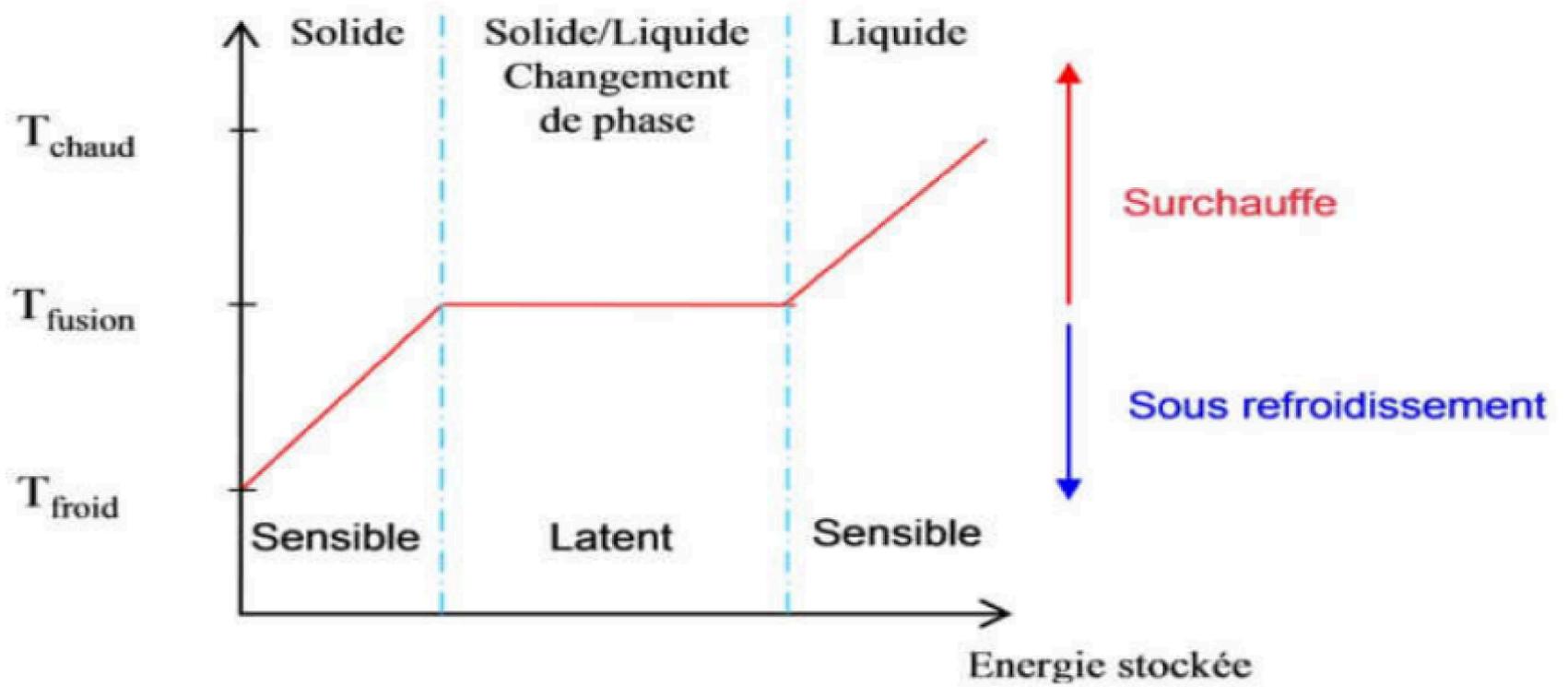


Figure I.4: Profil de changement de phase pour le stockage par chaleur latente [15]

Matériaux	Densité Kg/m ³	Chaleur spécifiques (J/Kg · K)	Capacité thermique volumétrique J/m ³ K
Argile	1458	879	1.28
Brique	1800	837	1.51
Grè	2200	712	1.57
Bois	700	2390	1.67
Béton	2000	880	1.76
Verre	2710	837	2.27
Aluminium	2710	896	2.43
Ferre	7900	452	3.57
Acier	7840	465	3.68
Eau	988	4182	4.17

Tableau I .2. Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20 ° C [15].

b) Le stockage de chaleur latente

La chaleur latente de fusion est une propriété thermodynamique qui définit l' énergie requise pour changer l' état du matériau d' un solide à un liquide ou vice versa. [4] Cette propriété est nécessaire à l' analyse de PCM et de leurs perspectives d' utilisation. Concernant les PCM, la chaleur latente de fusion est critique pour accumuler et relâcher l' énergie concernant le réarrangement de phase.

$$\Delta h_{tot} = \int_{T_1}^{T_f} C_s dT + L_f + \int_{T_f}^{T_2} C_l dT$$

$$Q_{(latent)} = m \times L$$

Ou:

Δh_{tot} : est l' enthalpie massique totale avec changement d' état.

C_s : Capacité thermique massique à l' état solide.

C_l : Capacité thermique massique à l' état liquide.

L_f : Chaleur latente de fusion.

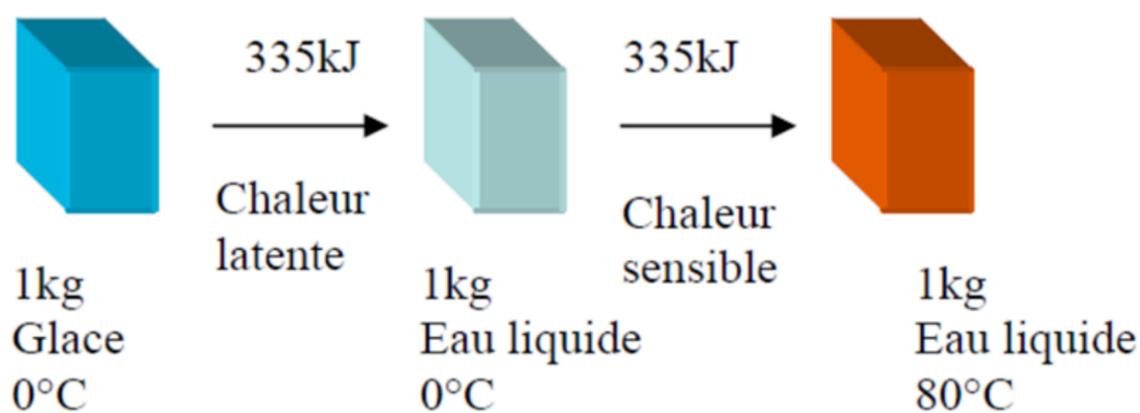


Figure I.5: Equivalence entre la chaleur latente nécessaire pour fondre 1 kg de glace et la chaleur sensible nécessaire pour chauffer l'eau liquide.

II.2.4 Les différentes technologies de stockage thermique

Les différentes technologies de stockage thermique incluent notamment l' hydraulique et l' éolien, qui sont des systèmes axés sur les énergies renouvelables et visent à compenser le décalage entre la production et la consommation d' énergie.

Les différentes technologies disponibles se répartissent selon plusieurs critères :

a) *Le stockage à court terme :*

Permettant d' adapter l' énergie à des besoins variables sur des périodes de l' ordre de la journée (répondre aux besoins de chauffage ou de refroidissement sur une journée par exemple).

b) *Le stockage à long terme (ou stockage saisonnier) :*

Permettant de collecter l'énergie excédentaire produite (l'été par exemple) , pour la restituer au moment requis (l'hiver si l'on parle de systèmes de chauffage urbain à énergie solaire)

c) *Le stockage centralisé :*

(par exemple, un réservoir unique de grande capacité pour un bâtiment ou un réseau)

d) *Le stockage décentralisé :*

(systèmes individuels, à installer au niveau de chaque point de consommation).

Enfin, l' introduction de matériaux à changement de phase (PCM) dans ces systèmes mis en avant des atouts notables d'améliorer significativement la densité énergétique et la stabilité thermique pendant le cycle de stockage-déstockage [9].

A la fois de densité énergétique, et de stabilité thermique au cours du cycle de stockage-
du dé stockage – ce qui s ' avère d'une part notablement plus efficace qu' un stockage thermique par changement d ' état , et ce qui est d ' autre part la solution pertinente pour pallier les enjeux de continuité de service , en déplaçant dans le temps ' les besoins de chauffage ' ou de ' refroidissement ' , tout en participant à l'optimisation des performances d'ensemble .

II.2.5 Comparaison des systèmes de stockage

Les systèmes de stockage fonctionnent généralement selon trois phases clés : la charge, le stockage et la décharge. Il existe une grande variété de supports de stockage, différenciés selon leurs caractéristiques, leur température d' utilisation, le type de conservation requis et le secteur d' application visé, comme l' indiquent H. Mehling et L.F. Cabeza [16].

Le choix du type de stockage dépendra de l'application pour laquelle il sera utilisé. Par exemple, on utilisera généralement les systèmes latents et sensibles comme un moyen de stockage tampon pour équilibrer la production ou retarder l'usage de l'énergie.

Les systèmes de stockage thermochimique seraient plus appropriés pour un stockage à long terme ou saisonnier, qui accumulerait la chaleur produite en surplus par certaines installations durant l'été, afin de la libérer en hiver. Pour cette thèse, l'accent a été mis sur la valorisation interne de la chaleur résiduelle industrielle. Ainsi, l'échelle temporelle est plutôt celle du jour que de la saison.

Stockage sensible	Température(° c)		Capacité calorifique C_p (kj/kg.k)	Masse volumique ρ (kg/m ³)	Densité énergétique (KWh/m ³)
	froid	Chaud			
Sable-rouche-huile	200	300	1.3	1700	61
menirale	200	300	0.85	2200	52
Béton renforcé	200	300	2.6	770	56
Huile mineral Eau	20	80	4.18	1000	70
Nitrates de sels fondus	250	350	1.5	1825	76
Stockage latente	Température de fusion T_{fusion} (° c)		Chaleur latente Δh_{s-1} (kj /kg)	Masse volumique ρ (kg/m ³)	Densité énergétique (KWh/m ³)
Acide maléique	131-140		235	1590	103
Xylitol	95		232	1500	97
MgC12.6H20	118		340	1450	137
NaNO3	117		165	1569	72
	307		172	2260	108

Tableau I.3 : Comparaison des différents types de stockage en fonction de leur densité énergétique[16].

II.2.6 Avantages et inconvénients du stockage d' énergie dans les matériaux à changement de phase (PCM) :

Les matériaux à changement de phase (PCM) présentent divers bénéfices qui les positionnent comme une option prometteuse pour l'accumulation de chaleur. Premièrement, ils ont une grande densité énergétique, associée à la chaleur latente absorbée ou émise lors du changement de phase. En outre, la température demeure presque stable durant cette procédure, facilitant un réglage précis de la température dans les applications thermiques. La variété des PCM disponibles (organiques, inorganiques, eutectiques) offre un large spectre de températures. Des PCM, tels que les paraffines, possèdent une stabilité chimique qui leur permet de résister à un nombre considérable de cycles thermiques sans détériorer notablement leur performance. En fin de compte, ils sont généralement en grande quantité, inoffensifs et assez économiques [9,17].

Toutefois, de nombreux désavantages entravent encore leur déploiement à grande échelle. Le principal défi demeure leur conductivité thermique insuffisante, qui freine le transfert de chaleur et requiert l'intégration de matériaux à conductivité élevée ou de structures

d'amélioration. Quelques PCM montrent aussi des occurrences de sous-refroidissement ou de séparation de phase, notamment dans les sels hydratés. Il est possible que certains matériaux présentent des problèmes de compatibilité chimique avec les réservoirs ou subissent des variations de volume lors d'un changement d'état, compliquant ainsi l'élaboration des systèmes de stockage [17].

II.2.7 Conclusion

Ce chapitre a présenté les matériaux à changement de phase (PCM), leurs principes de fonctionnement, leurs types, et leurs propriétés thermiques. Grâce à leur capacité à stocker l'énergie thermique sous forme de chaleur latente, les PCM sont des solutions prometteuses pour améliorer l'efficacité énergétique dans plusieurs domaines. Malgré leurs avantages, comme la stabilité chimique et l'adaptabilité, certains inconvénients persistent, notamment leur faible conductivité thermique. Ces éléments fondamentaux serviront de base à l'étude technique et à la simulation présentées dans les chapitres suivants

II. Recherche bibliographique

Longeon et al. [18] ont étudié un échangeur de chaleur concentrique utilisé comme système de stockage d'énergie thermique latente, avec de la paraffine RT35 comme PCM. Des simulations numériques réalisées avec FLUENT ont été comparées à des résultats expérimentaux issus d'une boucle d'essai avec visualisation. Une bonne concordance a été observée durant la phase de charge, tandis que des écarts subsistent en phase de décharge, en raison notamment d'une

incertitude sur la capacité thermique spécifique du PCM. La convection naturelle joue un rôle majeur pendant la charge, favorisant la fusion du PCM dans la partie supérieure de l'échangeur, indépendamment du sens d'injection du fluide caloporteur. Les profils de température simulés confirment un transfert de chaleur ascendant par convection naturelle. En phase de décharge, le PCM liquide reste quasi isotherme, ce qui limite les effets convectifs. L'injection par le haut est donc recommandée pour la charge, et par le bas pour la décharge. Toutefois, le rendement global de cet échangeur coaxial reste limité. Des travaux futurs envisagent des solutions d'optimisation, telles que l'utilisation de tubes ailetés ou l'intégration de mousses de graphite afin d'améliorer la conductivité thermique du PCM.

L'étude numérique de Jmal et Baccar [19] concerne le transfert thermique dans un échangeur air-PCM intégrant des tubes à ailettes internes et externes, utilisant de la paraffine C18 comme PCM. L'ajout d'ailettes améliore significativement le transfert thermique, réduisant le temps de décharge et augmentant la température de l'air en sortie. Cependant, lorsque le nombre d'ailettes devient trop élevé (jusqu'à 9), l'effet bénéfique diminue en raison du confinement du PCM liquide, qui restreint la convection naturelle. Durant les deux premières heures, le fluide caloporteur gagne plus de 10 °C. Ensuite, la solidification forme une couche isolante autour des parois et des ailettes, ce qui freine les échanges thermiques. L'épaississement progressif de la phase solide limite la circulation du PCM liquide, rendant le transfert thermique de plus en plus difficile. Après 7 heures, environ 60 % du PCM est solidifié ; à ce stade, la conduction thermique devient le mécanisme dominant, soulignant les limites de ce type de configuration sans optimisation supplémentaire.

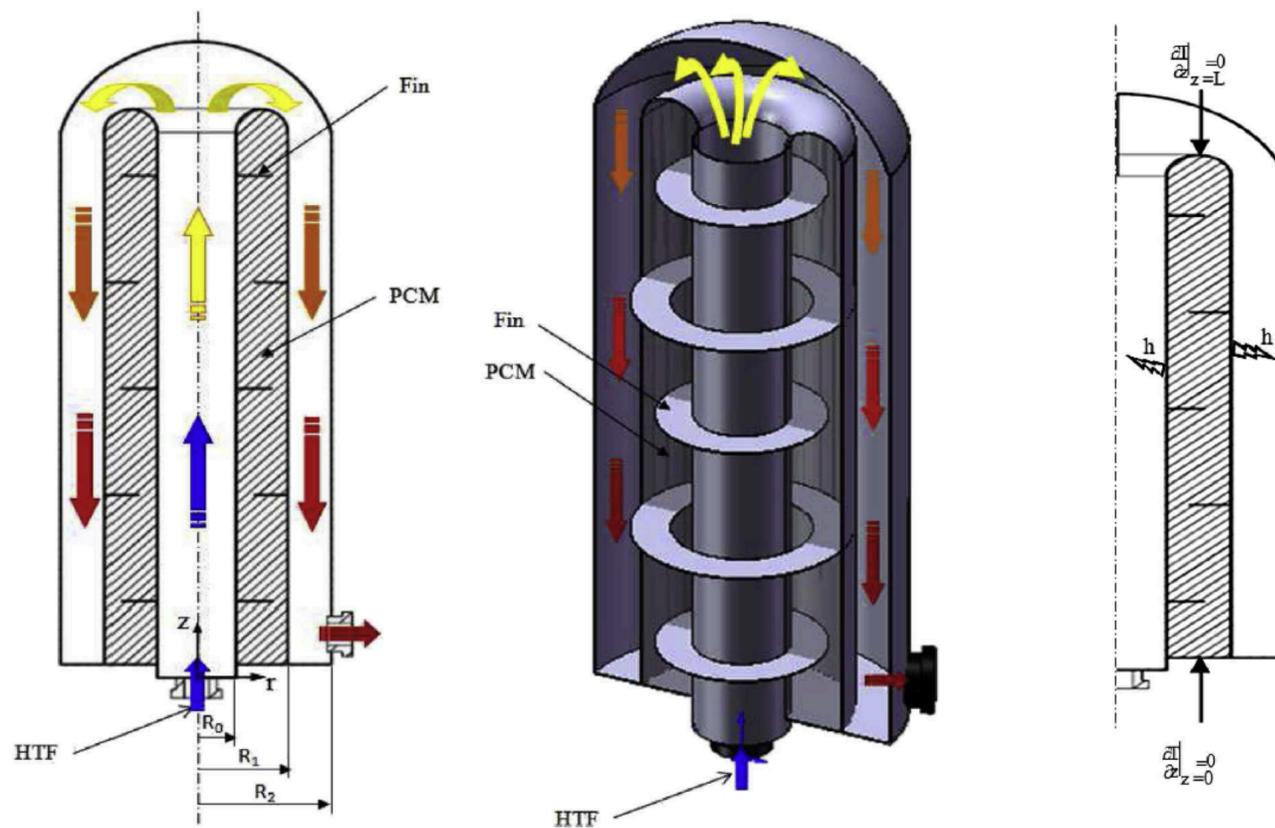


Figure I.6 : Configuration étudiée et domaine de calcul avec les conditions aux limites [5].

Mustafa et al. [20] ont examiné une conception innovante visant à améliorer la convection naturelle dans une unité de stockage d'énergie à chaleur latente (LHSU) de forme rectangulaire. Cette nouvelle configuration consiste à subdiviser la cavité rectangulaire en plusieurs petites partitions (1, 2, 4, 8, 16 et 32), afin de piéger le matériau à changement de phase (PCM) fondu et de générer plusieurs fronts de fusion. Cette stratégie permet d'accélérer le processus de fusion par rapport à une LHSU classique à compartiment unique. Le nombre de partitions a été ajusté en modifiant le rapport d'aspect de la cavité contenant le PCM, avec les valeurs suivantes : 2, 1, 0.5, 0.25, 0.125 et 0.0625. Pour valider le modèle numérique développé sous ANSYS FLUENT, des expériences ont été réalisées sur des unités comportant une et deux partitions. Les simulations ont ensuite été étendues à des configurations avec un plus grand nombre de compartiments. Les résultats ont démontré que la convection naturelle est considérablement intensifiée par la division de la LHSU, ce qui réduit le temps de fusion du PCM. Cependant, un nombre optimal de partitions a été identifié, au-delà duquel les gains deviennent marginaux. L'unité comportant huit partitions (rapport d'aspect de 0.25) s'est révélée la plus efficace. Comparée à l'unité à une seule partition, la réduction du temps de fusion du PCM atteint respectivement 31.2 %, 53.6 %, 65 % et 68 % pour les unités avec 2, 4, 8 et 16 partitions.

Yan Cao et al. [21] ont étudié les systèmes de stockage d' énergie thermique à chaleur latente (LHTES), connus pour leur capacité à stocker de grandes quantités d' énergie sous forme de chaleur latente. Néanmoins, peu de travaux ont exploré les méthodes d' échange thermique optimisées avec ces systèmes. Dans cette étude, la convection naturelle d' un mélange d' eau et de matériaux à changement de phase nano-encapsulés (NEPCM), à l' intérieur d' un milieu poreux, est utilisée pour transférer la chaleur entre un courant d' eau froide et un réservoir chaud rempli de PCM. Les NEPCM, constitués d' un cœur en PCM enveloppé d' une coque solide, influencent fortement les propriétés de transfert thermique lorsqu' ils sont ajoutés à l' eau. Plusieurs configurations ont été simulées à l' aide de la CFD afin d' évaluer l' effet de la concentration de NEPCM, de la porosité du milieu poreux et de la localisation de la zone de changement de phase sur le flux thermique moyen du réservoir. Les résultats indiquent qu' une augmentation de la porosité de 0.85 à 0.95 entraîne une diminution du flux thermique moyen de 13.8 %. En revanche, l' ajout de 3 % de NEPCM améliore ce flux de 22.2 % (pour une porosité de 0.85) et de 18.4 % (pour une porosité de 0.95).

Dounia Chaatouf et al. [22] ont analysé un séchoir solaire à convection naturelle intégré à une unité de stockage thermique composée de tubes en cuivre remplis de cire de paraffine comme PCM. L' étude a été menée à la fois expérimentalement et numériquement à l' aide du logiciel ANSYS Fluent.

L' unité de stockage a été installée dans une chambre plénum latérale pour assurer une distribution homogène de l' air et optimiser la récupération de chaleur. La validation des résultats (température de la chambre de séchage, température de sortie de l' air, vitesse dans le capteur solaire) a montré une bonne concordance avec les données expérimentales, confirmant l' efficacité du modèle numérique.

Le séchage de tranches d' orange a été comparé dans trois configurations : séchage en plein air, séchoir solaire sans PCM, et séchoir solaire avec PCM. Le temps nécessaire pour réduire l' humidité des tranches de 81.19 % à 19 % (base humide) était respectivement de 216 heures, 168 heures et 144 heures.

Concernant la qualité du produit final (couleur, texture, forme, odeur), les résultats ont été meilleurs dans le séchoir solaire, en particulier avec l' intégration des tubes à PCM. La teneur

en vitamine C a également été préservée : une tranche fraîche contenait 11.34 mg, contre 7.77 mg (avec PCM), 7.34 mg (sans PCM), et seulement 5.99 mg après séchage en plein air.

Bin Ding et al. [23] ont développé un tampon thermique à base de matériau à changement de phase (PCM) capable de prévenir efficacement la surchauffe des dispositifs électroniques fonctionnant de manière intermittente, tout en prolongeant la durée de fonctionnement de dispositifs électroniques jetables. Ils ont proposé un PCM composite innovant, constitué de barres d'alliage à basse température de fusion incorporées dans de la paraffine pure, afin d'améliorer à la fois la conductivité thermique et la convection naturelle lors de la fusion. L'étude expérimentale porte sur l'influence du flux thermique, de la hauteur de remplissage et de la fraction massique d'alliage sur la température transitoire des dispositifs électroniques et sur le temps de protection effectif du tampon thermique. Les résultats montrent que, dans une première phase, la conduction thermique est renforcée par l'insertion des barres d'alliage, tandis que, dans une seconde phase, l'écoulement des gouttelettes d'alliage intensifie la convection naturelle, retardant significativement l'élévation de la température en surface. Des corrélations ont été établies (avec une erreur maximale entre 46 et 126 secondes) pour prédire la performance du tampon thermique vis-à-vis des dispositifs électroniques. À l'avenir, des approches comme la perturbation des couches limites de convection par des mécanismes à ressort ou à remontoir sont suggérées pour ajuster plus finement les performances thermiques.

Hassan et al. [24] ont étudié la convection naturelle dans une cavité en forme de U équipée de déflecteurs, remplie d'un mélange eau-NEPCM, avec une paroi inférieure oscillante et un champ magnétique incliné. En utilisant la méthode des éléments finis couplée à l'approche lagrangienne-eulérienne arbitraire (ALE), ils ont exploré les effets de divers paramètres : nombre de Rayleigh (10^3 – 10^5), nombre de Stefan (0.1– 0.9), température de fusion, fraction volumique de nanoparticules (0.01– 0.04), amplitude d'oscillation (0,07– 0,2), nombre de Hartmann (0– 20) et angle du champ magnétique (0° – 90°). Les résultats montrent que le nombre de Rayleigh est le facteur le plus influent, augmentant le nombre de Nusselt moyen de 129.8 %. L'ajout de nanoparticules améliore aussi le transfert thermique, avec une hausse de 58.9 % du Nusselt. Une amplitude d'oscillation de 0.07 optimise le transfert de chaleur, tandis que des valeurs supérieures le réduisent. Cette étude offre des orientations précieuses pour le design de systèmes thermiques à base de NEPCM dans des configurations complexes.

Goud et al. [25] ont analysé la performance thermique de systèmes de stockage d' énergie à chaleur latente (LHTES) intégrant des surfaces étendues (ailettes) en conditions dominées par la conduction ou la convection. En utilisant un modèle numérique fondé sur la méthode enthalpie-porosité, ils ont évalué l' influence de la géométrie des ailettes, de leur espacement et des propriétés du PCM sur la dynamique de fusion. Les résultats montrent que, sous régime conductif, le transfert thermique est lent et symétrique, avec un différentiel de température de 8.2°C et une fraction liquide 18 % plus faible après 3000 s. En revanche, la convection naturelle permet d' augmenter de 27 % la fraction liquide à 2000 s, et le coefficient de transfert thermique est amélioré d' un facteur 1,5. Les ailettes hexagonales surpassent les rectangulaires avec une vitesse de fusion 18 % plus élevée et une efficacité de stockage 12 % supérieure. Une densité optimale d' ailettes réduit de 40 % le temps de fusion, tandis qu' un excès provoque une congestion thermique. Enfin, les PCM à forte conductivité thermique réduisent le temps de fusion de 25 % sous fort flux thermique.

Ilias Benyahia et al. [26] ont évalué les performances de fusion d' un système LHTES innovant de type calandre-tube intégrant un PCM à base de paraffine dopée par des nanoparticules de cuivre (Cu-NP), avec un tube triangulaire muni d' ailettes. L' approche combine optimisation géométrique (excentricité, inclinaison) et amélioration des propriétés thermophysiques (teneur en Cu-NP). Le modèle numérique développé analyse les effets de la concentration en Cu-NP (0– 8 %), de l' excentricité (haut/centre/bas) et de l' angle d' inclinaison (0° , 60° , 90°) sur la fraction fondue, les nombres de Nusselt et de Bejan. Les résultats révèlent que l' inclinaison à 60° réduit le temps de fusion de 42 %, et une excentricité basse le réduit de 58 %. L' ajout de Cu-NP améliore la conductivité thermique mais a un effet modéré sur la fraction fondue. La convection naturelle domine en haut du tube, la conduction en bas. Le meilleur compromis est obtenu avec 4 % de Cu-NP, une inclinaison de 60° et une excentricité basse, confirmant que l' optimisation géométrique surpasse l' effet des nanoparticules.

Bahoosh et al. [27] ont analysé numériquement l' effet du nombre et de la hauteur d' ailettes cylindriques (pin fins) sur le transfert thermique et le temps de fusion dans une enceinte PCM chauffée par de l' eau chaude. L' enceinte ($480 \times 240 \times 60$ mm) contenait entre 21 et 63 ailettes (diamètre 10 mm), réparties à différentes hauteurs (30, 42, 56 mm), toutes en acier St37. Les résultats indiquent que 63 ailettes de 56 mm permettent d' augmenter le taux de transfert

thermique de 59.65 % et de réduire le temps de fusion de 36.6 % pour 1 kg de PCM. L'augmentation du nombre d'ailettes est plus efficace que celle de leur hauteur. Cette amélioration est attribuée à l'augmentation de la surface de contact et à l'intensification de la convection naturelle due aux tourbillons dans l'enceinte.

Hua-Yang Liu et al. [28] ont mené une étude numérique sur l'interaction entre conduction et convection thermique dans des unités de stockage d'énergie à ailettes longitudinales de différentes longueurs, utilisant le PCM RT42. Ils ont exploré l'influence des formes de conteneurs (rectangulaire, trapézoïdale, heptaédrique) et de l'épaisseur des ailettes. Les résultats montrent que le conteneur heptaédrique avec ailette rectangulaire (épaisseur 0.2 mm) réduit le temps de fusion de 10.26 % par rapport au modèle rectangulaire, et augmente de 11.1 % le taux de stockage thermique. Une augmentation excessive de l'épaisseur des ailettes nuit au transfert thermique. L'étude montre également que les ailettes triangulaires sur conteneur heptaédrique offrent les meilleures performances, avec un gain de 13.16 % sur le temps de fusion et 13.7 % sur le stockage thermique par rapport à une configuration de base rectangulaire. Toutefois, les configurations rectangulaires présentent un avantage en solidification, surtout lorsqu'elles sont équipées d'ailettes triangulaires.

CHAPITRE II

Configuration et Formulation

Mathématique

II.1 Configuration

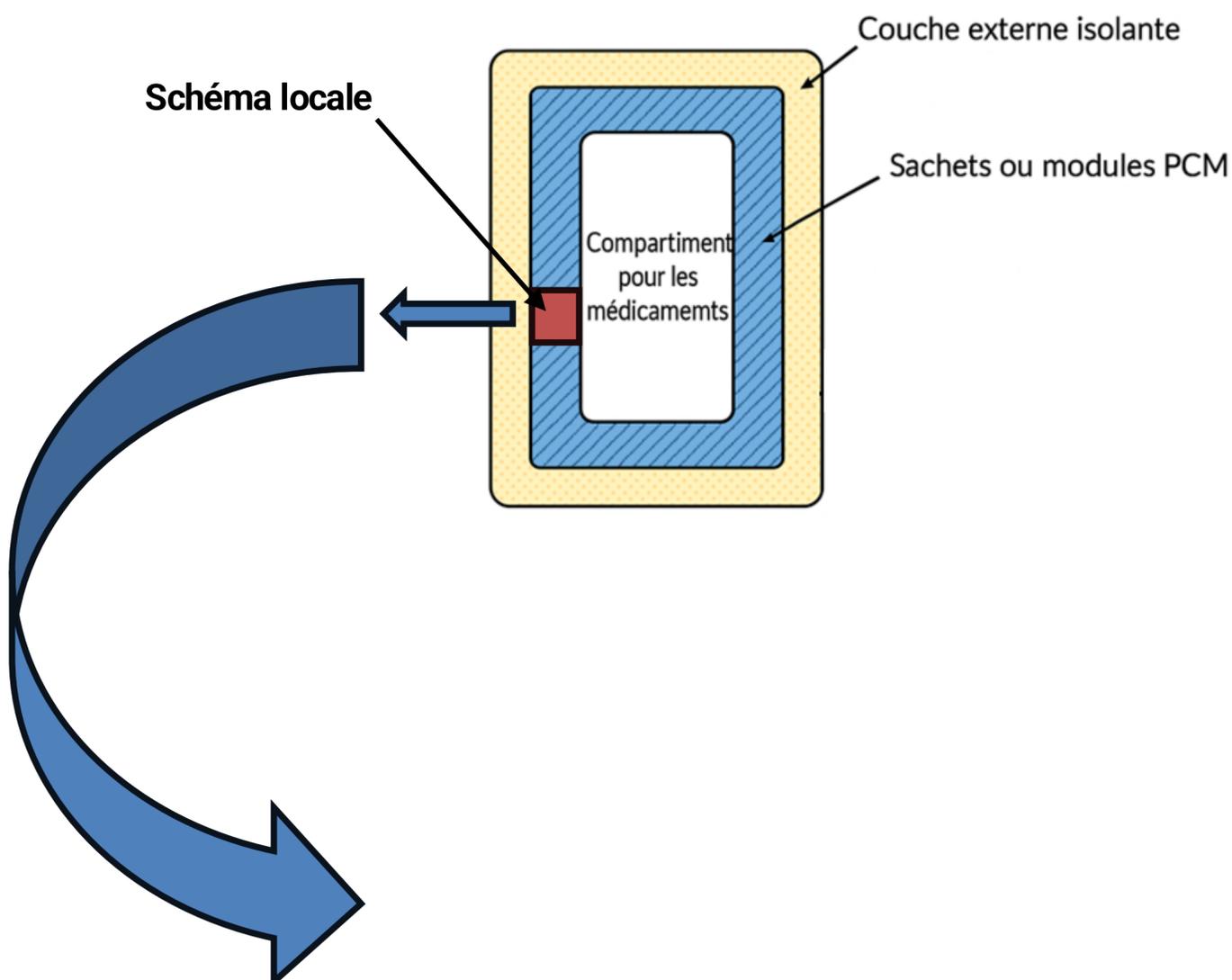
II.1.1 Introduction

Ce chapitre détaille la forme géométrique de la pochette thermique qui devra transporter les médicaments incluant les matériaux à changement de phase et, le modèle mathématique du transfert thermique à l'intérieur du système. Le but est de calculer les performances thermiques du dispositif afin d'en assurer le maintien des médicaments à l'intérieur de la température requise.

II.1.2 Configuration géométrique du système :

La pochette étudiée se compose des éléments suivants :

- On retrouve en extérieur un isolant (mousse ou tissu thermique), servant à limiter les flux thermiques avec l'environnement, un compartiment central à médicaments et des sachets ou modules PCM autour du compartiment interne.
- Ces PCM sont ajoutés pour absorber ou libérer de la chaleur afin de maintenir la température à l'intérieur.



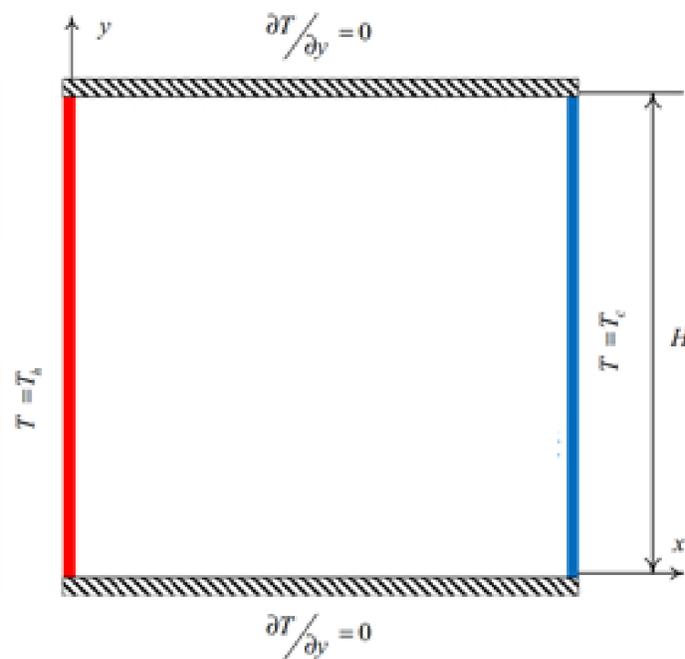


Figure II.1: Compartiment pour les médicaments

II.1.3 Hypothèses :

Dans cette étude, les équations de conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie sont simplifiées en tenant compte des hypothèses suivantes :

1. L'écoulement est bidimensionnel (2D).
2. Le fluide est supposé Newtonien.
3. Le fluide est considéré pur, homogène et isotrope à propriétés physiques constantes où chaque phase est caractérisée par (ν, ρ, c_p, k) .
4. L'approximation de Boussinesq est valide : la masse volumique est supposée constante dans tous les termes des équations de quantité de mouvement, sauf dans le terme de gravité suivant y , où elle est exprimée par : $\rho = \rho_0 [1 - \beta (T - T_c)]$
5. Aucune génération de chaleur interne ($\dot{q} = 0$) n'est considérée, et la dissipation visqueuse est supposée négligeable ($\Phi = 0$).

II.2 Formulation Mathématique :

II.2.1 Equation de conservation de masse

a) Equation de continuité

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

b) Equations de quantité de mouvement

suivant x :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + S_u$$

(II. 2)

suivant y :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g\beta(T - T_c) + S_v$$

(II. 3)

c) Les termes de Darcy sont :

$$\begin{aligned} S_u &= - \xi \frac{(1-f)^2}{(fl^3 + \varepsilon)} u \\ S_v &= - \xi \frac{(1-f)^2}{(fl^3 + \varepsilon)} v \end{aligned}$$

(II. 5)

d) Equation d' énergie

$$\frac{\partial}{\partial t} (c_p T) + \frac{\partial}{\partial x} (u c_p T) + \frac{\partial}{\partial y} (v c_p T) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{\rho_0} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{\rho_0} \frac{\partial T}{\partial y} \right)$$

(II. 6)

En introduisant l'enthalpie $h = c_p T$ et l'enthalpie de la phase solide $h_s = c_s T$, l'équation

d'énergie sera :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u h) + \frac{\partial}{\partial y} (v h) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{\rho_0 c_s} \frac{\partial h_s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{\rho_0 c_s} \frac{\partial h_s}{\partial y} \right)$$

(II. 7)

Où encore :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (h) + \frac{\partial}{\partial x} (u h) + \frac{\partial}{\partial y} (v h) &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{\rho_0 c_s} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \\ &+ \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{\rho_0 c_s} \frac{\partial (h_s - h)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{\rho_0 c_s} \frac{\partial (h_s - h)}{\partial y} \right) \right\} \end{aligned}$$

(II. 8)

II.2.2 Conditions initiales et aux limites (hydrodynamiques et thermique)

$$\text{à } t = 0, u = v = 0, \quad h = c_s T_c$$

à $t > 0$,

$$x = 0, \quad 0 \leq y \leq H, \quad u = v = 0, \quad h = c_s T_m + L + c_l (T_h - T_m)$$

$$x = L, \quad 0 \leq y \leq L, \quad u = v = 0, \quad h = c_s T_c$$

$$y = 0, \quad 0 \leq x \leq L, \quad u = v = 0, \quad \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.12})$$

12)

$$y = H, \quad 0 \leq x \leq L, \quad u = v = 0, \quad \frac{\partial h}{\partial y} = 0$$

II.2.3 Simulation de la situation expérimentale avec la fusion du Gallium :

Dans ce travail, le modèle numérique adopté est appliqué à la fusion du gallium sous l'effet de la convection naturelle, et les résultats obtenus sont comparés aux résultats expérimentaux et numériques de Beckermann [29]. Le gallium est une substance fréquemment utilisée dans les expériences en raison de sa faible température de fusion ($T_m = 302.78 \text{ K}$) et de ses propriétés physiques bien connues. Le tableau 1 présente les valeurs des propriétés physiques du gallium (en phases solide et liquide), ainsi que d'autres données pertinentes relatives à l'expérience menée. La température de la paroi chaude est fixée à $T_h = 310 \text{ K}$, tandis que celle de la paroi froide est $T_c = 293 \text{ K}$. La température initiale du solide est $T_i = T_c$.

Les propriétés du gallium liquide pour des températures comprises entre la température de fusion $T_m = 302.78 \text{ K}$ et la température de la paroi chaude $T_h = 310 \text{ K}$ sont présentées dans le tableau II.1 :

Propriété	Symbole	valeur	Unité
Masse volumique	ρ_l	6094.7	$kg.m^{-3}$
Chaleur spécifique	C_l	397.6	$J.kg^{-1}.K^{-1}$

Viscosité cinématique	ν_l	0.00192	[kg/(m.s)]
Conductivité thermique	k_l	31.24	$W.m^{-1}.K^{-1}$
Coefficient d'expansion thermique	β_l	0.000127	K^{-1}
La chaleur latente de fusion		80160	J/kg
Température de fusion	T_m	302.78	(K)

Tableau II.1: Propriétés thermo-physiques de gallium liquide [30].

De même, les propriétés thermo-physiques du gallium solide pour des températures comprises entre la température de la paroi froide $T_c = 293$ K et la température de fusion $T_m = 302.78$ K sont présentées dans le tableau II.2 :

Propriété	Symbole	Valeur	Unité
Masse volumique	ρ_s	6094.7	$kg.m^{-3}$
Chaleur spécifique	C_s	397.6	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
Conductivité thermique	k_l	31.24	$W.m^{-1}.K^{-1}$

Tableau II.2: Propriétés thermo-physiques de gallium solide [30]

Afin de mener à bien la simulation numérique de la solidification/fusion du paraffine, il est indispensable de disposer de ses propriétés thermo-physiques. Le tableau ci-dessous présente les principales caractéristiques thermiques et physiques du matériau utilisé dans cette étude. Ces données sont nécessaires pour paramétrer correctement le modèle dans le logiciel ANSYS Fluent, notamment dans le cadre de la méthode enthalpique utilisée pour modéliser le changement de phase. Les propriétés incluent notamment la masse volumique,

la capacité thermique massique, la conductivité thermique, la température de fusion, ainsi que la chaleur latente de fusion. La paraffine a été choisie en raison de sa température de changement de phase compatible avec les applications de stockage thermique à basse température, et pour sa large disponibilité ainsi que sa stabilité chimique.

Propriété	Symbole	Valeur	Unité
Masse volumique	ρ_l	770	$kg.m^{-3}$
Chaleur spécifique	C_l	2000	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
Viscosité cinématique	ν_l	0,004	[kg/(m.s)]
Conductivité thermique	k_l	0.2	$W.m^{-1}.K^{-1}$
Coefficient d'expansion thermique	β_l	0.0008	K^{-1}
La chaleur latente de fusion		175000	J/kg
Température de fusion	T_m	277.15	(K)

Tableau II.3: Propriétés thermo-physiques de paraffine RT-4 [31].

II.2.4 Conclusion

Ce chapitre a permis de définir la configuration géométrique du système étudié, à savoir une pochette thermique contenant des matériaux à changement de phase (PCM) destinée au transport de médicaments. En s'appuyant sur un ensemble d'hypothèses physiques réalistes, un modèle mathématique a été formulé, incluant les équations de conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie, ainsi que les conditions aux limites correspondantes.

Les propriétés thermo-physiques des matériaux utilisés, notamment le gallium et la paraffine, ont été présentées afin de permettre une modélisation précise dans le cadre des

simulations numériques. Cette base théorique constitue un préalable essentiel pour l'analyse des résultats numériques présentée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III

Méthode numérique

III .1 Introduction

Après l'établissement du modèle mathématique et la sélection des propriétés thermophysiques appropriées des matériaux à changement de phase (PCM), ce chapitre est consacré à la présentation des résultats numériques obtenus à l'aide du logiciel ANSYS Fluent.

Dans un premier temps, une simulation a été réalisée en utilisant le gallium, dans le but de valider le modèle numérique par comparaison avec les résultats expérimentaux de R. Viskanta. Cette étape a permis de vérifier la pertinence de l'approche adoptée pour modéliser le transfert thermique et le changement de phase dans le système étudié.

Une fois le modèle validé, l'étude a été orientée vers l'application spécifique de ce travail, à savoir la simulation d'un système thermique contenant une paraffine sélectionnée, destinée à une pochette médicale pour le transport de médicaments. Cette simulation vise à analyser le comportement thermique du PCM choisi et à évaluer sa capacité à maintenir une température stable dans la plage requise.

Ce chapitre présente ainsi les principaux résultats obtenus, tant pour le gallium que pour la paraffine, sous forme de figures, de distributions de température et d'évolution de la phase, accompagnés d'une analyse critique fondée sur les exigences thermiques et fonctionnelles du système.

III.2 Effet de maillage

Afin de garantir la stabilité de la solution numérique et de vérifier l'indépendance des résultats vis-à-vis de la taille du maillage, une étude de levé de maillage a été réalisée en testant plusieurs densités.

Des maillages carrés de tailles différentes ont été utilisés : 70×70 , 100×100 , 150×150 , ainsi que des maillages plus fins.

Les résultats ont montré que le maillage 70×70 n'était pas suffisant, car il ne donnait pas des résultats stables ni cohérents, ce qui indique que le nombre de cellules était trop faible pour représenter correctement les phénomènes physiques.

Avec le maillage 100×100 , les résultats ont commencé à se stabiliser et à devenir cohérents, ce qui suggère que l'on commence à atteindre l'indépendance numérique par rapport au maillage.

Le maillage 150×150 a donné des résultats presque identiques à ceux du maillage 100×100 , confirmant ainsi que les résultats sont devenus indépendants de la taille du maillage à partir de ce niveau.

Cependant, lorsque des maillages plus fins (par exemple 200×200 ou plus) ont été utilisés, une dégradation des résultats a été observée. Cela peut être dû à des erreurs numériques ou à des problèmes de convergence causés par des cellules très petites.

En conclusion, le maillage 100×100 a été adopté pour toutes les simulations finales, car il représente un bon compromis entre la précision des résultats et le temps de calcul.

III.3 Choix du maillage :

Dans le but d'améliorer la précision et la stabilité des résultats, un maillage quadrilatéral structuré en plusieurs blocs a été adopté. Après plusieurs tests de convergence, un maillage uniforme de 10000 cellules a été retenu, comme illustré à la figure (III.1).

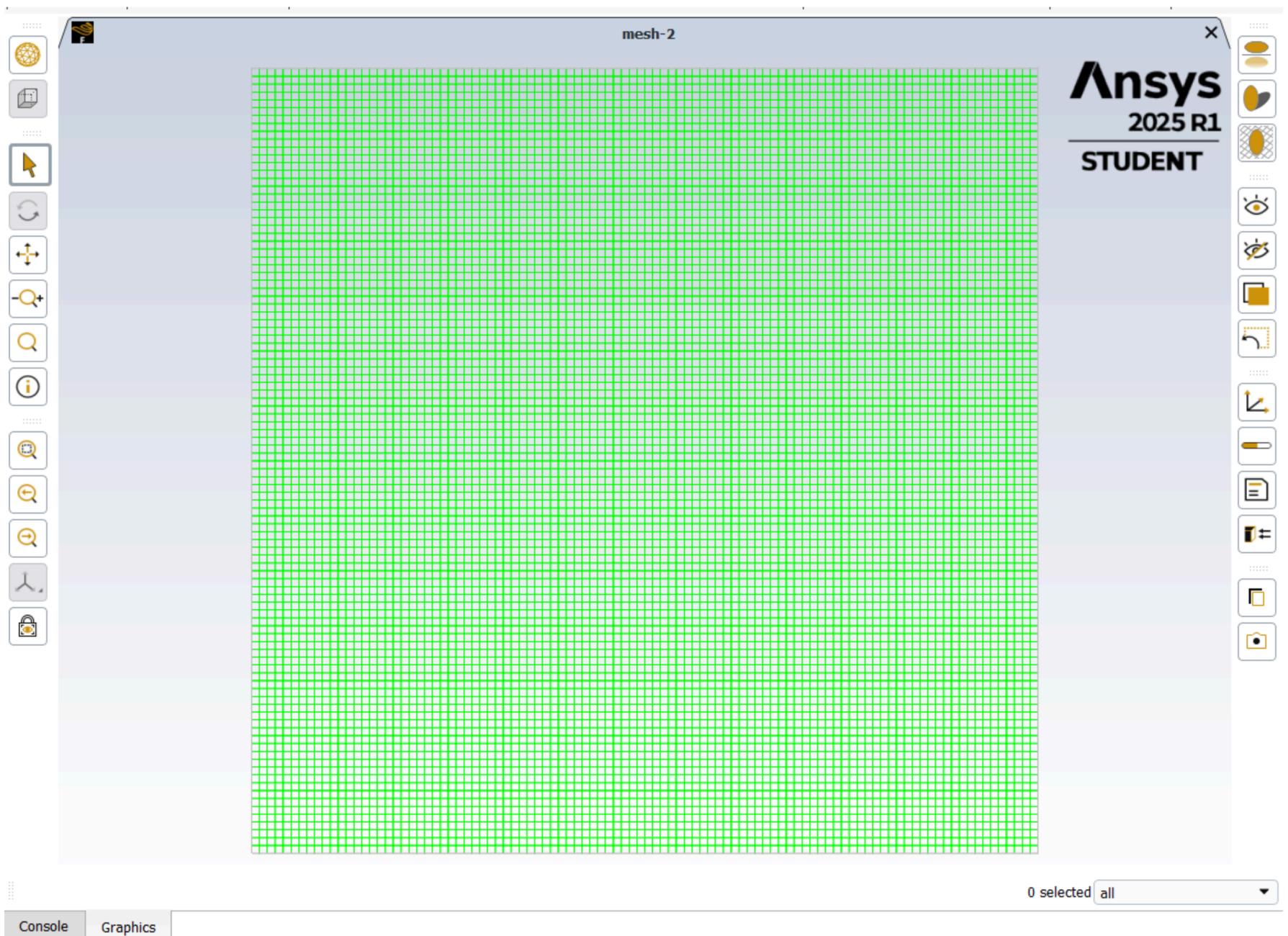


Figure III.1: maillage.

Afin de simuler le transfert thermique couplé au changement de phase, une série de configurations a été mise en place dans l' environnement de calcul ANSYS Fluent, comme détaillé ci-dessous :

III.4- Etapes de travail sur ANSYS Fluent

1. Configuration du modèle

La simulation a été réalisée en deux dimensions (2D), en régime transitoire.

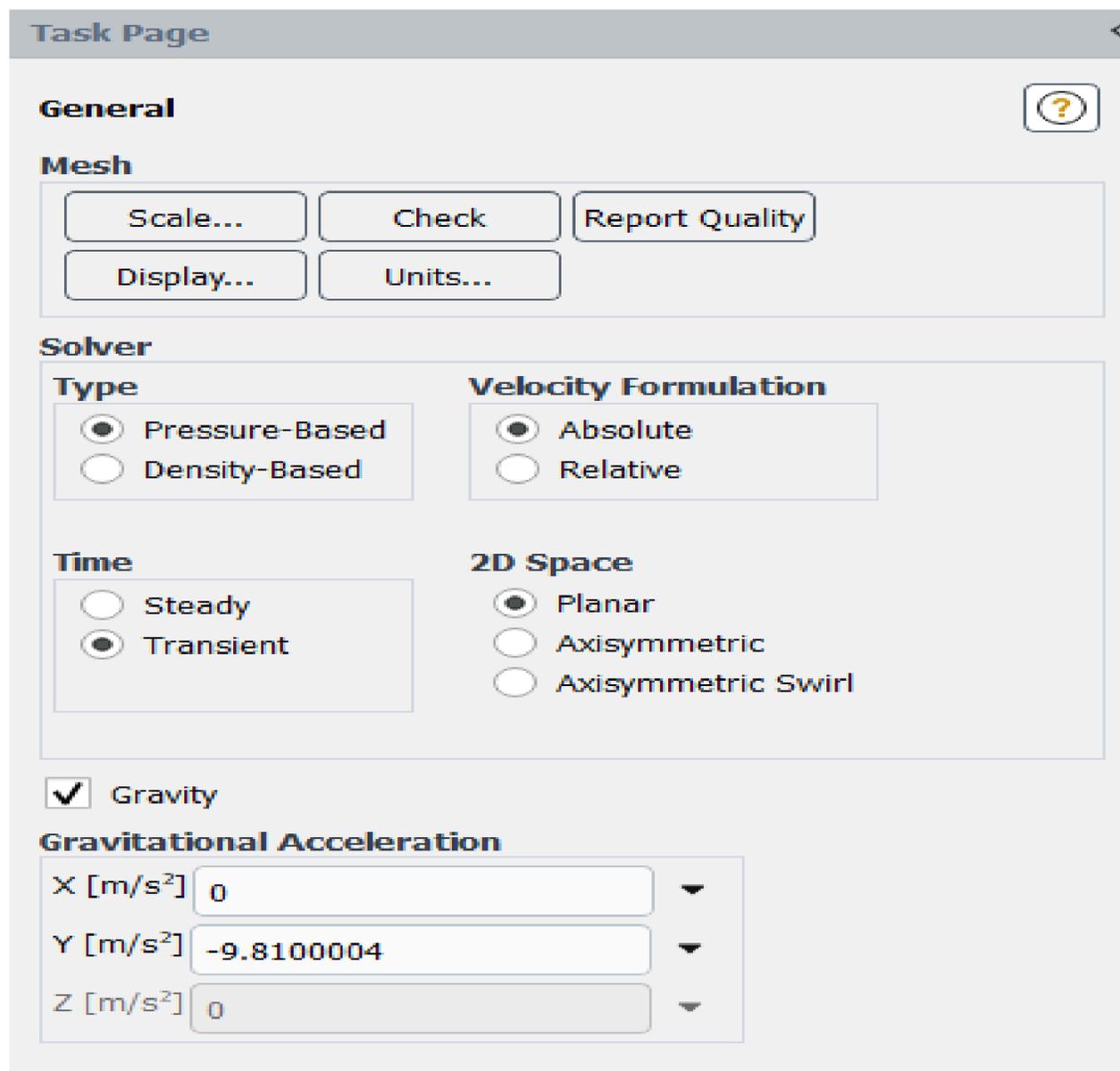


Figure III.2: Caractéristiques générales.

La méthode numérique utilisée est implicite d'ordre un dans le temps (1st-Order Implicit), avec un écoulement laminaire visqueux.

Schéma de discrétisation :

Pour la pression, nous avons utilisé le schéma Presto.

Pour la discrétisation spatiale (les quantités de mouvement et l'énergie), nous avons utilisé le schéma du second ordre Upwind.

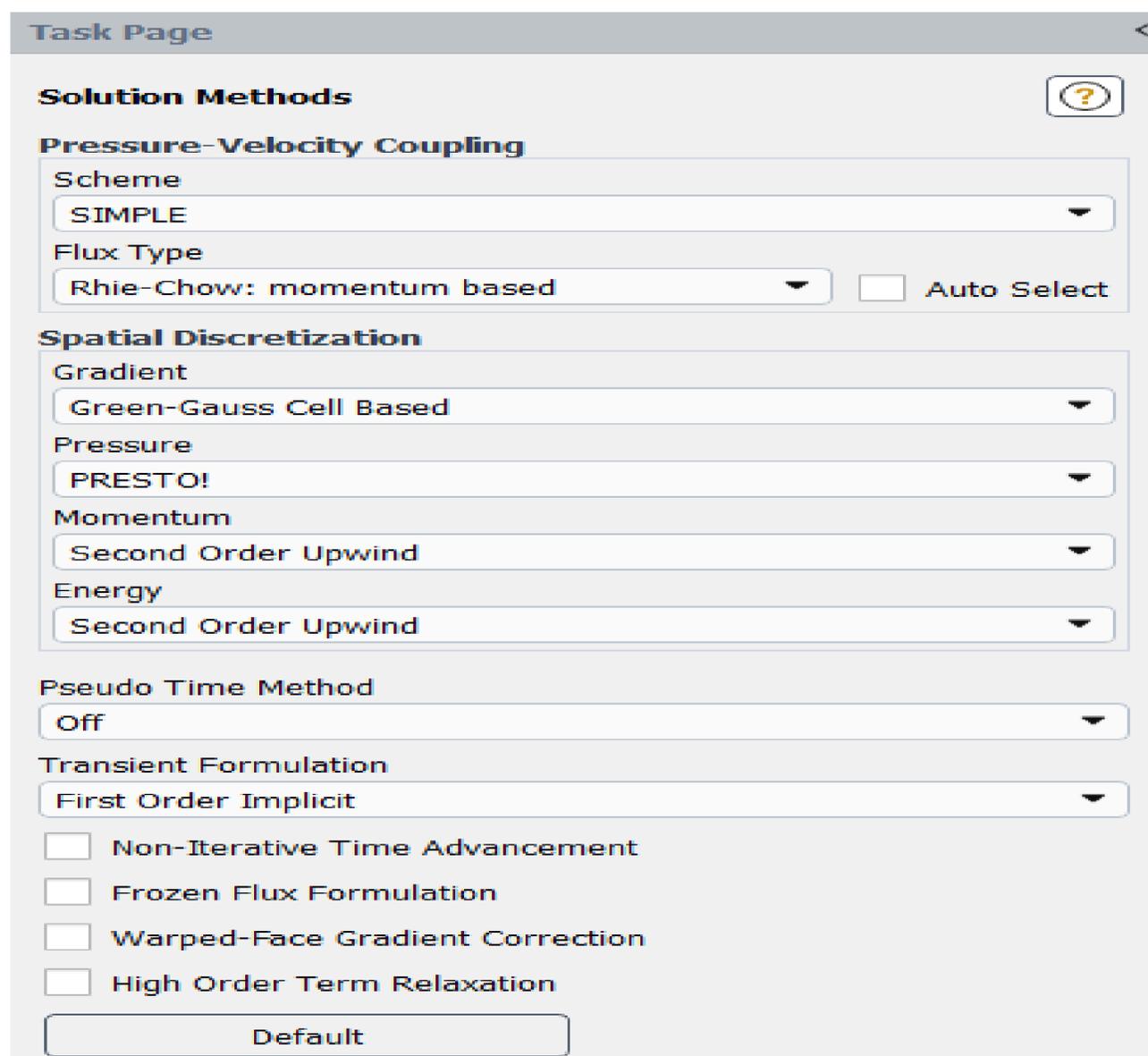


Figure III.3: Méthode de Solution.

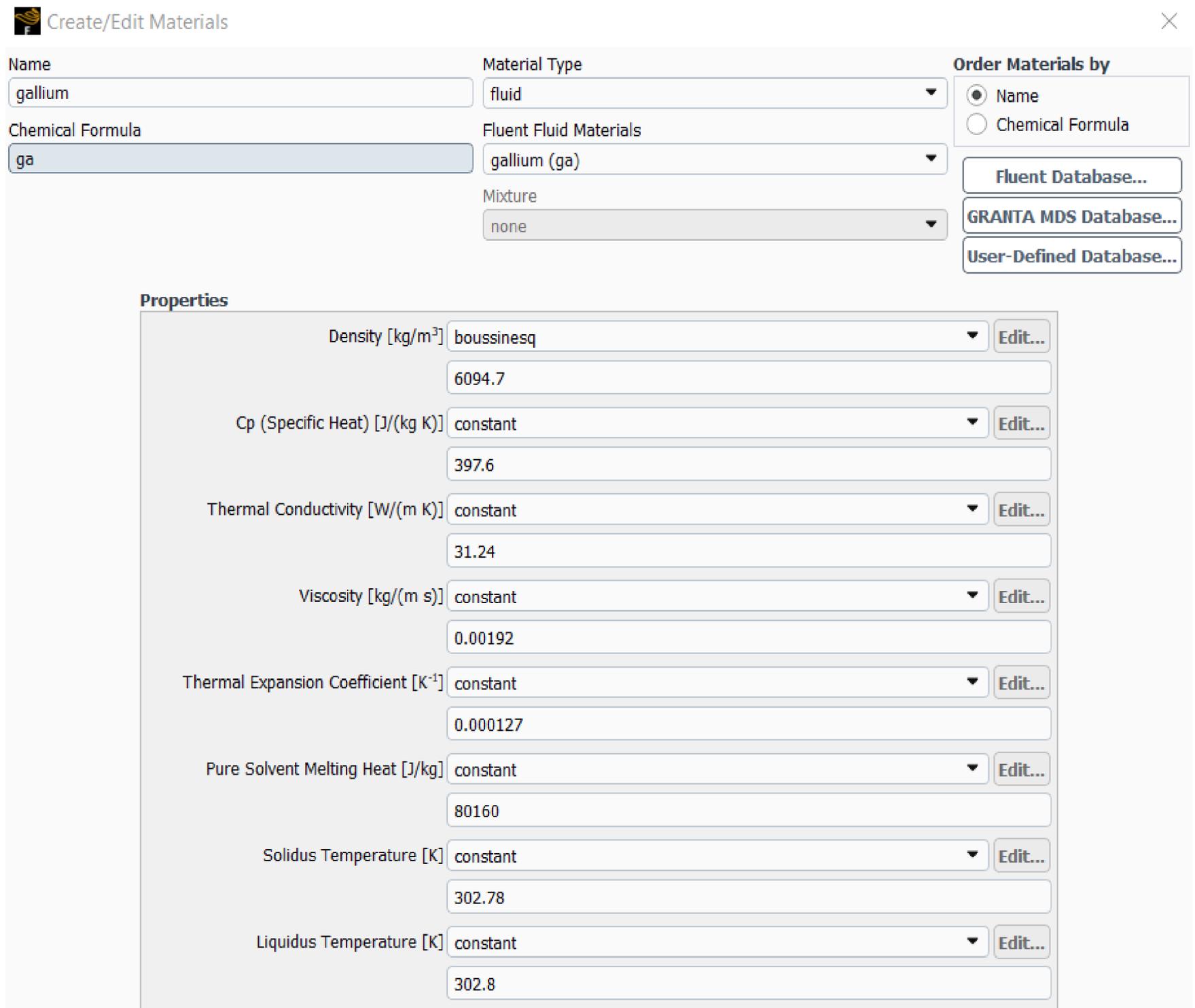
Les modules de transfert de chaleur ainsi que de solidification/fusion et l' équation d' énergie ont été activés pour modéliser correctement le phénomène physique étudié.



Figure III.4: caractéristiques du Modèles.

2. Définition des matériaux

Les matériaux ont été sélectionnés à partir de la base de données du logiciel lorsqu' ils étaient disponibles. Dans le cas contraire, leurs propriétés thermo-physiques ont été introduites manuellement selon les besoins spécifiques de la simulation.



Create/Edit Materials

Name:

Material Type:

Order Materials by: Name Chemical Formula

Chemical Formula:

Fluent Fluid Materials:

Mixture:

Fluent Database...
GRANTA MDS Database...
User-Defined Database...

Properties

Density [kg/m ³]	<input type="text" value="boussinesq"/>	<input type="text" value="6094.7"/>	<input type="button" value="Edit..."/>
Cp (Specific Heat) [J/(kg K)]	<input type="text" value="constant"/>	<input type="text" value="397.6"/>	<input type="button" value="Edit..."/>
Thermal Conductivity [W/(m K)]	<input type="text" value="constant"/>	<input type="text" value="31.24"/>	<input type="button" value="Edit..."/>
Viscosity [kg/(m s)]	<input type="text" value="constant"/>	<input type="text" value="0.00192"/>	<input type="button" value="Edit..."/>
Thermal Expansion Coefficient [K ⁻¹]	<input type="text" value="constant"/>	<input type="text" value="0.000127"/>	<input type="button" value="Edit..."/>
Pure Solvent Melting Heat [J/kg]	<input type="text" value="constant"/>	<input type="text" value="80160"/>	<input type="button" value="Edit..."/>
Solidus Temperature [K]	<input type="text" value="constant"/>	<input type="text" value="302.78"/>	<input type="button" value="Edit..."/>
Liquidus Temperature [K]	<input type="text" value="constant"/>	<input type="text" value="302.8"/>	<input type="button" value="Edit..."/>

Figure III.5: propriétés du Matériau.

3. Equations résolues

Le solveur a pris en compte les équations suivantes :

- Les équations de la quantité de mouvement (Navier-Stokes)
- L' équation de l' énergie

Ces équations permettent de décrire de manière couplée l' évolution de la température et des champs de vitesse dans le domaine étudié.

4. Paramètres de calcul (régime transitoire)

Pas de temps : 1000 s

Nombre maximal d' itérations par pas de temps : 10000

Ce choix permet d' assurer un bon compromis entre précision temporelle et temps de calcul.

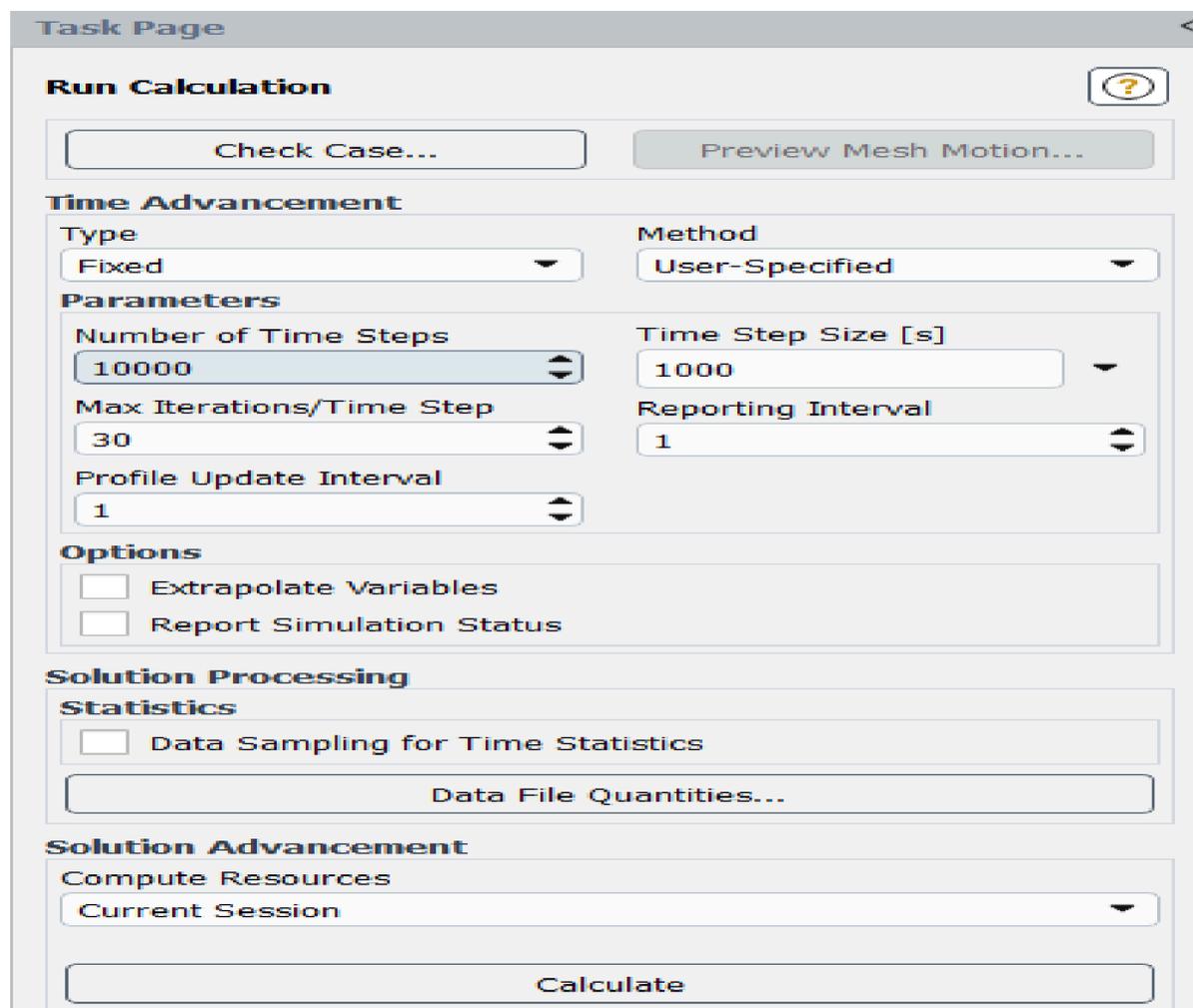


Figure III.6: Exécution de calcul.

5. Facteurs de sous-relaxation

Les facteurs de sous-relaxation adoptés sont les suivants :

Pression : 0.3

Densité : 0.9

Forces : 0.9

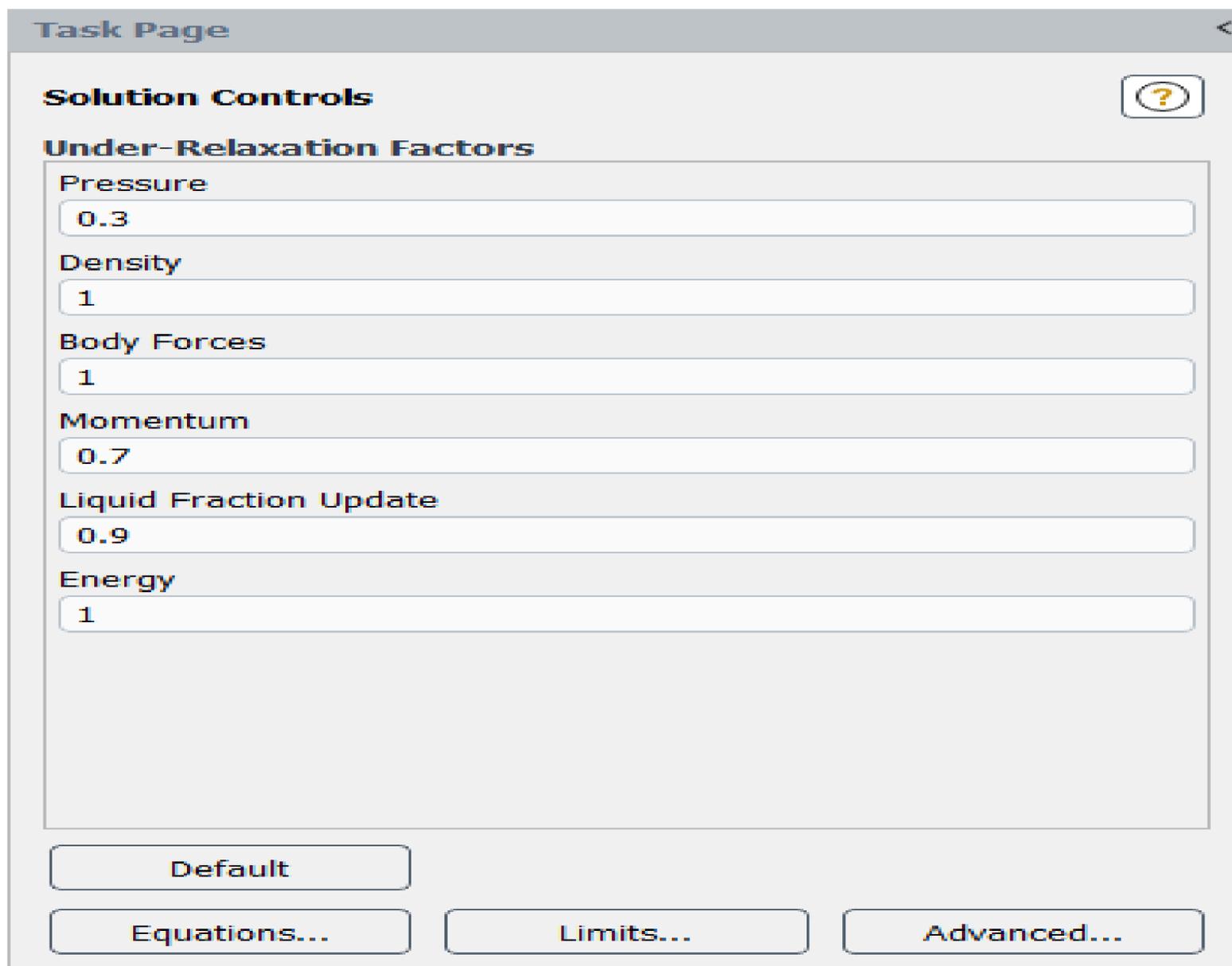


Figure III.7: Contrôles de solution.

6. Résolution numérique

Les équations aux dérivées partielles sont résolues par le solveur CFD après avoir discrétisée et mise sous forme algébrique. Cette résolution se fait par un algorithme itératif jusqu' à la convergence.

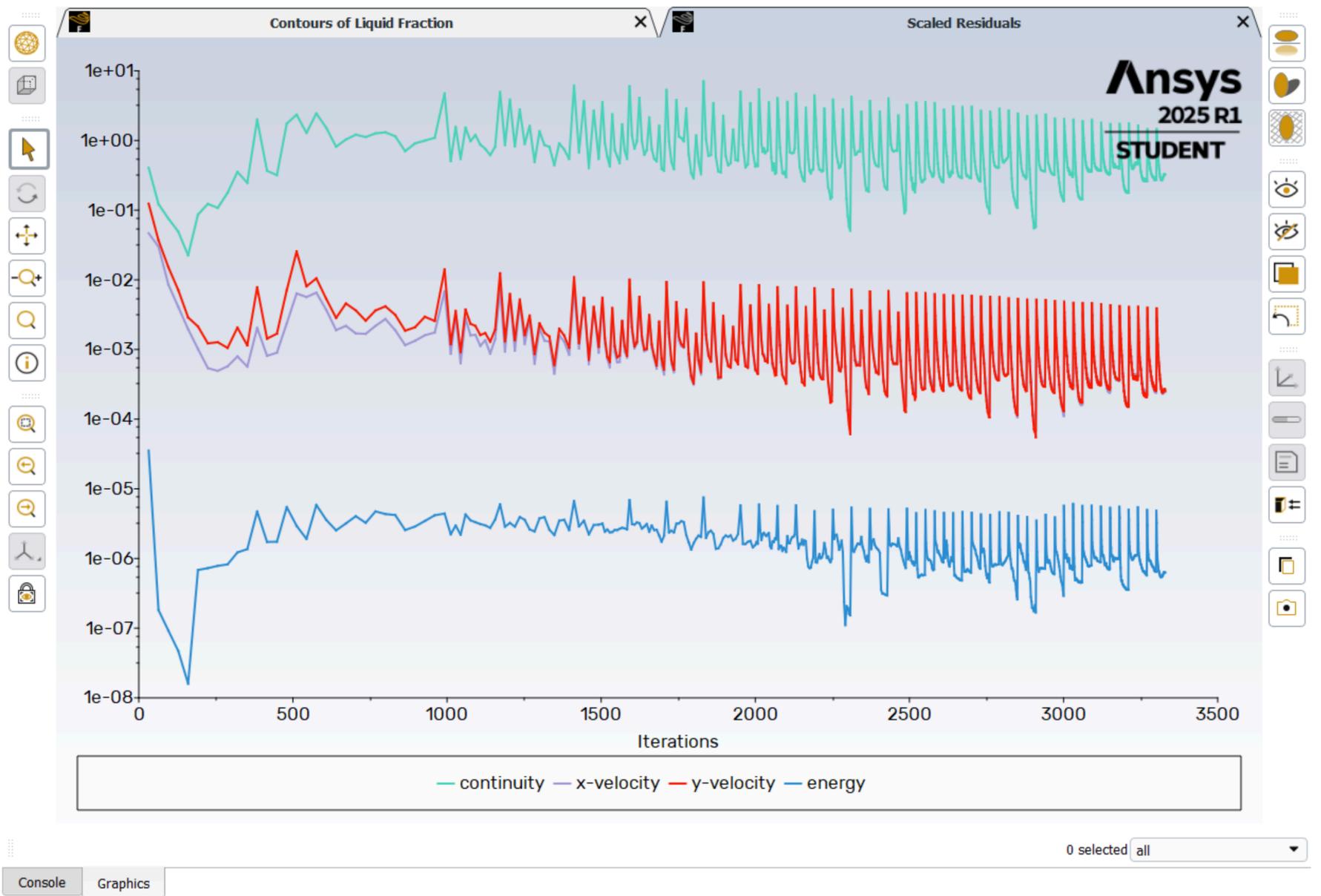


Figure III.8: évolution des résidus.

7.Post-traitement : Visualiser et analyser les résultats, voir Figure III.9.

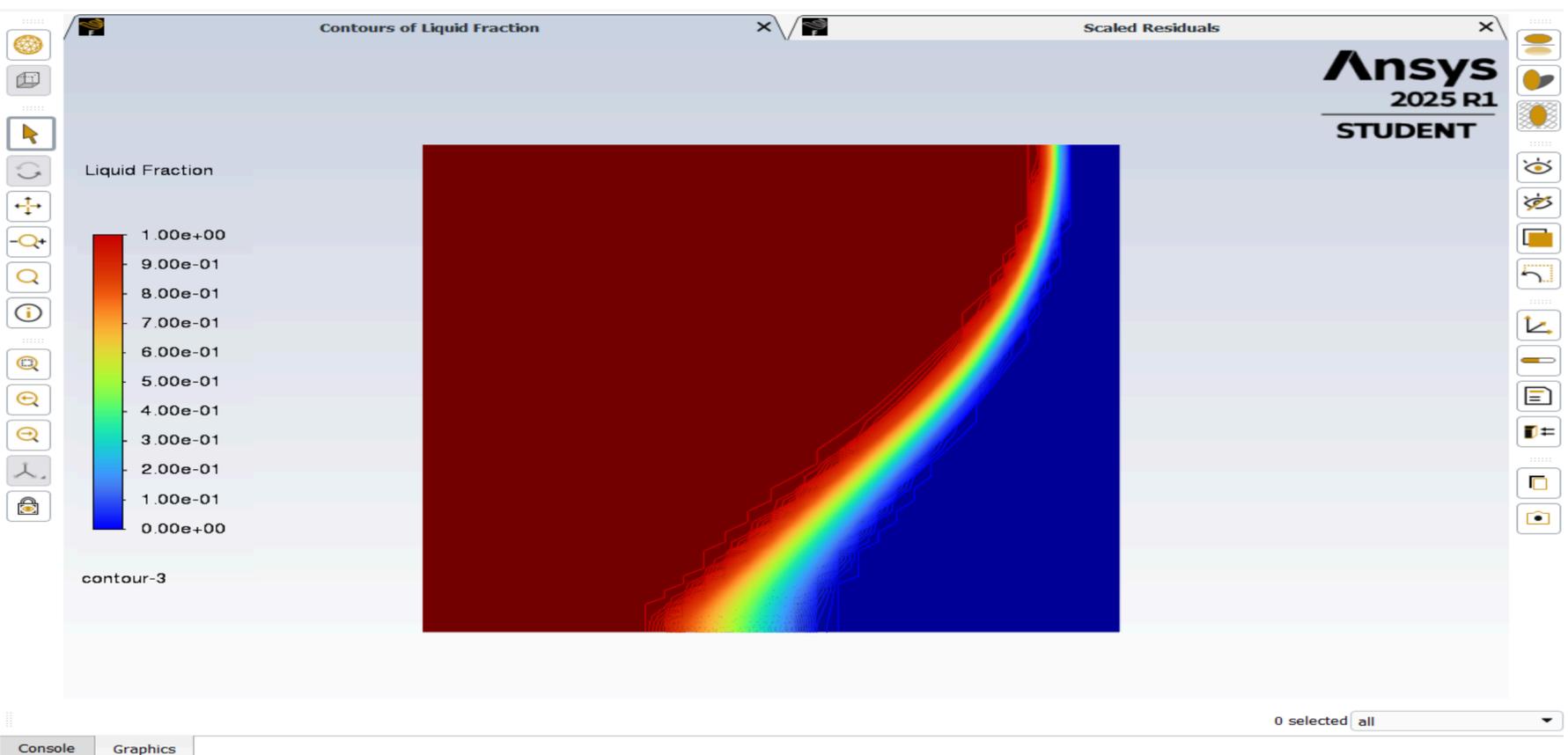


Figure III.9: Contours de la fraction liquide.

III .5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la démarche de simulation numérique adoptée à l'aide du logiciel ANSYS Fluent pour étudier le comportement thermique des matériaux à changement de phase. Après avoir validé le modèle par comparaison avec les résultats expérimentaux de la littérature (cas du gallium), l'étude a été étendue à la simulation d'une paraffine sélectionnée pour le transport de médicaments.

La configuration du maillage, les paramètres numériques, ainsi que les modèles physiques utilisés ont été détaillés. Le choix des méthodes de discrétisation, du régime transitoire et des conditions de simulation a permis de reproduire fidèlement les phénomènes de fusion et de transfert thermique. Ces résultats constituent une base solide pour l'analyse des performances thermiques du système et seront interprétés plus en détail dans la discussion des résultats.

Chapitre IV

Résultat et discussion

IV.1 Validation du modèle physique

Afin de valider le modèle numérique adopté dans ce travail, une comparaison a été effectuée entre les profils de température obtenus par simulation et ceux publiés dans l'étude de référence menée par Beckermann et Viskanta [29]. Cette validation repose sur les mêmes conditions aux limites, propriétés thermo-physiques du gallium, et géométrie du domaine d'étude.

La figure ci-dessous illustre les profils de température le long de l'axe x à l'instant $t = 10$ minutes, pour trois niveaux de hauteur dans le domaine (bas, milieu et haut). Les résultats de notre simulation sont représentés par des courbes en trait pointillé, tandis que les données de Beckermann sont symbolisées par des marqueurs (carrés, cercles et étoiles).

L'analyse comparative montre une très bonne concordance entre les deux ensembles de résultats, notamment au niveau de la tendance thermique globale, ce qui témoigne de la fiabilité du modèle mis en place. De légères divergences peuvent être observées dans certaines zones, ce qui peut s'expliquer par des différences dans la méthode numérique, la résolution spatiale ou les critères de convergence utilisés.

Cette étape de validation est cruciale car elle nous permet de confirmer la justesse des hypothèses adoptées et de poursuivre les simulations avec un niveau de confiance satisfaisant pour l'étude du comportement thermique de matériaux à changement de phase comme le gallium ou le paraffine.

Le calcul a été effectué sur deux grilles géométriques uniformes : M1 (volume de contrôle 70×70) et M2 (volume de contrôle 100×100). Les résultats obtenus sur ces grilles étant peu différents, seuls les résultats de la grille M2 sont présentés dans cet article. Le temps d'intégration total est de 3600 secondes et le pas d'intégration est de 0.1 s.

Dans le but de valider la justesse du comportement thermique simulé dans notre modèle numérique, une comparaison visuelle a été effectuée entre les courbes isothermes obtenues dans cette étude et celles issues des résultats expérimentaux présentés par Viskanta [29]. Cette comparaison a été réalisée pour trois instants clés : 180 secondes (3 minutes), 600

secondes (10 minutes) et 3000 secondes (50 minutes), ce dernier représentant une configuration quasi-stationnaire du régime thermique.

L' évolution des isothermes au cours du temps permet d' observer clairement la progression de la chaleur dans le domaine. A court terme, les isothermes restent concentrées près de la paroi chauffée, traduisant un régime de transfert principalement conductif. Avec le temps, elles s' étendent vers l' intérieur sous l' effet de la convection naturelle, prenant une forme de plus en plus incurvée vers la droite. Ce comportement est typique des phénomènes de fusion dans les PCM, où la conduction thermique initiale est progressivement relayée par un transfert convectif plus efficace à mesure que le liquide se forme et se met en mouvement.

La comparaison qualitative avec les résultats de Viskanta montre une bonne concordance dans la forme et la distribution des isothermes pour les trois instants choisis, ce qui témoigne de la capacité du modèle numérique utilisé à reproduire fidèlement la réalité physique du phénomène étudié. Cette validation renforce la crédibilité des résultats obtenus dans le cadre de cette simulation.

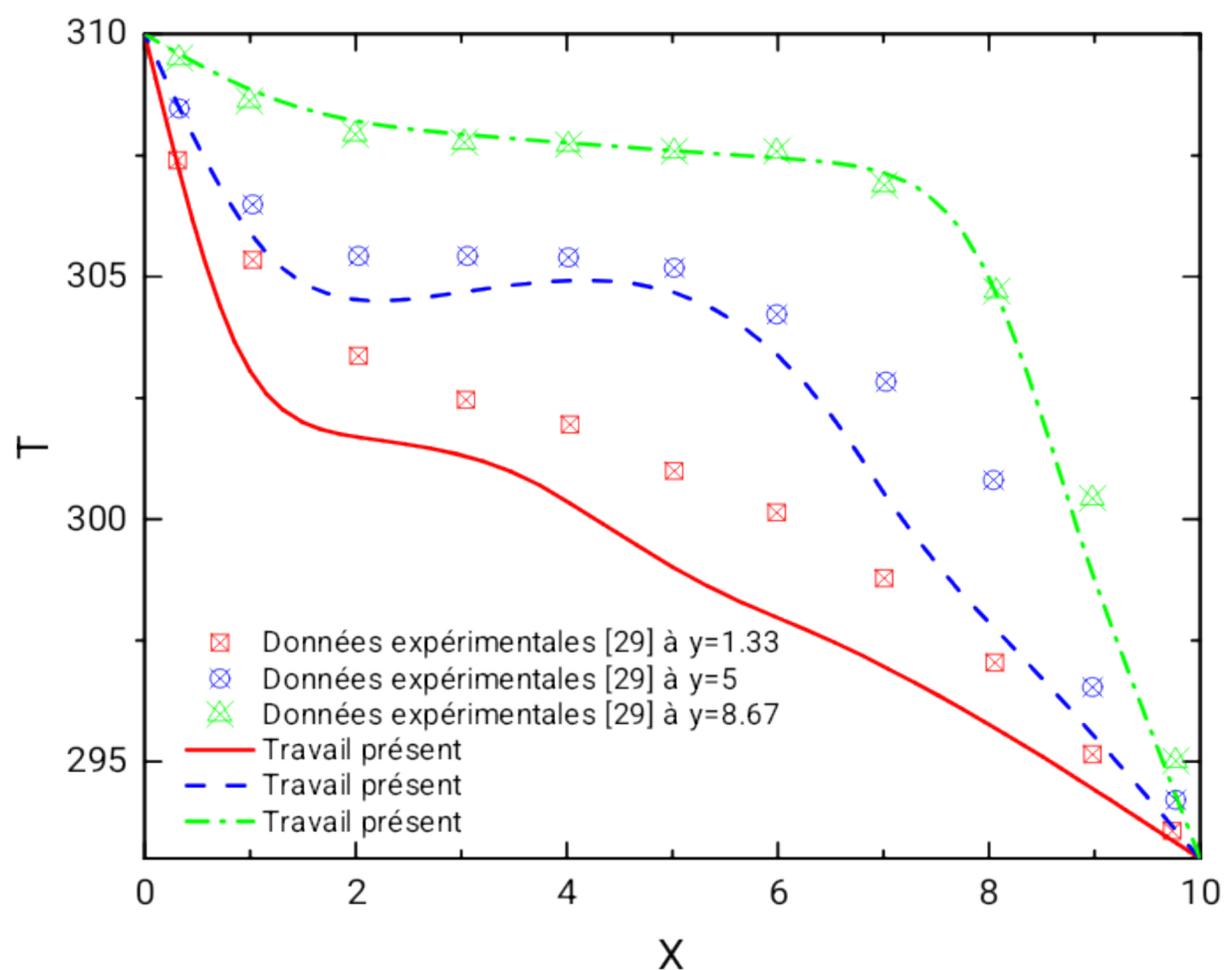


Figure IV.1: Comparaison nos résultats de profils de température à l'instant $t=10$ min avec les résultats de Beckermann et Viskanta [29].

IV.2 Résultats et discussion

L'évolution du processus de fusion dans le matériau à changement de phase a été suivie à travers cinq instants successives (1000 s, 3000 s, 9000 s, 15000 s et 21000 s), en analysant les champs de vecteurs de vitesse, les lignes isothermes ainsi que la fraction liquide. Au début de la simulation, le matériau est majoritairement à l'état solide, et seule une mince couche fondue commence à apparaître au voisinage de la paroi chauffée, où le transfert thermique reste essentiellement conductif, avec une absence notable de mouvement fluide.

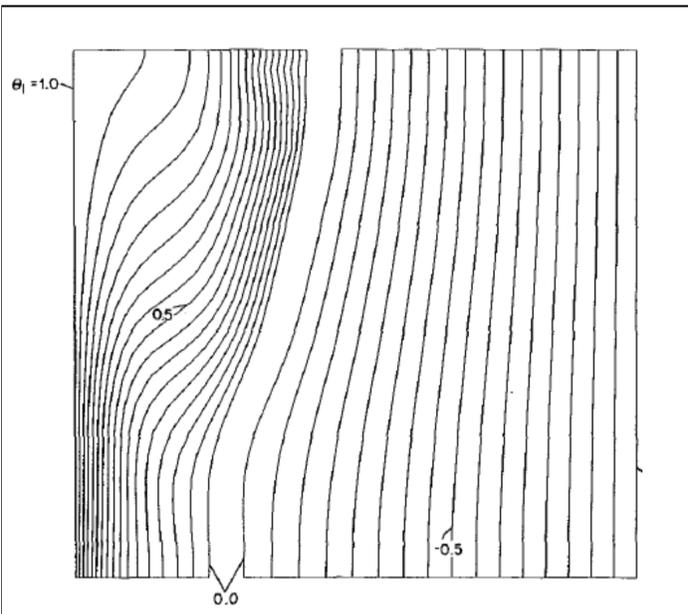
Avec l'augmentation du temps, cette couche liquide s'épaissit progressivement sous l'effet du gradient thermique, ce qui initie un mouvement de convection naturelle dans la zone fondue. Ce mouvement se manifeste par l'apparition de petites cellules de recirculation visibles sur les champs de vitesse. Parallèlement, le front de fusion progresse vers le cœur du domaine, traduisant l'avancement du changement de phase.

A mesure que la zone liquide s'étend, la convection devient plus intense et joue un rôle croissant dans le transfert thermique. Les isothermes commencent à se courber davantage, reflétant la complexité du champ thermique, tandis que la zone solide continue de se rétrécir. La vitesse du fluide augmente progressivement, indiquant une amélioration du transport thermique par convection naturelle.

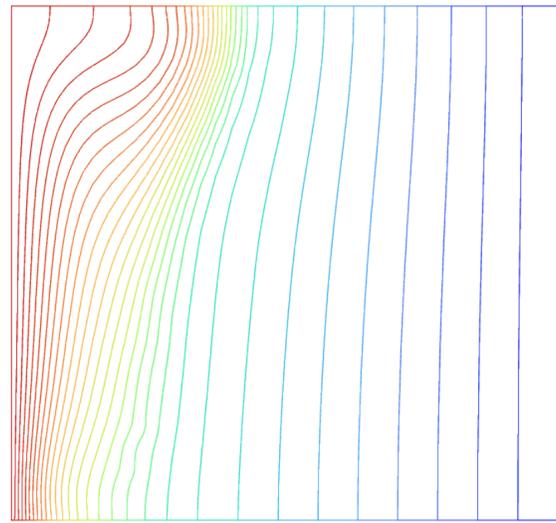
Finalement, à l'instant, le matériau est pratiquement entièrement fondu. La fraction liquide est proche de l'unité dans la majeure partie du domaine, les isothermes deviennent quasiment parallèles, et un régime convectif bien établi domine la région centrale. L'ensemble de ces résultats met en évidence la transition naturelle du transfert de chaleur

depuis un régime purement conductif vers un régime convectif, confirmant ainsi la cohérence physique et la robustesse du modèle utilisé dans cette étude.

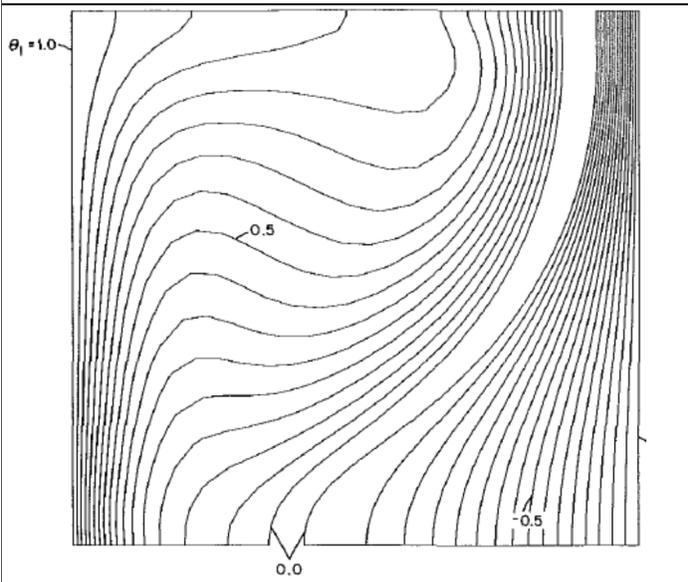
Figure IV.2: comparaison des isothermes : a) travail présent, b) Beckermann



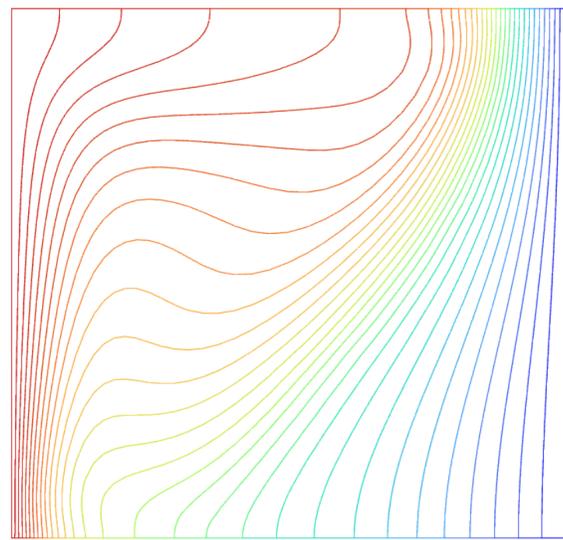
(b1)



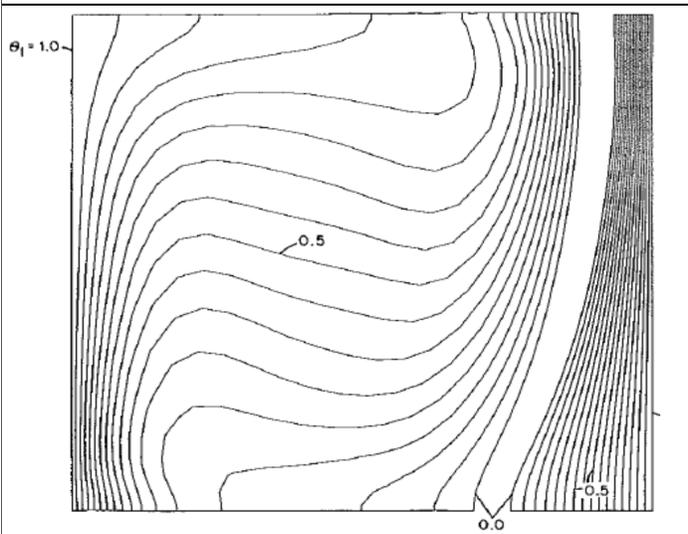
(a1)



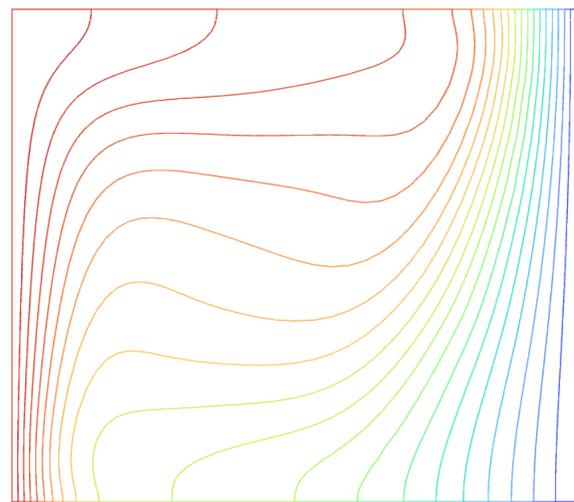
(b2)



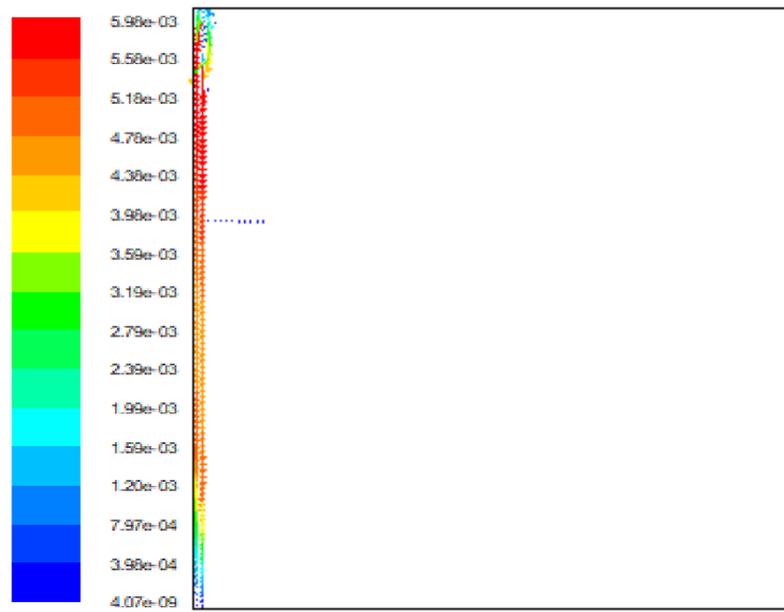
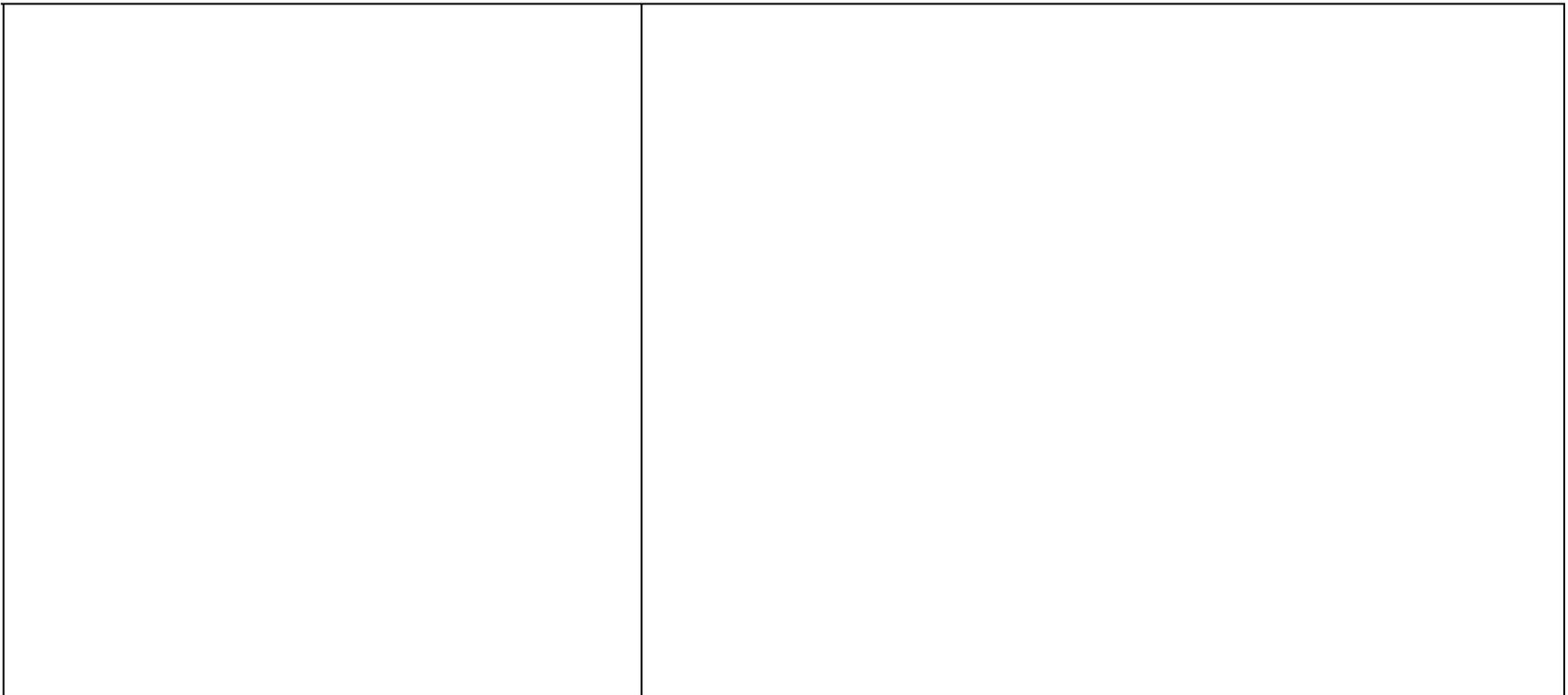
(a2)



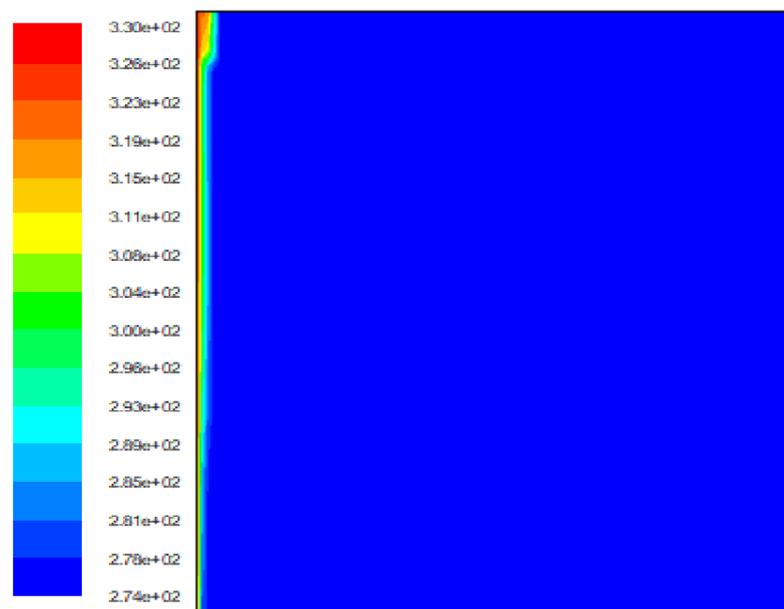
(b3)



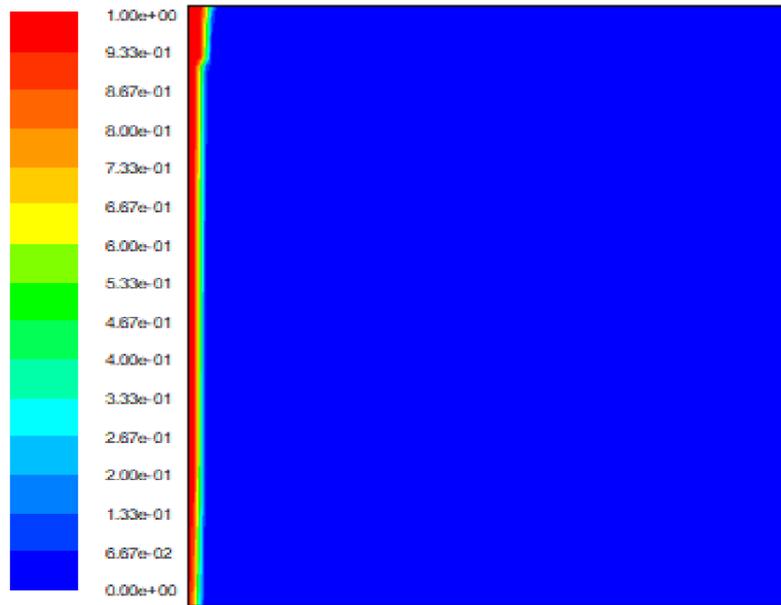
(a3)



(a)

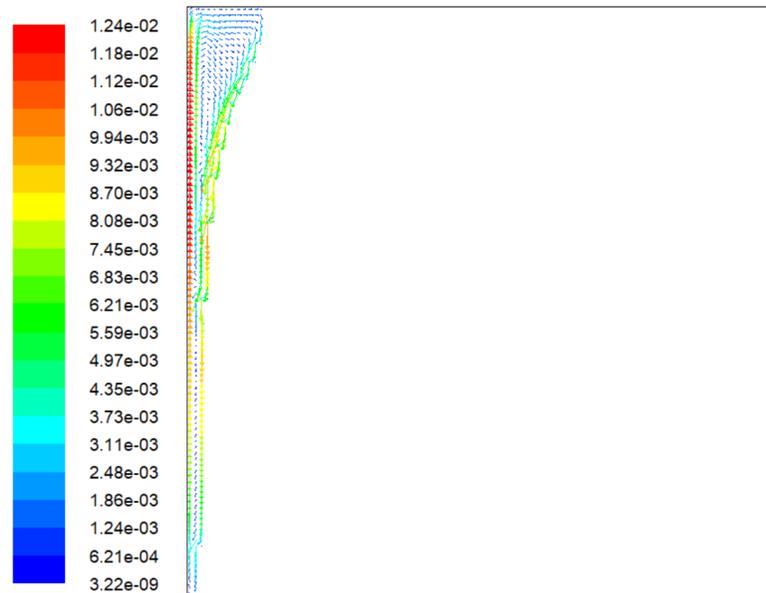


(b)

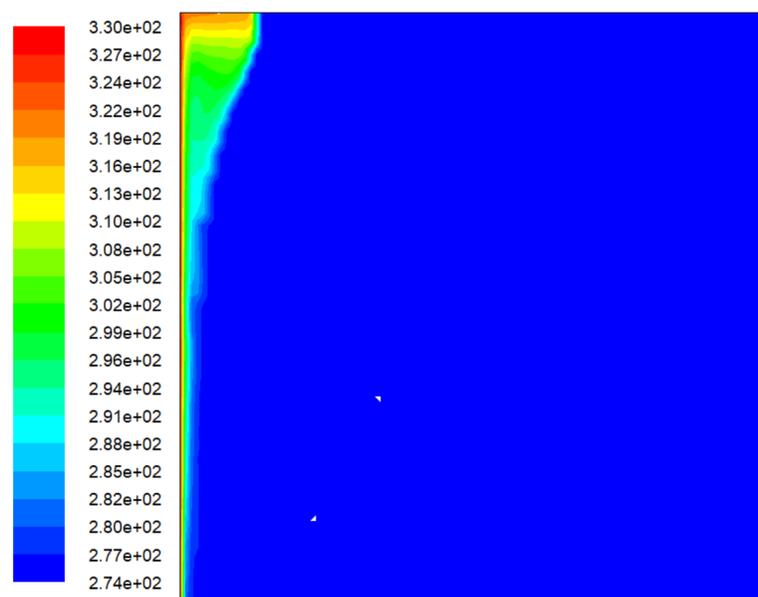


(c)

Figure IV.3: Vecteurs de vitesse (a), isothermes (b) et la fraction du liquide (c) pour $t= 1000$ s.



(a)



(b)

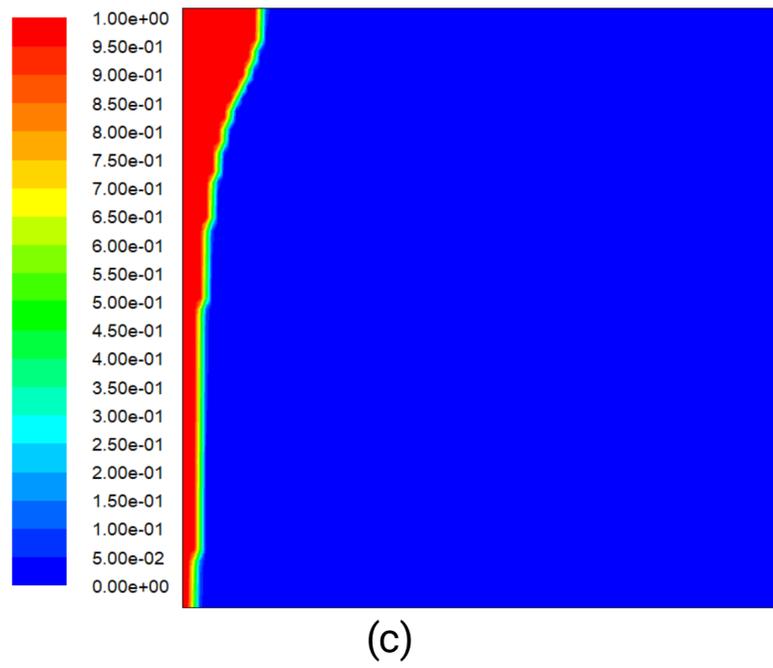
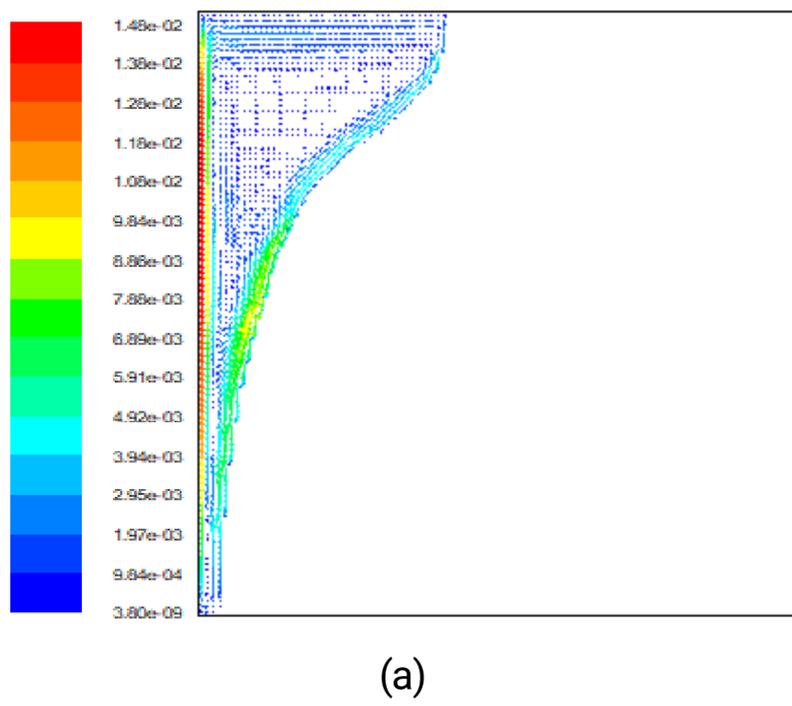
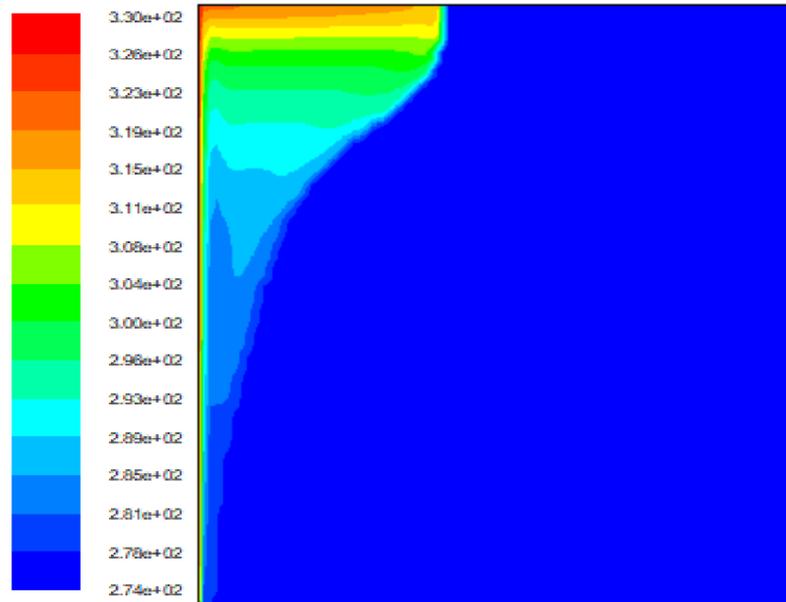
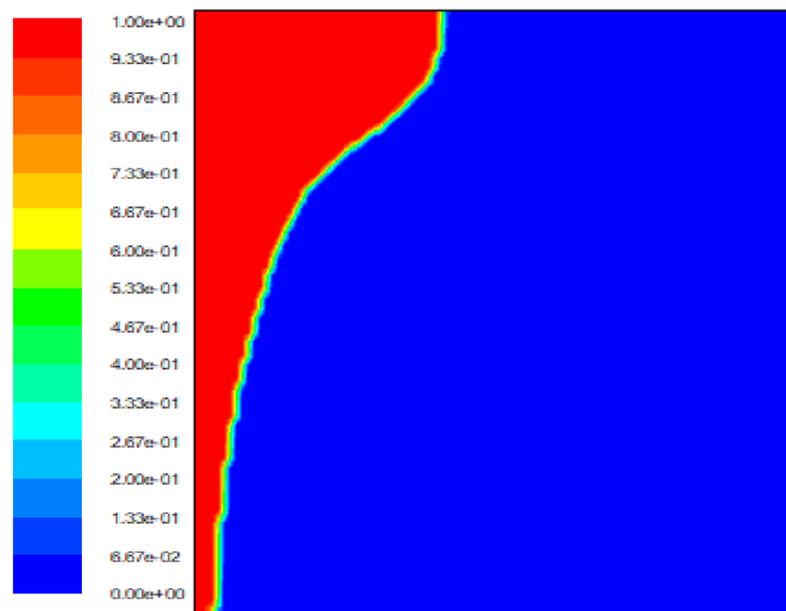


Figure IV.4: Vecteurs de vitesse (a), isothermes (b) et la fraction du liquide (c) pour $t= 3000$ s.



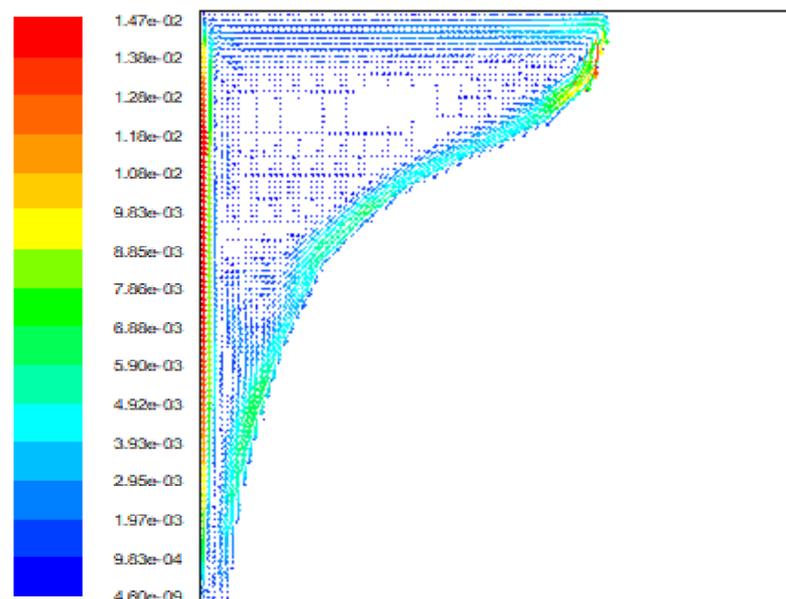


(b)

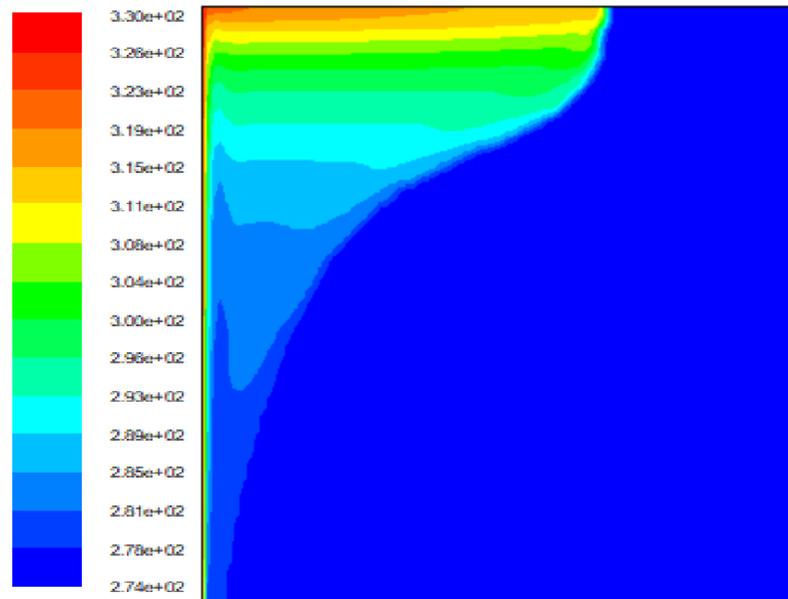


(c)

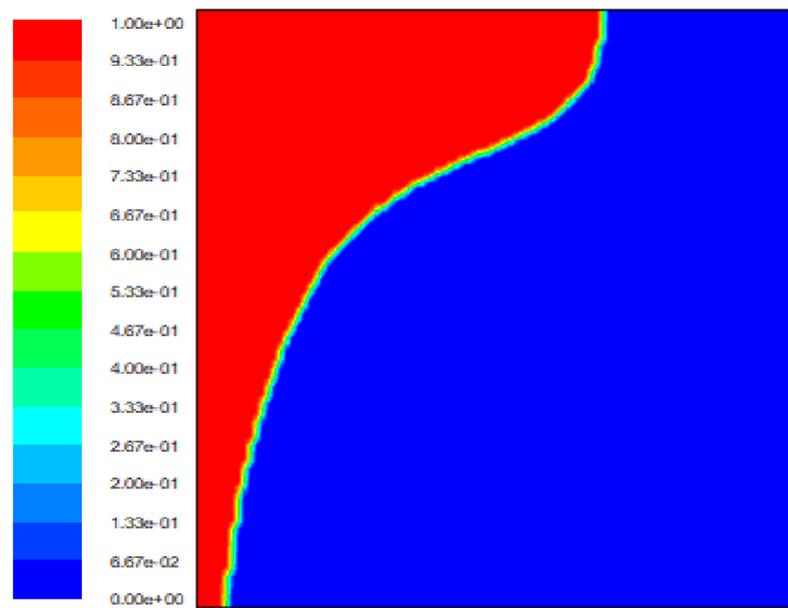
Figure IV.5: Vecteurs de vitesse (a), isothermes (b) et la fraction du liquide (c) pour $t= 9000$ s.



(a)

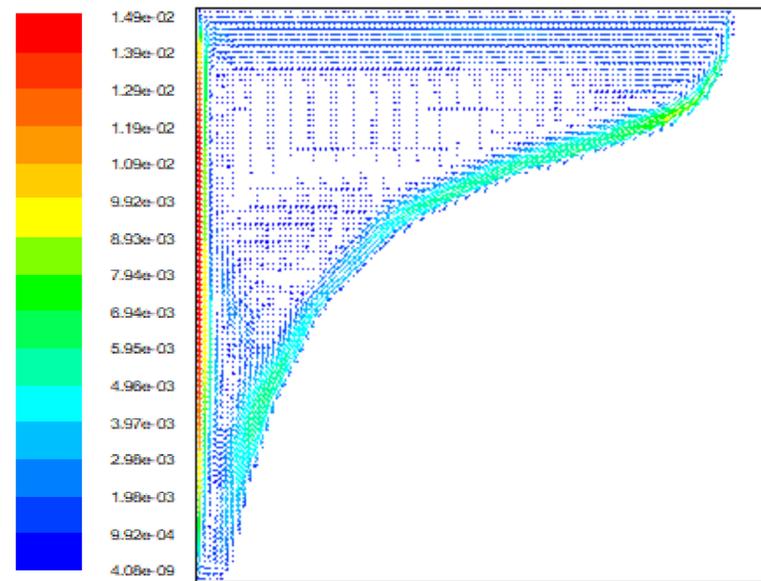


(b)

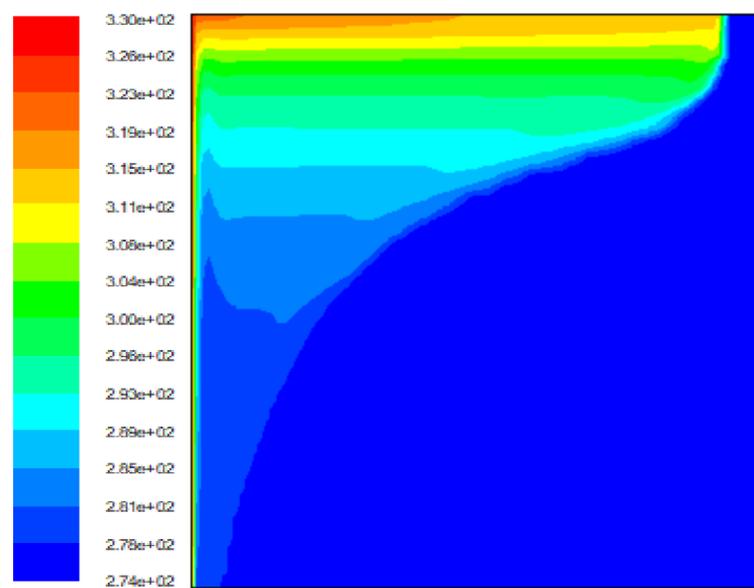


(c)

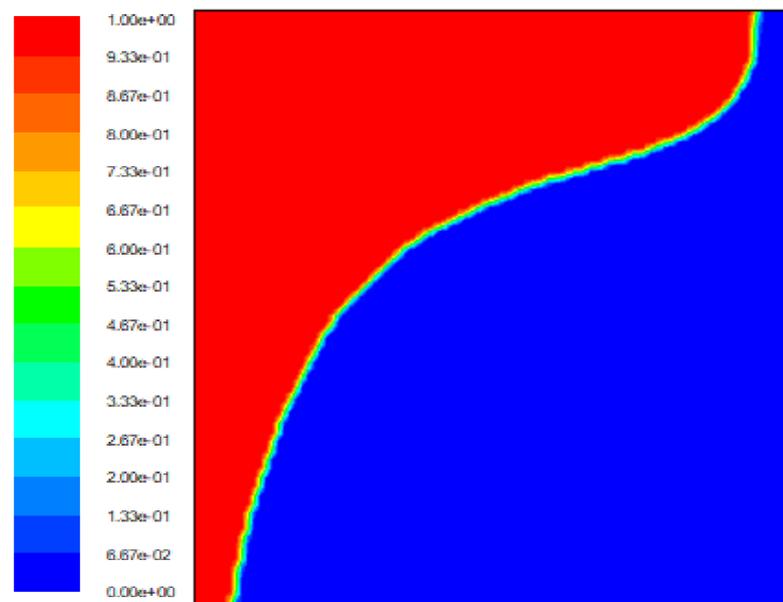
Figure IV.6: Vecteurs de vitesse (a), isothermes (b) et la fraction du liquide (c) pour $t= 15000$ s.



(a)



(b)



(c)

Figure IV.7 : Vecteurs de vitesse (a), isothermes (b) et la fraction du liquide (c) pour $t= 21000$

s.

Conclusion

Conclusion Générale

Dans un contexte mondial marqué par la transition énergétique et la recherche de solutions durables, les matériaux à changement de phase (PCM) se sont imposés comme une technologie prometteuse pour le stockage thermique de l'énergie. Cette étude a démontré que ces matériaux, grâce à leur capacité à stocker de grandes quantités de chaleur à température quasi constante, représentent une réponse efficace à l'intermittence des sources d'énergie renouvelables telles que le solaire et l'éolien.

L'étude bibliographique a retracé l'évolution des PCM à travers les décennies, depuis le développement de composés organiques et inorganiques jusqu'à leur intégration dans des domaines essentiels tels que le bâtiment, la santé et la chaîne du froid. Ces avancées ont permis d'améliorer leur stabilité thermique, leur compatibilité chimique, et de surmonter certaines limitations comme la faible conductivité thermique ou la surfusion.

Sur le plan pratique, ce travail s'est concentré sur la conception et la simulation d'une pochette thermique pour le transport de médicaments, intégrant des PCM afin de maintenir la température dans la plage critique de 2° C à 8° C. Grâce à une modélisation mathématique rigoureuse et une configuration thermique bien pensée, les performances du système ont pu être évaluées et validées.

Ainsi, l'étude a permis de répondre à la problématique initiale : oui, il est possible d'optimiser les performances des matériaux à changement de phase par une sélection judicieuse, un conditionnement efficace et une intégration réfléchie dans des systèmes thermiques adaptés.

En conclusion, les PCM constituent une solution stratégique pour l'avenir énergétique. Leur utilisation contribue à améliorer l'efficacité des systèmes de stockage, à réduire la dépendance aux énergies fossiles, et à soutenir activement les efforts en matière de développement durable

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Zafar Said, A.K. Pandey, Arun Kumar Tiwari, B. Kalidasan, Furqan Jamil, Amrit Kumar Thakur, V.V. Tyagi, Ahmet Sarı, Hafiz Muhammad Ali, Nano-enhanced phase change materials: Fundamentals and applications, Progress in Energy and Combustion Science, Volume 104, 101162, 2024.

<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2024.101162>

[2] Mofijur, M.; Mahlia, T.M.I.; Silitonga, A.S.; Ong, H.C.; Silakhori, M.; Hasan, M.H.; Putra, N.; Rahman, S.M.A. (2019), Phase Change Materials (PCM) for Solar Energy Usages and Storage: An Overview, Energies , 12, 3167.

<https://doi.org/10.3390/en12163167>

[3] Nejat, P., Fekri, Y., & Jomehzadeh, F. (2022), Phase Change Material (PCM) as the Smart Heat Storing Concept: A Brief Review, Annals of Marine Science, 6(1), 034– 038.

<https://doi.org/10.17352/ams.000029>

[4] Agyenim, Francis; Eames, Philip; Smyth, Mervyn (2011). "Experimental study on the melting and solidification behaviour of a medium temperature phase change storage material (Erythritol) system augmented with fins to power a LiBr/H₂O absorption cooling system". Renewable Energy. 36 (1): 108– 117. [doi:10.1016/j.renene.2010.06.005](https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.005)

[5] Deffass Meriem, Intégration des matériaux à changement de phase (MCPs) comme système de stockage de la chaleur, UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK

BEN YAHIA – JIJEL, 2021

[6] Kibria, M. A., et al. (2015). A review on thermophysical properties of nanoparticle dispersed phase change materials. Energy Conversion and Management, 95, 69– 89.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.063>

[7] Pluss Advanced Technologies. (2023, October 13). À la découverte des matériaux à changement de phase ou MCP. Pluss.

<https://plussat.eu/fr/blog/2023/10/13/decouvrez-les-mcp/>

[8] Mehling, H., & Cabeza, L. F. (2008). Heat and cold storage with PCM: An up-to-date introduction into basics and applications. Springer.

<http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-68557-9>

[9] Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 13, 318–345. (2009).

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>

[10] Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K., & Al-Hallaj, S. (2004). A review on phase change energy storage: materials and applications. Energy Conversion and Management, 45(9-10), 1597–1615.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.09.015>

[11] Madjoudj, N., & Imessad, K. (2016). Matériau à changement de phase au service de la bioclimatique. Revue des Énergies Renouvelables, 19(4), 647–662.

<https://doi.org/10.54966/jreen.v19i4.601>

[12] A. Gil, M. Medrano, I. Martorell, A. Lazaro, P. Dolado, B. Zalba, et L. F. Cabeza, "State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1-Concepts, materials and modellization", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 14, no. 1, pp. 31-55, 2010.

<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2009.07.035>

[13] Connaissance des Énergies. (n.d.). Stockage de l' énergie. Connaissance des Énergies. <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/stockage-de-lenergie>

[14] Guezei, A. (n.d.). Étude numérique des transferts de chaleur et de masse lors de la fusion d' un matériau à changement de phase [Mémoire de master, Université (Université Mohamed Larbi Ben M' hidi, Oum El bouaghi)

<https://www.memoire-algerie.com/files/repositories-dz/1457589578203285.pdf>

[15] M. Pierre Pardo, Développement d' un procédé de stockage d' énergie thermique haute

température par voie thermochimique, thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2013.

[16] <https://theses.hal.science/tel-01266813v1/document> 4

[17] Zhou, D., Zhao, C. Y., & Tian, Y. (2012). Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy*, 92, 593– 605.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.025>

[18] Martin Longeon, Adèle Soupart, Jean-François Fourmigué, Arnaud Bruch, Philippe Marty, Experimental and numerical study of annular PCM storage in the presence of natural convection, *Applied Energy*, Volume 112, Pages 175-184, 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.06.007>.

[19] Imen Jmal, Mounir Baccar, Numerical study of PCM solidification in a finned tube thermal storage including natural convection, *Applied Thermal Engineering*, Volume 84, Pages 320-330,2015.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.03.065>.

[20] Mustafa S. Mahdi, Hameed B. Mahood, Alasdair N. Campbell, Anees A. Khadom, Natural convection improvement of PCM melting in partition latent heat energy storage: Numerical study with experimental validation, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Volume 126,2021.
<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105463>.

[21] Yan Cao, Hamdi Aayed, A.M. Algelany, Mahidzal Dahari, Phuoc Quy Phong Nguyen, Khaled A. Gepreel, Van Nhanh Nguyen, Mohamed Ehab, Makatar Wae-hayee, Receiving heat from a PCM tank by using natural convection of water and NEPCM: A simulation for LHTES application, *Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 35,2022.
<https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102123>.

[22] Dounia Chaatouf, Benyounes Raillani, Mourad Salhi, Samir Amraoui, Ahmed Mezrhab, Experimental and numerical study of a natural convection indirect solar dryer with PCM tubes: Dynamic, thermal and nutritional quality analysis, *Solar Energy*, Volume 264,2023.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.111975>.

[23] Bin Ding, Wen-Chuang Feng, Ming-Fei Mu, Liang Gong, Lin Li, A novel method to concurrently enhance heat conduction and natural convection inside PCM thermal buffer, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 203,2023.

<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123773>.

[24] Ahmed M. Hassan, Mohammed Azeez Alomari, Abdalrahman Alajmi, Abdellatif M. Sadeq, Faris Alqurashi, Mujtaba A. Flayyih, Enhanced natural convection in a U-shaped baffled cavity: Synergistic effects of magnetic fields and wall oscillations on Nano-encapsulated PCM, International Communications in Heat and Mass Transfer, Volume 165, Part A, 109051, 2025.

<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.109051>.

[25] Ranga, Naresh Kumar Goud, Gugulothu, Santhosh Kumar, Gandhi, Perumallapalli, Thermal Optimization of Latent Heat Energy Storage Through Fin Geometry Natural Convection and PCM Properties for Superior Phase Change Performance, Heat Transfer, 2025.

<https://doi.org/10.1002/htj.23374>

[26] Ilias Benyahia, Mohammed F. Al-Ghamdi, Aissa Abderrahmane, Obai Younis, Samir Laouedj, Kamel Guedri, Ali Alahmer, Comprehensive thermal analysis of a nano-enhanced PCM in a finned latent heat storage system, International Communications in Heat and Mass Transfer, Volume 165, Part B, 2025

<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.109106>.

[27] Bahoosh, Reza Masser, Ashraf Raihan Saffarian, Mohammad Reza
Numerical Investigation on PCM-Based Enclosure: Effect of Pin Height and Count
Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2025.

P1-12 R 10.2514/1.T 7044

<https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/1.T7044>

[28] Hua-Yang Liu, Shan-Shan Yang, Bei-Cheng Qu, Chun-Mei Wu, You-Rong Li, Synergistic enhancement of heat conduction and natural convection in latent heat storage cavities with longitudinal fins, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 236, Part 1, 2025.

<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.126291>.

[29] Beckermann C.; Viskanta R. Effect of Solid Subcooling on Natural Convection Melting of a Pure Metal, Transactions of the ASME, Vol. 111, 1989.

[30] Saïd BOUABDALLAH. (2006). Etude de l' instabilité hydrodynamique et thermique lors d' un changement de phase avec et sans champ magnétique, Mémoire de magister, université Mentouri-Constantine 1.

[31] Håkon Selvnes, Yosr Allouche, Raluca Iolanda Manescu, Armin Hafne, Review on cold thermal energy storage applied to refrigeration systems using phase change materials, Pages 5, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100807>

