

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ DE KHENCHELA «ABBES LAGHROUR»
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE



N° de série :.....

Mémoire de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master (L.M.D)

Spécialité: Génie Mécanique
Option: Construction Mécanique

**Simulation numérique d'un échangeur
thermique en matériau à changement
de phase**

Réalisé par : - ZERARI NACER ELLAH

Dirigé par : Mr. Pr. BOULAHROUZ Salim

Présenté : le/06/2025

Membres de jury :

Mr. Dr. SID N

M.C.B

Université de Khenchela

Président

Mr. Dr. ZAAMOUCHE R

M.C.B

Université de Khenchela

Examineur

Année universitaire: 2023-2024

Remerciements

Avant toute chose, je remercie Dieu, le Tout-Puissant, de m'avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour surmonter les difficultés rencontrées tout au long de ce parcours, et pour m'avoir guidé jusqu'à l'aboutissement de ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à mon encadrant, le professeur Salim Boulahrouz, qui a eu la gentillesse de me proposer ce sujet de mémoire, et qui a assuré mon accompagnement avec sérieux, rigueur et bienveillance. Ses conseils éclairés et son encadrement constant ont été essentiels dans l'élaboration de ce travail.

Je remercie également Mesdames et Messieurs les membres du jury, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer ce mémoire, ainsi que pour le temps qu'ils y ont consacré et les remarques qu'ils formuleront.

Ma reconnaissance va également à ma famille, dont le soutien moral, les encouragements et la présence rassurante m'ont accompagné tout au long de ce parcours. Merci pour votre confiance et votre amour inconditionnel.

Je souhaite aussi remercier chaleureusement l'ensemble des enseignants du département de génie mécanique pour la qualité de leur enseignement et pour les compétences qu'ils m'ont transmises au fil de ma formation.

Enfin, j'adresse mes remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire. À vous tous, merci du fond du cœur.

Zerari Nacer ellah.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à ceux qui, par leur amour, leur soutien et leur présence, ont contribué à façonner l'étudiant et la personne que je suis devenu.

À mes chers parents, véritables piliers de ma vie. Vous avez toujours été là, silencieux mais puissants, présents à chaque étape de mon parcours. Votre tendresse, vos sacrifices et vos prières m'ont porté plus loin que je ne l'aurais imaginé. Ce travail est le fruit de votre dévouement. Que Dieu vous accorde une longue vie pleine de santé, de joie et de sérénité.

À mes frères et sœurs bien-aimés, compagnons de cœur et de souvenirs, merci pour votre affection sincère, vos encouragements discrets mais profonds, et pour la force que votre présence m'a toujours apportée. Je vous souhaite un avenir rayonnant, à la hauteur de vos rêves.

À mes amis les plus fidèles, dont l'amitié m'a soutenu dans les instants de doute comme dans les moments de joie. Merci pour vos paroles réconfortantes, vos rires partagés, et votre indéfectible soutien. Que vos chemins soient illuminés de réussite et de bonheur.

À toute ma famille, proche ou lointaine, qui a toujours cru en moi, m'a prodigué conseils et encouragements, et m'a témoigné affection et bienveillance. Votre soutien m'a permis d'avancer avec confiance et détermination.

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont croisé mon chemin, pensé à moi, m'ont tendu la main ou inspiré une pensée positive, je vous exprime ma profonde reconnaissance.

Vous avez tous, à votre manière, contribué à ce que ce travail voie le jour.

Les mots sont parfois trop faibles pour exprimer l'ampleur de ma gratitude. Mais à chacun d'entre vous, je dis : merci, du fond du cœur.

Zerari Nacer ellah.

Résumé

Face aux défis thermiques croissants de l'électronique de puissance, liés à la miniaturisation et aux densités de puissance élevées, ce mémoire explore l'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) comme solution innovante de refroidissement. L'étude combine une analyse théorique des transferts thermiques (conduction, convection, rayonnement) et des technologies existantes, une caractérisation détaillée des MCP (classification organique/inorganique/eutectique, critères de sélection incluant température de fusion, chaleur latente et conductivité), et une modélisation numérique par éléments finis d'un dissipateur intégrant un micro-canal et un MCP (Bi-21In-18Pb-12Sn, $T_m = 58^\circ\text{C}$). Les simulations, basées sur la méthode d'enthalpie-porosité, démontrent que le MCP stabilise la température de sortie à 300 K même sous flux thermiques élevés (jusqu'à 1.75 kW/m^2) grâce au stockage de chaleur latente, tandis qu'une convection forcée optimisée ($Re \approx 150$) réduit la température de 50 K avec des pertes de charge maîtrisées. Le comportement transitoire confirme un retard significatif de l'élévation de température ($>900\text{ s}$) et l'émergence d'une convection naturelle efficace ($>0.6\text{ m/s}$). Ces résultats soulignent le potentiel des MCP comme solution passive, compacte et fiable, éliminant le besoin de ventilateurs. Des optimisations sont proposées, incluant des MCP composites pour améliorer la conductivité thermique et l'adaptation géométrique des micro-canaux. Les perspectives ouvrent sur une validation expérimentale, l'extension aux MCP hybrides pour températures extrêmes ($>200^\circ\text{C}$), et leur intégration dans des applications critiques (véhicules électriques, aérospatial), positionnant ainsi les MCP comme technologie clé pour une électronique durable et performante.

ملخص:

تواجه صناعة الإلكترونيات تحديات حرارية متزايدة بسبب التصغير وارتفاع كثافة الطاقة، تستكشف هذه المذكرة **المواد متغيرة الطور** (PCMs) كحلّ مبتكر للتبريد. تجمع الدراسة بين التحليل النظري لآليات انتقال الحرارة (التوصيل، والحمل، والإشعاع)، وتوصيف المواد متغيرة الطور (تصنيفها العضوي/غير العضوي/اليتكتي، ومعايير اختيارها مثل نقطة الانصهار، والحرارة الكامنة، والتوصيلية)، والنمذجة العددية بطريقة العناصر المحدودة لـ**مشئت حراري** مزود بقناة ميكروية ومادة متغيرة الطور (Bi-21In-18Pb-12Sn)، $T_m = 58^\circ\text{C}$. تُظهر المحاكاة باستخدام **طريقة الإنثالبي-المسامية** أن المواد متغيرة الطور تُنبت درجة حرارة المخرج عند 300°C حتى تحت تدفقات حرارية عالية (تصل إلى 1.75 كيلوواط/م²) بفضل تخزين الحرارة الكامنة، بينما يخفض الحمل القسري المُحسن ($Re \approx 150$) درجة الحرارة بمقدار 50°C مع التحكم في هبوط الضغط. يؤكد السلوك الديناميكي تأخر ارتفاع درجة الحرارة (<900 ثانية) وظهور حمل حراري طبيعي فعال (<0.6 م/ث). تُبرز هذه النتائج إمكانية استخدام المواد متغيرة الطور كحلول **صغيرة الحجم، وسلبية (بدون مراوح)، وموثوقة** للإلكترونيات عالية القدرة. تشمل التحسينات المقترحة استخدام مواد متغيرة طور مركبة لتعزيز التوصيل الحراري وتكثيف هندسة القنوات الميكروية. تتوجه الآفاق المستقبلية نحو التحقق التجريبي، ومواد الطور المتغير الهجينة لدرجات حرارة قصوى ($>200^\circ\text{C}$)، ودمجها في تطبيقات حرجة (المركبات الكهربائية، والفضاء)، مما يجعل هذه المواد **ركيزة أساسية** للإلكترونيات المستدامة عالية الأداء.

Summary

Facing escalating thermal challenges in power electronics driven by miniaturization and high power densities, this thesis explores phase change materials (PCMs) as an innovative cooling solution. The study integrates theoretical analysis of heat transfer mechanisms (conduction, convection, radiation), characterization of PCMs (organic/inorganic/eutectic classifications, selection criteria including melting point, latent heat, and conductivity), and finite element modeling of a microchannel heat sink with integrated PCM (Bi-21In-18Pb-12Sn, $T_m = 58^\circ\text{C}$). Simulations using the enthalpy-porosity method demonstrate that PCMs stabilize outlet temperature at 300 K under high thermal fluxes (up to 1.75 kW/m^2) via latent heat storage, while optimized forced convection ($Re \approx 150$) reduces temperature by 50 K with controlled pressure drops. Transient behavior confirms delayed temperature rise ($>900\text{ s}$) and effective natural convection ($>0.6\text{ m/s}$). These results highlight PCMs as **compact, fanless passive solutions** for high-power electronics. Proposed optimizations include composite PCMs for enhanced conductivity and microchannel geometry adaptation. Future work targets experimental validation, hybrid PCMs for extreme temperatures ($>200^\circ\text{C}$), and integration into critical applications (electric vehicles, aerospace), positioning PCMs as key enablers for sustainable, high-performance electronics.

Sommaire

Table des matières

Summary.....	
Table des matières	
Liste des Figures.....	
Liste des Tableaux	
Nomenclature.....	
Introduction générale.....	1

Chapitre I: Méthodes de Refroidissement

1.1 Introduction	3
1.2 Problèmes liés aux éléments électroniques	3
1.3 Les différents modes de transfert thermique	5
1.3.1 La conduction thermique	6
1.3.2 La convection thermique	7
1.3.3 Transfert thermique par rayonnement	10
1.4 Les systèmes de refroidissement : technologies et performances	11
1.4.1 Les systèmes de refroidissement monophasiques	12
1.4.2 Les systèmes de refroidissement diphasiques	17
1.5 Stockage d'énergie thermique.....	24
1.5.1 Stockage de la chaleur sensible	25
1.5.2 Stockage de la chaleur latente	25
1.6 Applications du stockage d'énergie	26
1.6.1 Gestion thermique de l'électronique	27
1.6.2 Stockage d'énergie dans les matériaux de construction.....	28
1.6.3 Systèmes d'énergie solaire.....	29
1.6.4 Application dans le secteur textile.....	32
1.7 Conclusion.....	33

Chapitre II: Matériaux à changement de phase

II.1 Introduction.....	35
------------------------	----

Sommaire

II.2 Matériaux à Changement de Phase (MCP).....	36
II.3 Historique des Matériaux à Changement de Phase (MCP).....	37
II.4 Différents types de changements d'état	38
II.5 Choix d'un Matériau à Changement de Phase (MCP).....	39
II.6 Principes de Fonctionnement des Matériaux à Changement de Phase	41
II.6.1 Définition des Matériaux à Changement de Phase	41
II.6.2 Mécanisme de Stockage et de Libération de Chaleur	41
II.6.3 Types de Transitions de Phase	41
II.6.4 Critères de Sélection des Matériaux à Changement de Phase	41
II.7 Classification des Matériaux à Changement de Phase (MCP)	42
II.8 Propriétés Thermophysiques des Matériaux à Changement de Phase (MCP).....	43
II.8.1 Température de Transition de Phase.....	43
II.8.2 Chaleur Latente de Fusion	43
II.8.3 Capacité Calorifique	43
II.8.4 Conductivité Thermique	44
II.8.5 Densité	44
II.8.6 Stabilité Thermique et Cyclique	44
II.9 Applications des Matériaux à Changement de Phase (MCP) dans les Échangeurs thermique.....	44
II.9.1 Stockage de l'Énergie Thermique.....	44
II.9.2 Chauffage et Climatisation des Bâtiments.....	45
II.9.3 Industrie Automobile	45
II.9.4 Refroidissement des Composants Électroniques	45
II.9.5 Conservation des Produits Alimentaires.....	45
II.9.6 Secteur des Énergies Renouvelables.....	45
II.10 Propriétés et Types de Matériaux à Changement de Phase (MCP)	46
II.10.1 Paraffines	46
II.10.2 Acides Gras.....	46

Sommaire

II.10.3 Sels Hydratés	46
II.10.4 Polyalcools.....	47
II.10.5 Matériaux Composites Incorporant des MCP.....	47
II.11 Comparaison des Différents Types de Matériaux à Changement de Phase (MCP)	47
II.11.1 Performances Thermophysiques.....	48
II.11.2 Stabilité et Durabilité.....	48
II.11.3 Coût et Impact Environnemental	48
II.11.4 Sélection d'un MCP selon l'Application	49
II.11.5 Comparaison de la Stabilité Chimique et de la Durabilité.....	49
II.11.6 Comparaison des Coûts et de l'Impact Environnemental.....	49
II.11.7 Choix du MCP en Fonction de l'Application	50
II.12 Applications des Matériaux à Changement de Phase (MCP).....	50
II.12.1 Stockage de l'Énergie Thermique.....	50
II.12.2 Intégration dans le Bâtiment	50
II.12.3 Gestion Thermique des Équipements Électroniques	51
II.12.4 Usages Biomédicaux.....	51
II.12.5 Applications Industrielles et Agroalimentaires.....	52
II.13 Conclusion	52

Chapitre III: Modélisation et Simulation du dissipateur thermique en matériau à changement de phase

III.1 Géométrie du système étudié.....	55
III.2 Etude de la consistance du maillage	60
III.3 Comportement transitoire	63
III.4 Effet du nombre de Reynolds	69
III.5 Effet du flux imposé	75
Conclusion générale:	83
Références bibliographiques:	85

Liste des Figures

Liste des Figures

Figure I.1: Puissance Electrique (Watt)	4
Figure 1.2: Puissance dissipée en commutation dans un composant électrique	5
Figure 1.3 :Le principe de la conduction thermique	7
Figure 1.4 : Le principe de la convection thermique d'un fluide en mouvement	8
Figure 1.5 : Le principe du rayonnement thermique	11
Figure 1.6 : La classification des systèmes de refroidissement passif	12
Figure 1.7: Exemple de dissipateur thermique (a) : à ailettes et (b) : à nid d'abeille	13
Figure 1.8: Exemple d'un système de refroidissement par air forcé	14
Figure 1.9: Schéma simplifié d'un système de refroidissement par liquide	15
Figure 1.10: Principe de refroidissement par (a) Spray cooling et (b) Refroidissement par jets.	17
Figure 1.11: Principe des matériaux à changement de phase.	20
Figure 1.12: Les différentes classes des MCP	21
Figure 1.13: Comparaison des MCP par famille en fonction de leur chaleur latente et leur température de fusion	23
Figure 1.14: Capacité thermique (a) et coût des MCP (b) à point de fusion élevé	24
Figure 1.15: Comparaison entre le stockage par chaleur sensible et chaleur latente	25
Figure 1.16 :Application typique du PCM dans les bâtiments [31]	29
Figure 1.17 : Capteurs solaires à auge parabolique avec fluide caloporteur dans le tube absorbant l'énergie thermique	30
Figure 1.18 : Un exemple de centrale solaire de production directe de vapeur avec stockage d'énergie thermique	31
Figure 1.19 :Système de chau e-eau solaire sanitaire avec stockage thermique à base de MCP	31
Figure 1.20 : Tissu enduit de microbilles du MCP	32
Figure II.1: Principe de fonctionnement des matériaux à changements de phase .	37
Figure II.2: Phase change materials applications diagram	43
Figure III.1. Géométrie du système étudié.	55
Figure III.2. Types de maillages testés.	61
Figure III.3. Etude de l'indépendance des résultats de la simulation du type de maillage pour la température et la pression de l'air en un point du boitier au	62

Liste des Figures

voisinage de la plaque en PCM.	
Figure III.4. Vitesse transitoire.	65
Figure III.5. Pression transitoire.	67
Figure III.6. Température transitoire.	69
Figure III.7. Effet du Re sur l'écoulement de l'air.	71
Figure III.8. Effet du Re sur la pression de l'air.	73
Figure III.9. Effet du Re sur la température de l'air.	75
Figure III.10. Effet du flux imposé sur la vitesse de l'air.	76
Figure III.11. Effet du flux imposé sur la pression de l'air.	78
Figure III.12. Effet du flux imposé sur la température de l'air.	81

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux

Tableau II.1: Avantages et inconvénients des différents Changements d'état.	38
Tableau III.1. Type de PCM et ses propriétés thermophysiques [&].	56
Tableau III.2. Flux thermique et nombre de Reynolds étudiés.	56

Nomenclature

Nomenclature

- C : Chaleur spécifique du fluide a pression constante (J/Kg. K).
- g : Accélération de la pesanteur ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$).
- H :représente l'enthalpie du PCM.
- h :coefficient de convection ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$).
- h_x : le coefficient de transfert de chaleur.
- h_r^{ef} : l'enthalpie au point de référence.
- k : Conductivite thermique ($\text{W/m}^\circ\text{K}$).
- P : Pression (Pa).
- Pr : Nombre de Prandtl.
- Re : Nombre de Reynolds.
- S :la section (m^2).
- T : Temperature dimensionnelle ($^\circ\text{K}$).
- T_r^{ef} : la température de référence.
- T_a : température ambiante (en kelvins).
- t : Temps dimensionnel (s).
- T_r^{ef} : la température de référence.
- T_b : la température moyenne de l'écoulement du fluide.
- x : Cordonnée axiale dimensionnelle (m).
- y : Cordonnée verticale dimensionnelle (m).
- V_d :la différence de potentiel appliquée à un composant bipolaire.
- V :vitesse de fluide (ms^{-1}).
- Nux : Nombre de Nusselt.
- ϕ :flux thermique (W).
- dt :temps élémentaire (s).
- dT, dx : gradient de température au point x (K.m^{-1}).
- L et α : désignent respectivement la chaleur latente du PCM et sa fraction liquide.
- S : surface de contact entre le solide et le fluide (m^2).
- dQ : l'énergie élémentaire (J).
- T_a :température ambiante (en kelvins).

Nomenclature

E_{on} et E_{off} : l'énergie dissipée respectivement lors de la mise en conduction et lors du passage à l'état de blocage.

f : la fréquence de fonctionnement du composant.

R_{on} : la résistance du composant lorsqu'il est en état de conduction (état passant).

h_r^{ef} : l'enthalpie au point de référence.

3D : 3 dimensional

Cu : copper

Lettres grecques

L et α : désignent respectivement la chaleur latente du PCM et sa fraction liquide.

μ : viscosité dynamique du fluide ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)

ν : Viscosité cinématique du fluide (m^2/s).

ρ : masse volumique du fluide (Kg m^{-3})

v : représente la vitesse du fluide

β : représente la fraction volumétrique de la phase liquide

\bar{v}_p : est la vitesse du solide à l'extérieur du domaine

ε : coefficient d'émissivité du matériau ($0 < \varepsilon < 1$)

λ : conductivité thermique ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$).

σ : constante de Stefan-Boltzmann, égale à $5,67 \times 10^{-8}$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$).

h_r^{ef} : désigne l'enthalpie au point de référence

T_r^{ef} : représente la température de référence

VOF : Volume of Fluid.

MCP : Matériau à changement de phase.

FVM : finite volume method

NF : nanofluide

NP : nanoparticle

PCM : phase change material

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

Le développement rapide des systèmes électroniques embarqués, caractérisé par une miniaturisation accrue et une densité de puissance toujours plus élevée, pose d'importants défis en matière de gestion thermique. En effet, la dissipation efficace de la chaleur générée par les composants électroniques est devenue un enjeu critique pour assurer leur fiabilité, leur performance et leur longévité. Les méthodes de refroidissement traditionnelles, telles que les dissipateurs thermiques à air ou à eau, atteignent leurs limites face à ces exigences croissantes. Dans ce contexte, les matériaux à changement de phase (MCP) émergent comme une solution prometteuse, exploitant leur capacité à absorber et à restituer d'importantes quantités d'énergie thermique lors des transitions de phase, notamment solide-liquide.

Ce mémoire de master explore l'utilisation des MCP pour le refroidissement des composants électroniques de puissance. Il se structure en trois chapitres principaux. Le premier chapitre présente une revue complète des méthodes de refroidissement, mettant l'accent sur les dissipateurs thermiques à base de MCP. Il aborde également les principes fondamentaux du transfert de chaleur et les différentes technologies de refroidissement, monophasiques et diphasiques. Le deuxième chapitre se concentre sur les matériaux à changement de phase eux-mêmes, détaillant leurs propriétés thermophysiques, leur classification et leurs critères de sélection, ainsi que leurs applications dans divers domaines. Enfin, le troisième chapitre est consacré à la modélisation et à la simulation numérique d'un dissipateur thermique intégrant un MCP, utilisant la méthode des éléments finis pour analyser le comportement thermique et hydrodynamique du système sous différentes conditions opératoires.

L'objectif de ce travail est de fournir une compréhension approfondie du potentiel des MCP dans la gestion thermique des systèmes électroniques et de proposer des outils numériques pour optimiser la conception de dissipateurs thermiques innovants.

Chapitre I: *Méthodes de Refroidissement*

Chapitre I

Méthodes de refroidissement

Résumé :

Dans ce chapitre, on présente une revue des principales méthodes de refroidissement utilisées dans les systèmes électroniques, en mettant l'accent sur les dissipateurs thermiques en matériaux avec changement de phase. En raison de la chaleur latente de changement de phase, des valeurs appréciables de flux thermique sont manifestés au cours de refroidissement de composants électroniques de puissance.

1.1 Introduction

Le développement croissant des systèmes électroniques embarqués s'accompagne d'une miniaturisation de plus en plus poussée, ce qui pose plusieurs défis, notamment en matière de gestion thermique. Une étude rigoureuse de ce phénomène s'avère donc essentielle afin de prévenir tout risque de dysfonctionnement des composants.

Ce chapitre vise à fournir un aperçu global des problématiques thermiques rencontrées dans les dispositifs électroniques, ainsi qu'à présenter les principaux modes de transfert de chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement. Les différentes méthodes de refroidissement, qu'elles soient monophasiques ou diphasiques, seront également exposées en fin de chapitre.

Enfin, une revue bibliographique sur les matériaux à changement de phase (MCP) est proposée, permettant de mieux comprendre leurs principes de fonctionnement, leurs critères de sélection, ainsi que les diverses familles existantes, qui seront décrites et analysées en détail.

1.2 Problèmes liés aux éléments électroniques

La dissipation thermique des composants électroniques soulève diverses problématiques, qui peuvent être analysées selon trois échelles distinctes :

1. À l'échelle des composants électroniques

Cette échelle concerne principalement les éléments issus de l'électronique de puissance,

Chapitre I: Méthodes de Refroidissement

tels que les puces ou les diodes. Ces composants, de très petite taille (parfois de l'ordre de quelques centimètres), génèrent généralement de faibles puissances thermiques, mais leur miniaturisation rend leur refroidissement particulièrement délicat.

2. À l'échelle des systèmes électroniques

Lorsqu'il s'agit de puissances plus élevées, les composants sont généralement intégrés dans des boîtiers de forme circulaire ou rectangulaire, tels que les onduleurs, les piles ou les accumulateurs. La gestion thermique à ce niveau devient plus complexe en raison de la densité de puissance accrue.

3. À l'échelle des applications

Cette échelle englobe l'ensemble des systèmes électroniques intégrés dans des domaines d'application variés, comme l'industrie automobile, l'aéronautique ou encore l'électronique embarquée. La dissipation de chaleur à ce niveau doit prendre en compte les contraintes globales de l'environnement opérationnel.

La figure 1.1 illustre la relation entre la taille des composants électroniques et leur puissance dissipée, permettant ainsi de visualiser clairement les domaines d'application typiques de l'électronique de puissance.

Par ailleurs, cinq sources principales peuvent perturber le comportement thermique des composants, en fonction de leur environnement d'utilisation :

- la température ambiante,
- l'humidité,
- les constantes de temps thermiques,
- la pression atmosphérique,
- et le rayonnement solaire.

Ces facteurs doivent impérativement être pris en compte pour assurer une gestion thermique optimale et garantir la fiabilité des systèmes électroniques.

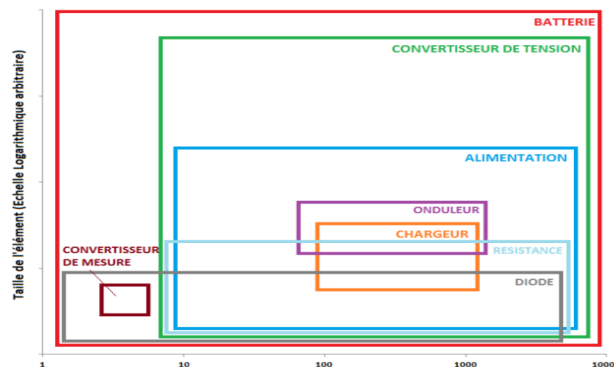


Figure I.1: Puissance Electrique (Watt)

Figure 1.1 : La taille des éléments électroniques en fonction de leur puissance [1]

1.3 Les différents modes de transfert thermique

L'énergie thermique dans les composants électroniques est principalement générée au niveau des zones actives, sous forme de pertes thermiques. Ces pertes correspondent à une dissipation de puissance inhérente au fonctionnement des dispositifs, et peuvent être classées en deux catégories principales :

- Les pertes en conduction,
- Les pertes en commutation.

La figure 1.2 illustre les différentes puissances dissipées par un composant actif au cours d'un cycle complet de commutation, permettant ainsi de visualiser l'évolution et la répartition des pertes thermiques dans le temps.

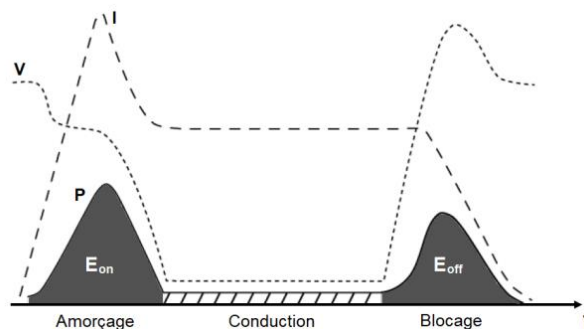


Figure 2.2: Puissance dissipée en commutation dans un composant électrique

La puissance dissipée par un composant électrique peut être exprimée à l'aide de la relation suivante :

$$P_p = R_{on} \cdot I_{eff}^2 + V_d \cdot I_{moy} + f \cdot (E_{on} + E_{off}) \quad (1.1)$$

Avec :

- R_{on} : la résistance du composant lorsqu'il est en état de conduction (état passant),
- V_d : la différence de potentiel appliquée à un composant bipolaire,
- f : la fréquence de fonctionnement du composant,
- E_{on} et E_{off} : l'énergie dissipée respectivement lors de la mise en conduction et lors du passage à l'état de blocage.

Pendant la phase de blocage, les pertes thermiques sont généralement considérées comme négligeables aux températures de fonctionnement normales.

Cependant, lorsque la fréquence de fonctionnement augmente, les pertes par commutation deviennent prédominantes par rapport aux pertes par conduction.

Chapitre I: Méthodes de Refroidissement

Les transferts de chaleur entre le composant électronique et son environnement peuvent se produire selon trois mécanismes physiques principaux :

- **la conduction,**
- **la convection,**
- **le rayonnement.**

1.3.1 La conduction thermique

La conduction thermique est un mode de transfert d'énergie calorifique qui se produit en présence d'un gradient de température au sein d'un matériau homogène et isotrope. Ce phénomène repose sur la propagation de l'agitation thermique entre les particules, sans déplacement net de matière.

Le flux de chaleur transmis par conduction à travers un composant électronique dépend de plusieurs facteurs, notamment :

- la nature du matériau,
- sa géométrie,
- son épaisseur,
- et le gradient de température appliqué.

La transmission de chaleur s'effectue entre deux zones d'un même milieu en contact physique, du point le plus chaud vers le point le plus froid. Comme illustré à la figure 1.3, ce transfert se fait sans mouvement d'atomes ou de molécules, et la température se stabilise de manière uniforme en régime permanent.

Le transfert thermique suit ainsi la direction du gradient de température, allant systématiquement de la source chaude (température T_2) vers la source froide (température T_1).

Ce phénomène est régi par **la loi de Fourier**, qui exprime la quantité de chaleur dQ traversant une surface S à un point x , sur une épaisseur dx et pendant une durée dt

$$dQ = -\lambda S \frac{dT}{dx} dt = -\lambda S (T_1 - T_2) dt \quad (1.2)$$

Avec

- * dQ est l'énergie élémentaire (J).
- * dt est le temps élémentaire (s).
- * λ est la conductivité thermique ($Wm^{-1}K^{-1}$).
- * S est la section (m^2).
- * dT/dx exprime le gradient de température au point x ($K.m^{-1}$).

Chapitre I: Méthodes de Refroidissement

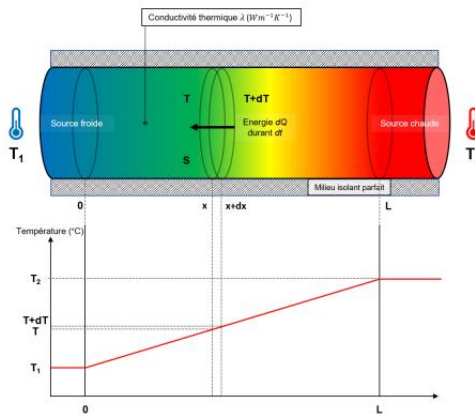


Figure 1.3 :Le principe de la conduction thermique

La loi de Fourier, formulée dans l'équation (1.2), permet de définir deux grandeurs thermiques fondamentales :

- Le flux thermique représentant la quantité de chaleur traversant une section donnée en un point x , comme exprimé dans l'équation (1.3),
- La densité de flux thermique ϕ représentant le flux thermique par unité de surface, donnée par l'équation (1.4).

$$\phi(W) = \frac{dQ}{dt} = -\lambda S \frac{dT}{dx} \quad (1.3)$$

$$\phi(W.m^{-2}) = \frac{\phi}{S} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1.4)$$

En régime permanent, la répartition de la température à travers un matériau est généralement quasi linéaire, ce qui implique que le gradient de température devient constant dans le domaine considéré.

$$\frac{T(x)}{dx} = -\frac{d}{dx} \left(\frac{T_1 - T_2}{L} x + T_1 \right) = -\frac{T_1 - T_2}{L} \quad (1.5)$$

Par conséquent, le flux thermique devient proportionnel au gradient de température établi entre les deux surfaces, l'une chaude et l'autre froide.

$$\phi = \frac{\lambda S}{L} (T_2 - T_1) \quad (1.6)$$

avec L est la longueur caractéristique (m).

1.3.2 La convection thermique

La convection thermique est un mode de transfert de chaleur qui s'accompagne d'un déplacement de masse au sein d'un fluide, qu'il soit liquide ou gazeux.

Chapitre I: Méthodes de Refroidissement

Ce transfert d'énergie thermique résulte du mouvement des molécules ou des atomes dans le fluide, en interaction directe avec une surface solide à température différente, comme illustré à la figure 1.4.

Le mécanisme de convection se produit lorsqu'il existe une différence de température entre le fluide et la paroi solide. Le fluide s'échauffe ou se refroidit au contact de cette surface, entraînant des mouvements internes qui favorisent le transfert de chaleur.

En fonction de l'origine des forces motrices responsables du déplacement du fluide, on distingue deux types principaux de convection :

- La convection naturelle (ou libre) : le mouvement du fluide est généré uniquement par les différences de densité dues aux gradients de température.
- La convection forcée : le fluide est mis en mouvement par une action mécanique externe (ventilateur, pompe, etc.), ce qui intensifie le transfert thermique.

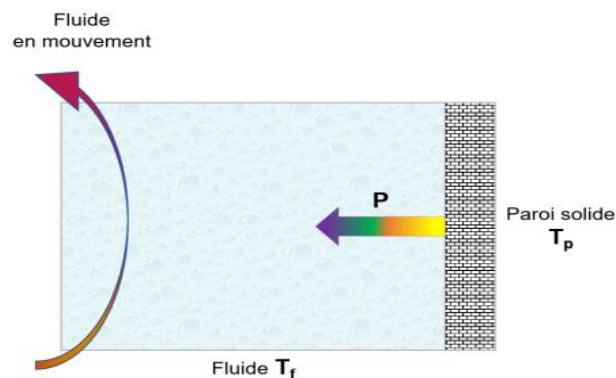


Figure 1.4 : Le principe de la convection thermique d'un fluide en mouvement

La convection naturelle se manifeste spontanément dans un fluide en mouvement lorsqu'il existe une différence de température entre les particules chaudes et froides, entraînant une variation de densité qui génère le déplacement du fluide.

En revanche, dans le cas de la convection forcée, le mouvement du fluide résulte d'une action mécanique extérieure, comme l'utilisation d'un ventilateur ou d'une pompe, permettant d'intensifier les échanges thermiques.

Le phénomène de transfert thermique par convection implique des mécanismes complexes relevant de la mécanique des fluides. En pratique, pour simplifier l'analyse, on se limite généralement à l'étude du flux de chaleur échangé entre la surface solide et le fluide en mouvement à son contact.

Sur le plan mathématique, ce flux thermique est décrit par la loi de Newton du refroidissement, exprimée comme suit :

$$\phi = h(T_p - T_f)S \quad (1.7)$$

Chapitre I: Méthodes de Refroidissement

Avec :

- * ϕ est le flux thermique (W).
- * h est le coefficient de convection ($Wm^{-2}K^{-1}$).
- * T_p et T_f sont respectivement les températures de paroi et de fluide en mouvement (K).
- * S est la surface de contact fluide/solide (m^2)

Les principaux facteurs influençant la valeur du coefficient de transfert thermique par convection h sont essentiellement liés aux caractéristiques géométriques de la surface d'échange entre le fluide et le solide, ainsi qu'aux propriétés du fluide, notamment sa température, sa vitesse d'écoulement, et sa viscosité.

Le coefficient de transfert de chaleur par convection h peut être déterminé à l'aide du théorème de Vaschy-Buckingham, qui permet d'exprimer les relations entre grandeurs physiques sous forme de groupes sans dimension, en fonction de trois unités fondamentales : la masse, la longueur et le temps.

- **Le nombre de Nusselt (Nu)**

Le nombre de Nusselt est un nombre adimensionnel qui permet de caractériser le type de transfert de chaleur entre une surface solide et un fluide en écoulement. Il représente le rapport entre le transfert de chaleur par convection et le transfert de chaleur par conduction dans un régime permanent.

Il s'exprime mathématiquement par la relation suivante :

$$N_u = \frac{hL}{\lambda} \quad (1.8)$$

- **Le nombre de Reynolds (Re)**

Le nombre de Reynolds est un nombre adimensionnel qui permet de caractériser le régime d'écoulement d'un fluide. Il exprime le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses agissant sur le fluide.

Mathématiquement, il est défini par la relation :

$$R_e = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (1.9)$$

Avec :

- * ρ est la masse volumique du fluide (Kgm^{-3})
- * μ est la viscosité dynamique du fluide ($kgm^{-1}s^{-1}$)
- * V est la vitesse de fluide (ms^{-1}).

Chapitre I: Méthodes de Refroidissement

- **Le nombre de Prandtl : (Pr)**

Le nombre de Prandtl est un nombre adimensionnel qui caractérise les propriétés thermiques d'un fluide en comparant sa diffusivité visqueuse à sa diffusivité thermique. Il se définit par :

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad (1.10)$$

Avec, C_p présente la capacité thermique massique ou la chaleur spécifique ($JK^{-1}g^{-1}$).

1.3.3 Transfert thermique par rayonnement

Le rayonnement thermique, également appelé rayonnement électromagnétique, constitue l'un des trois modes fondamentaux de transfert de chaleur. Il est défini comme une émission d'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques, résultant de l'agitation thermique des molécules au sein d'un matériau, quel que soit son état physique (solide, liquide ou gaz).

Ce mode de transfert ne nécessite aucun support matériel, ce qui le distingue de la conduction et de la convection. Il devient particulièrement significatif à hautes températures, où les longueurs d'onde émises sont plus courtes (dans l'infrarouge, voire le visible).

Le rayonnement thermique dépend fortement de l'émissivité de la surface émettrice, un paramètre compris entre 0 et 1 :

- Une émissivité de 1 correspond à un corps noir, qui émet le maximum d'énergie possible à une température donnée.
- Une émissivité plus faible indique une capacité moindre à émettre du rayonnement thermique, ce qui est typique des surfaces réfléchissantes comme les métaux polis.

Comparé à la conduction et à la convection, le rayonnement peut devenir prépondérant à haute température, notamment dans les systèmes à vide ou dans les composants électroniques très chauffés.

La figure 1.5 illustre le phénomène global de transfert par rayonnement, dans le cas d'un cylindre.

Considérons une surface plane S , appartenant à un cylindre dont les deux extrémités sont maintenues à des températures différentes, T_1 et T_2 , avec $T_1 > T_2$. Dans ce cas, un transfert de chaleur par conduction s'effectue le long du cylindre, de la zone chaude vers la zone froide.

Par ailleurs, la surface latérale gauche du cylindre est en contact avec le milieu ambiant à une température T_a , et c'est la seule surface du système participant à un échange thermique par rayonnement. Ce rayonnement thermique dépendra des paramètres caractéristiques de la

Chapitre I: Méthodes de Refroidissement

surface, notamment son émissivité et sa température, ainsi que de la température ambiante du milieu environnant.

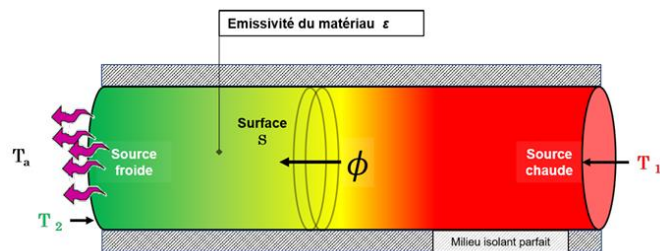


Figure 1.5 : Le principe du rayonnement thermique

Selon la loi de Stefan-Boltzmann, l'échange de chaleur par rayonnement entre la surface froide S et le milieu ambiant à température T_a peut être exprimé par l'équation suivante :

$$\phi = \epsilon \sigma S (T_2^4 - T_a^4) \quad (1.11)$$

avec :

- ϵ coefficient d'émissivité du matériau ($0 < \epsilon < 1$),
- σ : constante de Stefan-Boltzmann, égale à $5,67 \times 10^{-8} \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}\text{)}$
- S : surface de contact entre le solide et le fluide (en m^2),
- T_2 : température de la surface froide (en kelvins),
- T_a : température ambiante (en kelvins).

Dans le cadre de cette étude, le transfert thermique par rayonnement est généralement considéré comme négligeable, notamment dans les applications ciblées, où la gestion thermique repose principalement sur les mécanismes de conduction et de convection, qui sont largement prédominants [2].

1.4 Les systèmes de refroidissement : technologies et performances

Dans tout système de refroidissement, la chaleur générée par les composants électroniques doit traverser successivement les différentes couches de l'assemblage avant d'atteindre le liquide de refroidissement. Pour assurer une dissipation thermique efficace, de nombreuses technologies d'échange thermique ont été développées et perfectionnées.

Ces systèmes visent à évacuer de manière optimale l'énergie thermique transmise à la couche externe, en contact direct avec le milieu ambiant, afin de maintenir un fonctionnement stable et fiable des dispositifs concernés.

Les techniques de refroidissement peuvent être globalement classées en deux grandes catégories :

Chapitre I: Méthodes de Refroidissement

- **Les systèmes de refroidissement actifs :**

Ce type de système repose sur le transfert thermique par convection forcée. Il nécessite l'utilisation d'une pompe mécanique pour assurer la circulation du fluide caloporteur, ainsi qu'un circuit externe destiné à dissiper la chaleur produite vers l'extérieur. Cette méthode est généralement plus performante, mais elle engendre une consommation énergétique plus élevée.

- **Les systèmes de refroidissement passifs :**

À l'inverse, cette approche est fondée principalement sur le transfert de chaleur par convection naturelle, ce qui permet de réduire significativement la consommation énergétique. Selon la nature du contact entre le fluide caloporteur et les composants électroniques, on distingue deux sous-catégories : le refroidissement passif direct et le passif indirect.

La classification des systèmes de refroidissement passifs est illustrée dans la figure 1.6, selon les deux principaux modes de transfert thermique.

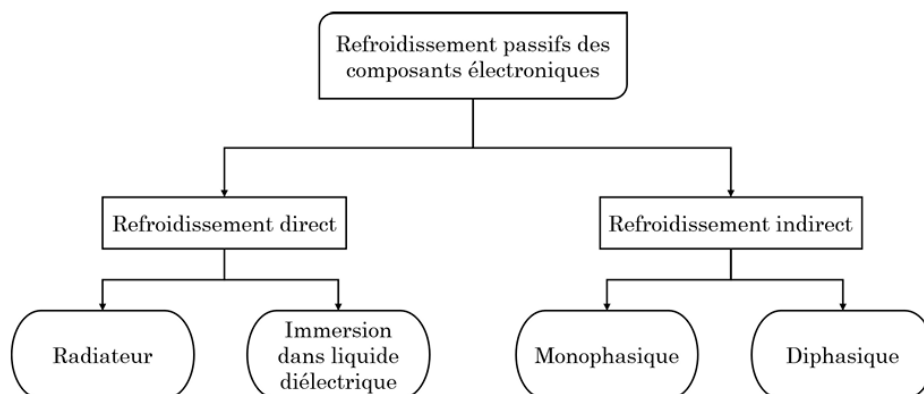


Figure 1.6 : La classification des systèmes de refroidissement passif

Dans cette étude, l'attention est portée exclusivement sur le refroidissement passif indirect des composants électroniques.

1.4.1 Les systèmes de refroidissement monophasiques

Un échangeur thermique monophasique se caractérise par une configuration dans laquelle le fluide caloporteur circule sans changement d'état physique.

La chaleur produite par les composants est dissipée vers l'extérieur principalement par convection, conduction, ainsi que par transport capacitif.

Les systèmes de refroidissement monophasiques peuvent être regroupés en deux grandes catégories :

- Les systèmes à refroidissement liquide [3],
- Et les systèmes à refroidissement par air.

1.4.1.1 Refroidissement monophasique à l'air

Pour les composants électroniques soumis à des contraintes thermiques modérées, l'usage d'un système de refroidissement à l'air est généralement recommandé.

Ce type de refroidissement se distingue par sa simplicité de mise en œuvre ainsi que son faible coût.

Les transferts thermiques entre le composant et l'environnement ambiant s'effectuent principalement par convection naturelle ou forcée, et de manière secondaire par rayonnement. Convection naturelle à l'air.

Lorsqu'un composant électronique est en contact direct avec l'air ambiant, une différence de température entre les deux entraîne un transfert de chaleur par convection naturelle. Dans ce cas, le coefficient d'échange thermique h varie généralement entre 5 et 25 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Cependant, pour dissiper des puissances thermiques plus élevées, il devient nécessaire d'augmenter la surface d'échange entre le composant et l'environnement. Cela permet de garantir une gestion thermique plus efficace.

Dans cette optique, plusieurs solutions de refroidissement ont été développées afin d'améliorer le coefficient d'échange thermique convectif. Parmi ces solutions figurent notamment les dissipateurs thermiques à ailettes et ceux en nid d'abeilles, comme illustré à la figure 1.7.

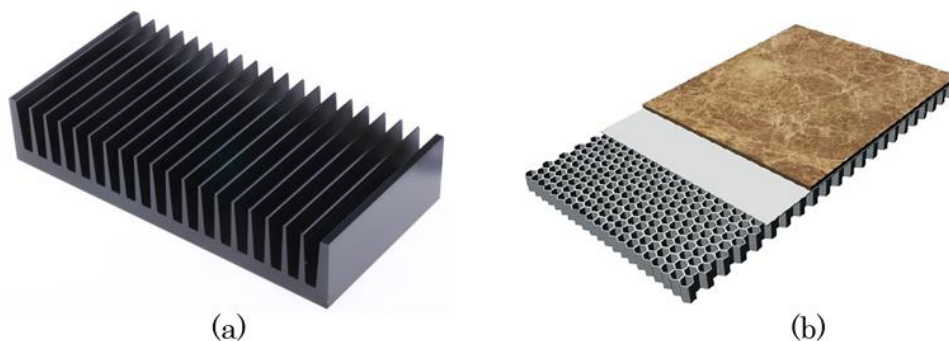


Figure 1.7 : Exemple de dissipateur thermique (a) : à ailettes et (b) : à nid d'abeille

- **Convection forcée à l'air**

La convection forcée par soufflage d'air constitue l'une des techniques les plus répandues pour améliorer le transfert thermique entre un composant électronique et le milieu ambiant. Comme illustré dans la figure 1.8, cette méthode repose sur l'utilisation de ventilateurs afin d'augmenter le coefficient d'échange thermique h , pouvant varier de 10 à 500 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$.

Ce procédé de refroidissement forcé à l'air présente de nombreux avantages,

Chapitre I: Méthodes de Refroidissement

notamment une mise en œuvre simple, une bonne fiabilité avec une durée de vie satisfaisante, ainsi qu'un coût relativement faible.

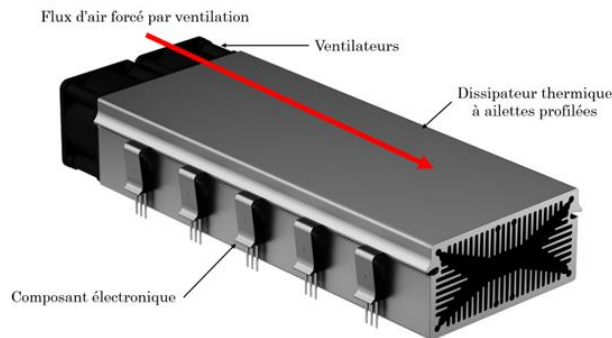


Figure 1.8 : Exemple d'un système de refroidissement par air forcé

Avec l'augmentation continue de la densité thermique des systèmes électroniques embarqués, les ventilateurs ont dû être miniaturisés de manière significative. Cette réduction de taille limite leur capacité de dissipation thermique, rendant ainsi insuffisant le refroidissement par air dans certaines applications.

Par conséquent, il devient indispensable d'envisager un changement du fluide caloporteur afin d'améliorer les performances de refroidissement. L'adoption de liquides présentant de meilleures propriétés thermiques permet d'assurer une gestion thermique plus efficace, notamment dans les systèmes à forte densité de puissance.

1.4.1.2 Systèmes de refroidissement liquide

Les systèmes de refroidissement par liquide représentent une alternative efficace pour l'évacuation de la chaleur vers le milieu ambiant, notamment dans les applications où les besoins en dissipation thermique sont élevés. Le refroidissement liquide monophasique est particulièrement répandu dans le domaine de l'électronique, notamment sous forme de plaques à eau.

Comme illustré dans la figure 1.9, ce type de système repose principalement sur deux composants essentiels :

- Une pompe, qui permet d'assurer la circulation continue du fluide caloporteur dans le circuit,
- Un échangeur thermique, qui joue un rôle crucial dans la dissipation de la chaleur extraite, en facilitant le transfert de l'énergie thermique du liquide vers l'environnement extérieur.

Ce mode de refroidissement permet de maintenir des températures de fonctionnement optimales même en présence de densités de chaleur importantes, grâce aux propriétés thermiques supérieures du liquide utilisé par rapport à l'air.

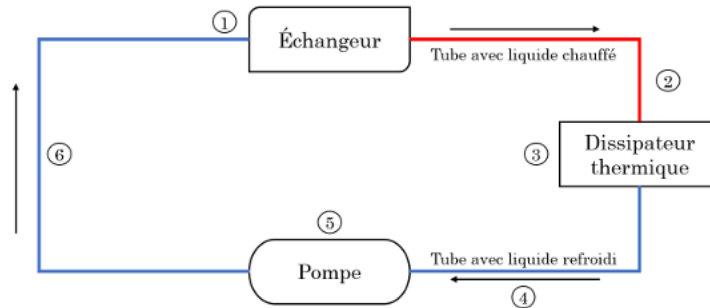


Figure 1.9 : Schéma simplifié d'un système de refroidissement par liquide

La **sélection d'un fluide de refroidissement** repose sur plusieurs critères essentiels :

1. Les performances thermiques et hydrauliques : Ces facteurs influencent directement les caractéristiques et l'efficacité du système de refroidissement. Ils sont cruciaux pour assurer une dissipation thermique optimale.
2. La sécurité : Le fluide doit répondre aux normes de sécurité, notamment en termes de toxicité et de risque d'incendie.
3. Le coût : Le prix du fluide joue un rôle déterminant dans la sélection du système de refroidissement, en particulier pour les applications de grande envergure.
4. Les conditions de stockage : Il est important de prendre en compte la facilité de stockage du fluide, notamment en termes de stabilité et de durée de vie.
5. Les contraintes de pollution : Les fluides de refroidissement doivent être écologiquement responsables, en minimisant leur impact environnemental.

L'eau glycolée est le fluide de refroidissement le plus couramment utilisé, en raison de ses excellentes propriétés thermiques et de sa grande disponibilité. Ce fluide est particulièrement apprécié pour sa capacité calorifique élevée, sa conductivité thermique importante et son faible coût. De plus, le coefficient d'échange convectif forcé h de l'eau glycolée varie généralement entre 3000 et 10000 W/m²·K.

Les canaux utilisés pour la circulation du fluide caloporteur peuvent être classés en trois grandes catégories :

1. Les micro-canaux : avec des diamètres compris entre 10 et 800 μm .
2. Les mini-canaux : avec des diamètres compris entre 1 et 10 mm.
3. Les plaques froides : pour des diamètres supérieurs à 10 mm.

Par ailleurs, plusieurs solutions innovantes existent pour améliorer l'efficacité des systèmes de refroidissement liquide, telles que le Spray Cooling et le refroidissement par jets, illustrés dans la figure 1.10. Le principe du Spray Cooling consiste à pulvériser un fluide de

Chapitre I: Méthodes de Refroidissement

refroidissement à proximité de la surface à refroidir. Cette technique présente plusieurs avantages, notamment dans le domaine de l'électronique de puissance :

- Une couverture spatiale efficace de la zone à refroidir.
- L'utilisation de faibles quantités de liquide, ce qui réduit la fréquence de maintenance.
- Une capacité d'évacuation thermique significativement supérieure, offrant des performances au moins 50 % plus efficaces qu'un système classique.

En dépit de sa robustesse et de son efficacité remarquable pour dissiper des flux thermiques élevés, la technique du Spray Cooling présente également certaines limites qui peuvent restreindre son application dans des contextes industriels complexes. Parmi ces inconvénients, on peut citer :

- La complexité de réglage du système d'injection, notamment en ce qui concerne les caractéristiques granulométriques et dynamiques du spray (taille des gouttelettes, vitesse, répartition spatiale), ainsi que la distance optimale entre l'injecteur et la surface à refroidir.
- La complexité des injecteurs eux-mêmes, qui doivent répondre à des exigences de précision et de fiabilité élevées.
- La nécessité de mettre le liquide sous pression avant son injection, ce qui impose une infrastructure spécifique et un contrôle rigoureux du système.

En revanche, dans le domaine industriel, le refroidissement par jets représente l'une des solutions les plus privilégiées, notamment pour le traitement thermique des chambres de combustion dans les moteurs de nouvelle génération, comme c'est le cas pour les aubes de turbine. Cette méthode repose sur l'impact de jets fluides directement dirigés vers les surfaces à refroidir.

Les performances thermiques du refroidissement par jets dépendent essentiellement de plusieurs facteurs :

- La nature du fluide caloporteur et son débit.
- Le nombre de jets employés et leur diamètre.
- La distribution spatiale des jets sur la surface cible.

La mise en œuvre de cette technique exige la pressurisation du fluide ainsi qu'un circuit hydraulique complet intégrant une pompe, un échangeur thermique, et parfois des éléments de régulation pour assurer un fonctionnement stable et performant.

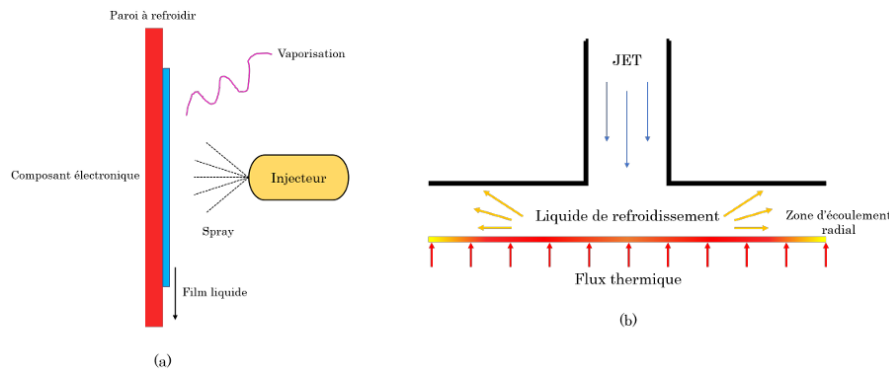


Figure 1.10 : Principe de refroidissement par (a) Spray cooling et (b) Refroidissement par jets.

Comparativement aux techniques de refroidissement par spray, le refroidissement par jets se distingue par la nécessité de maîtriser plusieurs paramètres critiques afin de garantir son efficacité thermique. En particulier, il est essentiel de bien régler :

- La zone d'impact du jet sur la surface à refroidir, car une mauvaise orientation peut réduire l'efficacité de l'échange thermique.
- Le débit du jet, qui influence directement la quantité de chaleur extraite de la paroi.
- La distance entre le jet et la paroi, dont la variation peut affecter la distribution du flux thermique et l'homogénéité du refroidissement.

Ces paramètres doivent être soigneusement étudiés et optimisés dans la phase de conception pour assurer le bon fonctionnement et la performance maximale du dispositif.

1.4.2 Les systèmes de refroidissement diphasiques

1.4.2.1 Refroidissement par changement de phase liquide-vapeur

Le refroidissement diphasique liquide-vapeur constitue l'une des solutions les plus performantes et adaptables pour la gestion thermique des systèmes électroniques ou énergétiques à haute densité de puissance. Ce mode de transfert thermique repose sur le changement d'état du fluide caloporteur, en l'occurrence le passage de l'état liquide à l'état vapeur, permettant ainsi de dissiper une quantité importante de chaleur grâce à la chaleur latente de vaporisation.

L'efficacité de ce procédé dépend principalement de deux paramètres fondamentaux :

- la chaleur latente de vaporisation du fluide utilisé,
- le débit massique de ce fluide au sein du système.

En fonction de leur configuration structurelle et de leur mode de fonctionnement, quatre principaux types de systèmes de refroidissement diphasique liquide-vapeur peuvent être distingués :

Chapitre I: Méthodes de Refroidissement

1. Le caloduc (Heat Pipe) :

Ce dispositif assure le transfert de chaleur par capillarité à travers un fluide en circulation dans un tube étanche. Le liquide s'évapore au niveau de la zone chaude, migre vers la zone froide où il se condense, puis retourne par capillarité vers la zone d'évaporation.

2. La chambre à vapeur (Vapor Chamber) :

Variante du caloduc, la chambre à vapeur se distingue par sa géométrie plate et sa grande surface de contact, offrant ainsi une distribution homogène de la chaleur sur toute la surface. Elle est largement utilisée pour le refroidissement de composants électroniques à forte densité thermique.

3. Les système à boucle fermée (Loop Heat Pipe LHP) :

Il s'agit d'une technologie avancée de transfert de chaleur qui repose également sur l'évaporation-condensation, mais avec une séparation physique entre l'évaporateur et le condensateur. Ce système est particulièrement adapté aux applications spatiales ou aux environnements contraints.

4. Les systèmes à flux pulsé (Oscillating Heat Pipe OHP) :

Ces systèmes se basent sur les oscillations spontanées du fluide diphasique dans des microcanaux sinueux. Le mouvement auto-entretenu du liquide et de la vapeur assure un transfert thermique rapide, même sans structure capillaire.

• **Refroidissement par immersion dans un fluide diélectrique**

Le refroidissement par immersion dans un fluide diélectrique, parfois désigné sous le terme de *condensateur*, est une technique ancienne utilisée depuis les années 1940 pour le refroidissement direct de composants électroniques. Le principe fondamental de cette méthode consiste à immerger directement les composants électroniques dans un liquide diélectrique thermiquement stable et électriquement isolant.

Le transfert thermique s'effectue à l'interface composant/liquide : la chaleur générée par le composant provoque l'ébullition locale du fluide, transformant une partie du liquide en vapeur. Cette vapeur est ensuite condensée à l'aide d'un échangeur thermique, généralement par convection naturelle ou forcée, permettant ainsi de fermer le cycle thermodynamique.

Cette technique présente plusieurs avantages notables :

- Réduction significative des résistances thermiques par suppression des interfaces solides,
- Refroidissement homogène de tous les composants immergés,
- Élimination des problèmes liés à la poussière ou aux vibrations mécaniques.

Chapitre I: Méthodes de Refroidissement

Cependant, elle implique aussi certaines contraintes :

- Le choix du fluide diélectrique doit garantir une grande stabilité chimique, une faible toxicité et une bonne compatibilité avec les matériaux électroniques,
- Le système requiert une étanchéité parfaite et un contrôle rigoureux de la condensation pour éviter les pertes ou l'accumulation de vapeur,
- Le coût des fluides diélectriques performants peut être relativement élevé.

Aujourd'hui, cette technologie connaît un renouvellement d'intérêt, notamment dans les domaines du calcul haute performance (HPC) et des centres de données, où la densité de puissance impose des solutions de refroidissement très efficaces et compactes.

1.4.2.1 Refroidissement par changement de phase liquide-vapeur

Le refroidissement diphasique liquide-vapeur est très efficace pour gérer la chaleur, car il repose sur l'évaporation du fluide caloporteur. La chaleur évacuée dépend de la chaleur latente et du débit massique du fluide. On distingue plusieurs configurations :

- Immersion dans un fluide diélectrique : les composants sont plongés dans un liquide isolant qui bout au contact de la chaleur. La vapeur produite est ensuite condensée par un échangeur thermique.
- Refroidissement par caloducs : système fermé où le fluide circule en boucle. Très bonne conductivité thermique et fonctionnement quasi isotherme.
- Refroidissement par thermosiphon : similaire aux caloducs, mais sans mèche ; le retour du fluide condensé se fait par gravité.
- Refroidissement par boucle diphasique (CPL, LHP) : système passif séparant liquide et vapeur pour éviter les interactions entre phases.

1.4.2.2 Refroidissement par changement de phase solide-liquide

- **Principe de matériaux à changement de phase**

Lorsque les systèmes classiques sont inefficaces ou encombrants, les matériaux à changement de phase (MCP) peuvent être utilisés. Ces matériaux stockent et libèrent une grande quantité d'énergie en changeant d'état, de solide à liquide et vice versa, grâce à leur chaleur de fusion élevée.

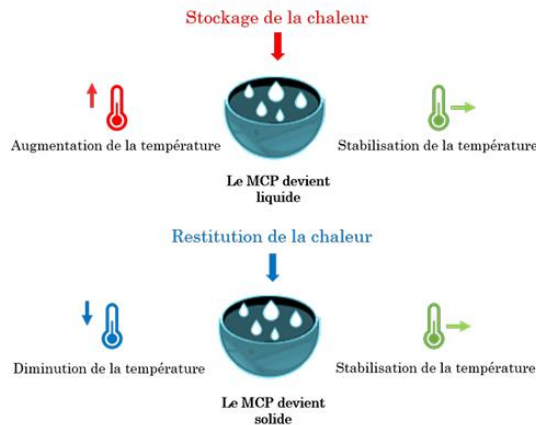


Figure 1.11 : Principe des matériaux à changement de phase.

Autrement dit, lorsque la température augmente, le matériau à changement de phase devient liquide, stockant ainsi la chaleur jusqu'à ce que la température se stabilise. Inversement, lorsque la température diminue, le matériau redevient solide, libérant la chaleur pour maintenir la stabilité thermique (voir figure 1.11).

L'absorption de la chaleur grâce à la chaleur latente des MCP ralentit l'augmentation de la température des composants électroniques, ce qui rend ces systèmes parfaits pour des appareils fonctionnant de manière périodique.

- **Critère de sélection d'un MCP**

Le choix d'un MCP (matériau à changement de phase) repose sur plusieurs critères, non seulement liés à sa capacité de stockage thermique, mais aussi sur des aspects environnementaux et économiques. Plusieurs études ont été menées pour aider à sélectionner le MCP le plus adapté à une application spécifique[4-6]. Le choix d'un MCP se base principalement sur ses propriétés thermo-physiques, cinétiques, chimiques, économiques et mécaniques.

-Propriétés thermo-physiques :

- La température de fusion doit correspondre à la plage de fonctionnement de l'application.
- Une chaleur latente de fusion élevée pour un stockage thermique efficace.
- Une bonne conductivité thermique pour un faible gradient de température entre le MCP et le fluide caloporteur.
- Une densité élevée pour réduire le volume de stockage.
- Une faible expansion volumique pour minimiser les risques de fuite ou de surpression.
- Une faible pression de vapeur saturante pour limiter les risques de vaporisation.
- Une fusion/solidification cohérente.

Chapitre I: Méthodes de Refroidissement

- Propriétés chimiques et cinétiques :

- Faible potentiel de corrosion et bonne compatibilité avec les matériaux du système.
- Stabilité chimique pendant les cycles de charge et décharge.
- Le MCP ne doit pas être dangereux, explosif ou toxique.
- Absence de phénomène de surfusion (maintien de l'état liquide en dessous de la température de solidification).

- Propriétés économiques et mécaniques :

- Faible coût et facilité de fabrication.
- Disponibilité constante.
- Impact environnemental minimal.

• Les différents types de MCP

Une classification générale des matériaux à changement de phase (MCP) a été proposée par Abhat [7], et elle est largement utilisée par la communauté scientifique du stockage latent. Cette classification permet de distinguer les types de MCP en fonction de leurs caractéristiques spécifiques. La figure 1.12 illustre cette classification.

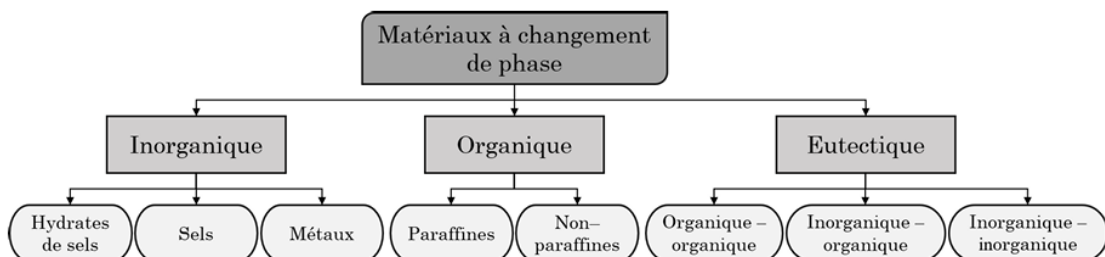


Figure 1.12 : Les différentes classes des MCP

D'une manière générale, les matériaux à changement de phase (MCP) sont regroupés en trois grandes catégories.

○ les composés inorganiques

La première catégorie concerne les composés inorganiques, qu'on appelle aussi composés minéraux. Parmi ceux-ci, on retrouve principalement les sels, qui sont des substances formées d'ions positifs (cations) et négatifs (anions). Par exemple, les chlorures et les fluorures possèdent une chaleur latente de fusion plus élevée que d'autres types de sels comme les sulfates ou les nitrates [8].

Les sels présentent plusieurs avantages :

- Ils ont une chaleur latente de fusion très importante, généralement comprise entre 68 et 1040 kJ/kg, ce qui signifie qu'ils peuvent stocker une grande quantité de chaleur.

Chapitre I: Méthodes de Refroidissement

- Leur température de fusion est élevée, allant de 250 à 1680 °C, ce qui les rend adaptés à des applications à haute température.
- Ils ont aussi une faible expansion volumique, d'environ 7 %, ce qui réduit les risques de fuite ou de déformation du contenant.

Cependant, malgré ces avantages, les sels présentent un inconvénient majeur : leur stabilité thermique n'est pas toujours garantie, ce qui peut limiter leur durée de vie ou leur efficacité dans certaines conditions.

-Les hydrates de sels : Ce sont des composés inorganiques dont la formule chimique générale est de la forme $AB \cdot nH_2O$. Ils possèdent plusieurs atouts, notamment une grande chaleur latente de fusion, située entre 100 et 300 kJ/kg, ce qui les rend efficaces pour le stockage d'énergie. Leur température de fusion est relativement basse (entre 8 et 100 °C), ce qui convient bien aux applications fonctionnant à basse température. De plus, ils ont une bonne conductivité thermique, avoisinant 0,5 W/m·K.

Toutefois, ces matériaux ont aussi des inconvénients : ils sont sujets à la surfusion, leur fusion peut être non congruente (c'est-à-dire qu'ils ne fondent pas de manière homogène), et ils peuvent également poser des problèmes de corrosion [9].

-Les métaux : Certains chercheurs considèrent également les métaux comme des matériaux à changement de phase [10, 11]. En effet, les métaux présentent une chaleur latente très élevée, une grande stabilité à long terme et une conductivité thermique nettement supérieure à celle des autres types de MCP. Cela permet un stockage rapide de la chaleur générée, avec une faible expansion volumique.

Malgré ces avantages, les métaux posent un risque de corrosion, ce qui peut limiter leur utilisation dans certaines applications.

- Les composés organiques

Les matériaux à changement de phase organiques sont principalement composés de trois types :

- Les paraffines : Ce sont des hydrocarbures saturés de formule générale C_nH_{2n+2} . Elles figurent parmi les MCP les plus utilisés, en raison de leur bonne stabilité chimique, température de fusion élevée et chaleur latente importante [12]. Cependant, elles présentent des inconvénients : une faible conductivité thermique (environ 0,25 W/m·K), une expansion volumique élevée (jusqu'à 15 %) [13], ainsi qu'une densité relativement importante (environ 800 kg/m³) [14].
- Les acides gras : Ayant des propriétés proches de celles des paraffines, ils sont représentés par la formule générale $CH_3(CH_2)_{2n}COOH$. Ils offrent une large plage de

Chapitre I: Méthodes de Refroidissement

température de fusion (entre 40 et 150 °C) et une bonne chaleur latente de fusion. Toutefois, ils peuvent souffrir de problèmes de stabilité chimique [15] et sont susceptibles d'être dégradés à l'état liquide à cause de la vaporisation.

- Les alcools de sucre : Ils font partie de la famille des polyols. Ces composés se distinguent par une enthalpie de changement de phase élevée, une forte densité (environ 1500 kg/m³), ce qui leur confère une bonne densité énergétique. De plus, ils sont stables chimiquement **et** peu coûteux. Leur principal inconvénient est leur tendance à la surfusion.
- Les composés eutectiques

Les composés eutectiques sont des mélanges de matériaux à changement de phase, qu'ils soient inorganiques, organiques, ou une combinaison des deux [6, 16]. Ils se distinguent par une chaleur latente élevée et un changement de phase bien défini. Toutefois, leur principal inconvénient réside dans la difficulté à déterminer avec précision le point eutectique, ce qui est essentiel pour obtenir une température de fusion constante.

Chaque catégorie de MCP possède des propriétés thermochimiques spécifiques, ce qui influence directement la conception du système de stockage thermique.

• Comparaison des différentes familles de MCP

La figure 1.13 illustre une comparaison entre les principales familles de matériaux à changement de phase (MCP), en tenant compte de deux critères essentiels : la chaleur latente de fusion et le point de fusion. Cette comparaison permet de mieux choisir le type de MCP adapté à une application donnée, selon les exigences thermiques spécifiques.

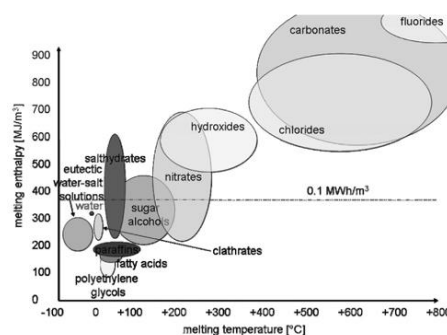


Figure 1.13 : Comparaison des MCP par famille en fonction de leur chaleur latente et leur température de fusion [17]

Prenons l'exemple d'une application industrielle nécessitant une plage de températures comprise entre 100 et 300 °C. Dans ce cas, les hydroxydes, les alcools de sucre et les nitrates de sels sont les matériaux les plus adaptés, car ils couvrent efficacement cette gamme de températures.

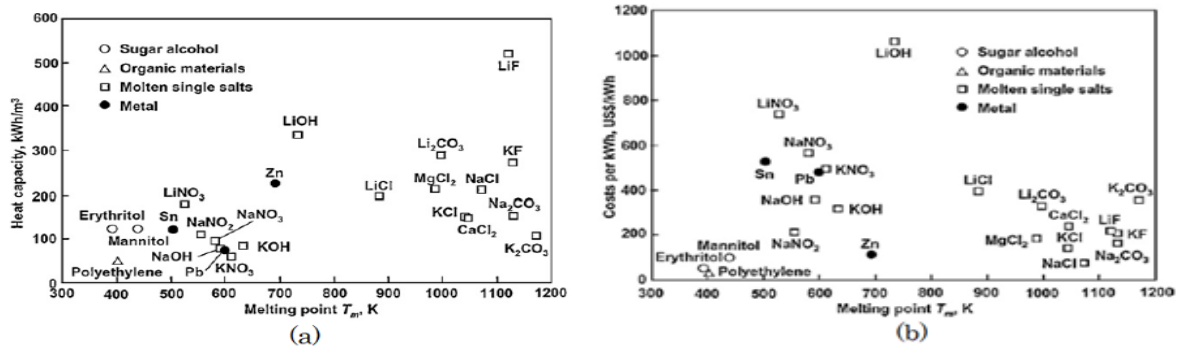


Figure 1.14 -Capacité thermique (a) et coût des MCP (b) à point de fusion élevé [18]

La figure 1.14(a) présente une comparaison des différentes familles de MCP selon leur capacité thermique et leur température de fusion. Pour une application industrielle, dans la plage de température entre 100 et 300 °C, le nitrate de lithium, le mannitol et l'érythritol se distinguent par leur grande capacité thermique.

Le coût est aussi un critère essentiel dans le choix d'un MCP. La figure 1.14(b) illustre ainsi les familles de MCP en fonction de leur prix et de leur température de fusion.

Enfin, un point commun entre presque tous les MCP, quelle que soit leur famille, est leur faible conductivité thermique, ce qui limite leur performance dans le transfert de chaleur.

1.5 Stockage d'énergie thermique

L'énergie thermique dissipée par un composant électronique peut être stockée de différentes façons :

- Par chaleur sensible : ce mode de stockage utilise des matériaux sans changement de phase, où la température du matériau augmente au fur et à mesure qu'il absorbe la chaleur.
- Par chaleur latente : ce type de stockage repose sur l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP), qui absorbent ou libèrent de la chaleur lors de leur transformation d'un état (solide ou liquide) à un autre.
- Par chaleur de réaction : ce mode fait appel à des réactions thermochimiques pour absorber ou restituer l'énergie.

Dans le cas des MCP, seuls les stockages par chaleur sensible et par chaleur latente sont pris en compte.

Les sections suivantes détailleront ces deux méthodes

1.5.1 Stockage de la chaleur sensible

Le stockage de la chaleur sensible est la méthode la plus courante pour réutiliser l'énergie thermique [17]. Il repose sur les propriétés thermo-physiques d'un matériau. La variation d'enthalpie (quantité de chaleur à pression constante) est proportionnelle à la masse du matériau, à sa capacité thermique spécifique C_p , ainsi qu'à la différence entre la température initiale et la température de stockage. Cette relation est exprimée par l'équation (1.12) :

$$H_{sensible} = \Delta H = \int_{T_1}^{T_2} m \cdot C_p dT \quad (1.12)$$

Lorsque la capacité thermique spécifique est supposée constante dans l'intervalle de températures $[T_1, T_2]$, l'équation (1.12) se simplifie en :

$$\Delta H = m \cdot C_p \cdot \Delta T = m \cdot C_p (T_1 - T_2) \quad (1.13)$$

D'après cette équation, deux situations peuvent être distinguées : on considère que le matériau stocke de l'énergie thermique si $T_2 > T_1$, et inversement.

1.5.2 Stockage de la chaleur latente

Le stockage de la chaleur latente consiste à chauffer un matériau jusqu'à ce qu'il change d'état physique. Pendant cette transformation, le matériau absorbe une certaine quantité d'énergie appelée chaleur latente de fusion. La figure 1.15 illustre une comparaison entre le stockage par chaleur sensible et par chaleur latente. On y observe que le stockage par chaleur latente présente des avantages supérieurs à celui par chaleur sensible.

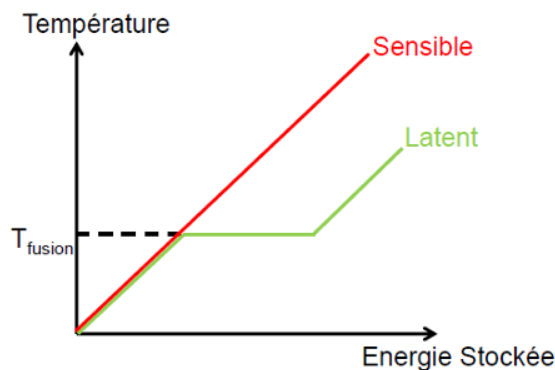


Figure 1.15 : Comparaison entre le stockage par chaleur sensible et chaleur latente [19]

La quantité d'énergie stockée lors de la transition de l'état solide à l'état liquide peut être exprimée par l'équation (1.14) :

$$\Delta H = \int_{T_1}^{T_{fusion}} m \cdot C_{p,s}(T) dT + m \cdot \Delta H_{s,l} + \int_{T_{fusion}}^{T_2} m \cdot C_{p,l}(T) dT \quad (1.14)$$

où $C_{p,s}(T)$ et $C_{p,l}(T)$ représentent respectivement les capacités thermiques massiques à l'état solide et liquide. Cette équation comprend deux contributions liées à la chaleur sensible, avant et après la fusion, ainsi qu'un terme correspondant à la chaleur latente, $(m.\Delta H_{s,l})$.

1.6 Applications du stockage d'énergie

Comme abordé dans les sections précédentes, le stockage d'énergie par changement de phase solide-liquide est un processus intrinsèquement transitoire, particulièrement adapté aux systèmes fonctionnant de manière intermittente, tels que les cycles marche-arrêt ou les périodes de pointe. Il convient également aux dispositifs nécessitant un stockage thermique pour une utilisation différée. Les matériaux à changement de phase (MCP) sont couramment employés dans la gestion thermique et le stockage d'énergie thermique.

L'intérêt pour les MCP dans la gestion thermique remonte au moins aux années 1970. La NASA s'est notamment intéressée à leur utilisation en tant que « condensateurs thermiques ». Ces matériaux ont été intégrés dans plusieurs véhicules lunaires ainsi que dans la station spatiale Skylab [20]. La note technique de 1977, A Design Handbook for Phase Change Thermal Control and Energy Storage Devices [21], constitue l'une des premières références complètes sur les MCP et reste encore aujourd'hui largement consultée et utilisée.

Dans les années 1970 et 1980, l'application des MCP dans les systèmes solaires a également suscité un intérêt croissant [22–24], notamment pour le stockage d'énergie thermique dans les centrales solaires à grande échelle ainsi que dans des installations domestiques plus petites, comme les systèmes de chauffage d'eau. Par ailleurs, le concept d'intégration des MCP dans divers matériaux de construction, tels que les panneaux muraux et les lames de plancher, a été développé à cette époque afin de concevoir des bâtiments (maisons, bureaux) présentant des besoins en chauffage et refroidissement réduits, favorisant ainsi une meilleure efficacité énergétique [25, 26].

Avec l'augmentation de la puissance de calcul dans les années 1980 et 1990, les circuits intégrés ont commencé à dissiper d'importantes quantités de chaleur, ce qui a conduit à l'émergence des applications basées sur les MCP pour la gestion thermique de l'électronique militaire et grand public à la fin des années 1990 [27–29]. Plus récemment, les MCP ont trouvé des applications dans le domaine textile, notamment pour la conception de vêtements capables d'absorber et de stocker l'énergie thermique, utilisés tant dans le secteur militaire que dans les produits de consommation [30].

1.6.1 Gestion thermique de l'électronique

Au cours des cinquante dernières années, la conception des composants électroniques a suivi de près la loi de Moore, selon laquelle la puissance de traitement double environ tous les deux ans. Cette croissance exponentielle a représenté une avancée majeure pour le secteur de l'électronique, mais a posé un défi considérable pour les ingénieurs spécialisés en gestion thermique.

Pour garantir la fiabilité, la plupart des équipements électroniques doivent fonctionner à des températures inférieures à 85 °C, et toute la chaleur générée doit être efficacement dissipée dans l'environnement, que ce soit en régime permanent ou en conditions transitoires.

Dans les systèmes informatiques classiques, comme les ordinateurs portables ou de bureau, la dissipation thermique est généralement assurée par un dissipateur thermique associé à un ventilateur, à condition que l'espace disponible dans le boîtier permette l'installation d'un dissipateur adapté. En revanche, pour les systèmes de calcul haute performance, où les flux de chaleur sont plus importants, les solutions de refroidissement liquide, telles que les plaques froides, sont de plus en plus utilisées. Ces systèmes requièrent cependant des équipements supplémentaires, comme des pompes, des tuyaux et des échangeurs de chaleur externes.

Pour l'électronique portable, qui constitue l'un des segments majeurs du marché grand public (tablettes, smartphones), les options de gestion thermique sont fortement limitées par les contraintes liées au facteur de forme. La demande croissante pour des dispositifs ultra-minces rend impossible l'utilisation de grands dissipateurs thermiques à refroidissement par air ou de systèmes de refroidissement liquide à boucle fermée.

Heureusement, la plupart des appareils électroniques portables fonctionnent selon des cycles marche/arrêt ou des pics d'activité, ce qui permet d'utiliser les matériaux à changement de phase (MCP) pour la gestion thermique. En effet, de nombreux smartphones et tablettes restent en mode veille à faible consommation durant la majeure partie de la journée, avec des phases d'activité intermittentes provoquant des pics de puissance.

Dans ce contexte, les MCP peuvent absorber ces sursauts d'énergie thermique en fondant, puis libérer progressivement la chaleur accumulée lorsque le pic d'activité est terminé. L'idée est que la chaleur pénètre rapidement dans le MCP au début du cycle de pointe, provoquant sa fusion et maintenant ainsi une température de fonctionnement stable. La durée de fusion du MCP doit être adaptée aux intervalles d'utilisation typiques, souvent compris entre 10 et 30 minutes. Ensuite, le MCP se solidifie en évacuant la chaleur vers l'environnement, se rechargeant ainsi pour le cycle suivant.

Chapitre I: Méthodes de Refroidissement

Cette utilisation des MCP permet de stabiliser la température de l'électronique pendant les pics d'activité, offrant une solution thermique passive, sans recourir à des dispositifs mécaniques comme ventilateurs ou pompes, ce qui améliore la fiabilité des appareils. Les MCP employés dans ces applications présentent généralement des températures de fusion situées entre 36 °C et 56 °C, afin de maintenir la température des composants bien en dessous de la limite admissible de 85 °C.

1.6.2 Stockage d'énergie dans les matériaux de construction

Le stockage d'énergie a depuis longtemps influencé le choix des matériaux de construction. Dès les débuts, l'homme a cherché à concevoir des habitations confortables capables d'absorber la chaleur durant la journée, afin d'éviter la surchauffe, tout en conservant la chaleur pendant la nuit pour maintenir une température agréable à l'intérieur. L'utilisation de matériaux comme l'adobe en est un excellent exemple : ces matériaux emmagasinent une grande quantité de chaleur sensible pendant la journée et la restituent lentement la nuit, assurant ainsi un confort thermique dans les environnements désertiques (voir figure 1.16).

Les matériaux à changement de phase (MCP) peuvent être employés pour réguler la température, stocker la chaleur ou le froid avec une densité énergétique élevée, et améliorer le confort thermique dans les bâtiments nécessitant une plage de température étroite. En effet, une énergie solaire stockée efficacement peut être utilisée pour le refroidissement nocturne. L'intégration des MCP représente une solution intéressante pour répondre aux besoins de chauffage, en stockant l'énergie disponible durant la journée et en maintenant la température intérieure dans une zone de confort.

Le stockage d'énergie dans les murs ou autres éléments du bâtiment peut être optimisé en encapsulant les MCP dans les surfaces. La chaleur latente du MCP permet de capter directement l'énergie solaire ou la chaleur/froid artificiels, réduisant ainsi les variations de température à l'intérieur du bâtiment. Cela aide à maintenir une température plus stable et proche des valeurs souhaitées tout au long de la journée.

Des recherches ont été menées pour incorporer des MCP encapsulés à l'échelle macro ou micro dans des matériaux tels que le béton, les plaques de plâtre, les plafonds et les sols, afin d'assurer une température intérieure raisonnablement constante.

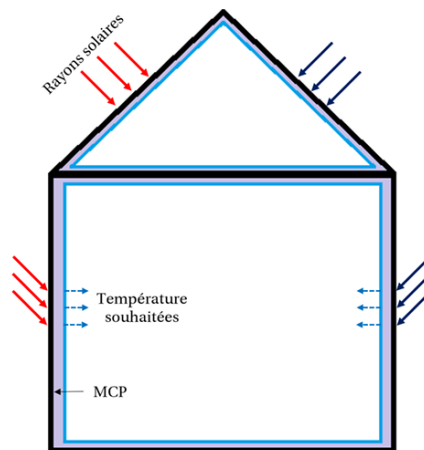


Figure 1.16 :Application typique du PCM dans les bâtiments [31]

Aujourd'hui, il est possible d'améliorer le confort thermique et de réduire la consommation énergétique des bâtiments sans augmenter significativement le poids des matériaux de construction, grâce à l'utilisation de MCP encapsulés à l'échelle micro et macro. Même de petites quantités de MCP, intégrées au matériau de construction ou appliquées sous forme de couches minces sur les murs et les toits, peuvent contribuer à réduire les températures maximales et minimales.

Contrairement aux panneaux isolants structuraux, qui présentent des propriétés thermiques relativement constantes, les caractéristiques des MCP varient en fonction des conditions environnementales. Le flux thermique à travers un panneau isolant structural est directement proportionnel à la différence de température entre les faces de ce panneau.

L'efficacité des MCP se manifeste lorsque les températures atteignent un seuil provoquant leur changement d'état. Ainsi, plus la variation de température entre le jour et la nuit est importante, plus le MCP est efficace pour réduire le flux de chaleur.

L'utilisation de panneaux isolants structuraux à base de matériaux à changement de phase est particulièrement adaptée aux régions géographiques où les températures connaissent de fortes fluctuations, avec des journées chaudes et des nuits fraîches.

1.6.3 Systèmes d'énergie solaire

1.6.3.1 Centrale à énergie solaire concentrée

Un inconvénient majeur des systèmes solaires, quel que soit leur type, est leur efficacité limitée aux périodes de fort ensoleillement. Cela constitue un problème particulièrement important pour les grandes centrales solaires commerciales, puisque la demande en électricité ne se limite pas aux heures diurnes.

Dans ce contexte, l'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) pour le stockage d'énergie thermique (SET) est vivement recommandée. En effet, pour assurer la

Chapitre I: Méthodes de Refroidissement

viabilité économique de ces grandes centrales, un système de stockage d'énergie thermique pleinement intégré est indispensable afin de réduire la consommation supplémentaire de combustibles fossiles.

Les centrales solaires commerciales reposent généralement sur le concept de l'énergie solaire à concentration (CSP). Dans ces installations, la lumière solaire est réfléchiée et concentrée à l'aide de miroirs pour chauffer un fluide caloporteur. Parmi les technologies existantes, le collecteur parabolique est le plus répandu. Par exemple, la figure 1.17 illustre une technologie de cuvette parabolique, où le récepteur thermique est positionné au-dessus des miroirs concentrateurs.



Figure 1.17 : Capteurs solaires à auge parabolique avec fluide caloporteur dans le tube absorbant l'énergie thermique [32]

Le récepteur est constitué d'un tuyau noir encapsulé dans un tube sous vide afin de minimiser les pertes thermiques par convection. Un fluide caloporteur, à haute température et haute pression, circule à l'intérieur de ces tuyaux. Selon la configuration du système, ce fluide peut servir de source de chaleur dans un évaporateur, générant ainsi de la vapeur qui alimente une turbine couplée à un générateur. Alternativement, le fluide peut être vaporisé directement en traversant le champ solaire, puis passer directement dans la turbine sans échangeur de chaleur intermédiaire ; ce procédé est appelé génération directe de vapeur.

Dans les deux cas, lors des périodes d'ensoleillement intense, le fluide peut absorber un surplus d'énergie solaire thermique. Cette énergie excédentaire peut être stockée sous forme de chaleur sensible ou latente dans des réservoirs de stockage, comme illustré à la figure 1.18.

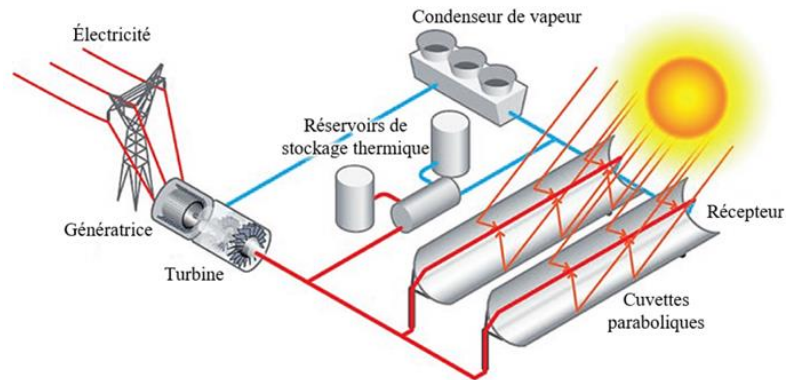


Figure 1.18 : Un exemple de centrale solaire de production directe de vapeur avec stockage d'énergie thermique [32]

1.6.3.2 Applications solaires domestiques

Bien que les grandes centrales solaires à concentration (CSP) bénéficient clairement d'importants avantages techniques et économiques en intégrant des systèmes de stockage d'énergie thermique à base de MCP, les installations solaires de plus petite taille peuvent également tirer profit de ce type de stockage thermique.

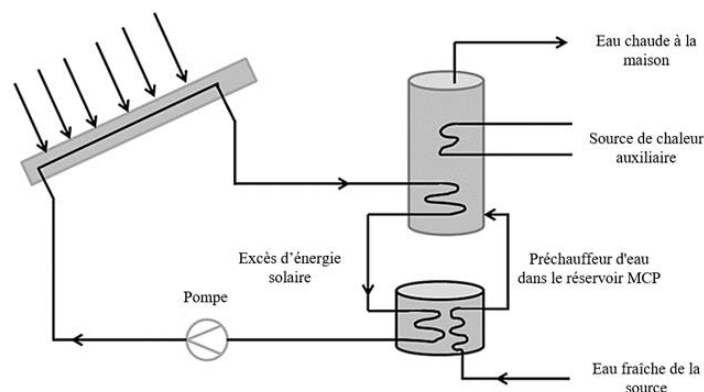


Figure 1.19 : Système de chauffe-eau solaire sanitaire avec stockage thermique à base de MCP [32]

Par exemple, les systèmes solaires thermiques peuvent être utilisés par les petites entreprises et les particuliers pour la production d'eau chaude et le chauffage. Un système solaire thermique à petite échelle avec stockage d'énergie est illustré à la figure 1.19. Ces systèmes comportent un capteur solaire plan, généralement installé sur le toit, dans lequel circule un fluide caloporteur au sein de tubes récepteurs. Ces tubes sont isolés dans une enceinte protégée par une plaque de verre.

Le fluide caloporteur ne génère pas de vapeur pour entraîner un système de production d'électricité, mais il atteint une température suffisante pour fournir la chaleur nécessaire à un ballon d'eau chaude. Comme dans le cas des centrales CSP, la capacité de ces systèmes est

Chapitre I: Méthodes de Refroidissement

limitée aux heures d'ensoleillement. Cependant, ils peuvent être conçus pour stocker la chaleur excédentaire dans des réservoirs équipés de MCP, permettant ainsi de réduire significativement la dépendance au gaz naturel ou au chauffage électrique pendant la nuit.

1.6.4 Application dans le secteur textile

Une application relativement récente, mais très prometteuse, des matériaux à changement de phase (MCP) concerne la conception de vêtements visant à améliorer le confort thermique dans des conditions de chaleur ou de froid extrêmes. Cette utilisation s'apparente à celle des MCP dans les matériaux de construction, qui permettent de maintenir un environnement intérieur confortable. Elle ouvre la voie à des systèmes de contrôle thermique personnel, utilisables aussi bien en intérieur qu'en extérieur.

Grâce à cette technologie, il est possible de créer des vêtements et accessoires dotés de capacités de gestion thermique, tels que des parkas à régulation thermique, gilets, pantalons de neige, sous-vêtements, chaussettes, sacs de couchage, couvertures, couettes, matelas et oreillers (voir figure 1.20).

Pour les vêtements destinés aux climats chauds, ces produits sont conçus pour absorber l'excès de chaleur ambiante, isolant ainsi le corps humain des températures élevées. Dans les environnements extrêmes, la chaleur est directement stockée dans le MCP, qui maintient un microclimat confortable près du corps. L'objectif, similaire à la gestion thermique de l'électronique, est de retarder le plus longtemps possible l'apparition d'une température stable en régime permanent.

Une fois que le MCP est entièrement fondu, sa température continue d'augmenter jusqu'à l'équilibre, puis il doit être refroidi et solidifié avant une nouvelle utilisation. Si la durée de fusion utile peut être prolongée sur plusieurs heures, ces vêtements deviennent particulièrement efficaces. En fait, l'armée américaine s'est beaucoup intéressée à ces textiles MCP, finançant plusieurs recherches pour concevoir des équipements destinés aux troupes évoluant en environnements extrêmes. Ce type de système est également très prometteur pour les vêtements de sport et d'exercice.

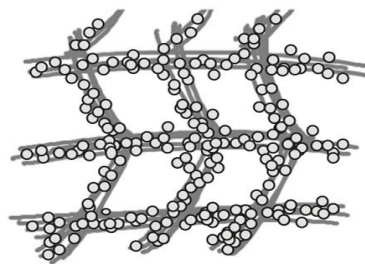


Figure 1.20 : Tissu enduit de microbilles du MCP [32]

Chapitre I: Méthodes de Refroidissement

Pour les vêtements destinés aux conditions froides, le principe est similaire, mais la source de chaleur est inversée. Dans ce cas, le matériau à changement de phase (MCP) capte la chaleur émise par le corps humain. En passant de l'état solide à l'état liquide, il joue un rôle d'isolant contre le froid intense. Ce mécanisme est particulièrement avantageux dans certains types de parkas, notamment les équipements de ski. Lorsque l'utilisateur est exposé au froid extérieur, la chaleur produite par son activité est absorbée par le MCP. Ainsi, pendant les pauses, comme lors des trajets en remontée mécanique, le MCP se solidifie progressivement tout en maintenant une température constante, ce qui améliore le confort comparé à un vêtement classique.

1.7 Conclusion

Ce premier chapitre a présenté une revue bibliographique portant sur la dissipation thermique. Les différents modes de transfert de chaleur, à savoir la conduction, la convection et le rayonnement, ainsi que leurs équations associées, ont été exposés.

Ensuite, les diverses techniques de systèmes de refroidissement ont été analysées, en distinguant principalement deux grandes catégories : les systèmes de refroidissement monophasiques et diphasiques.

Ce travail se concentre particulièrement sur le refroidissement des composants électroniques par changement de phase solide-liquide. Dans ce cadre, le principe de fonctionnement, les critères de sélection, ainsi que les avantages et les inconvénients des matériaux à changement de phase ont été détaillés, de même que les équations relatives au stockage de la chaleur sensible et latente.

Enfin, plusieurs domaines d'application du stockage d'énergie thermique à base de matériaux à changement de phase ont été présentés en conclusion de ce chapitre.

L'objectif désormais est de développer une méthode numérique capable de permettre la conception optimale d'un système de refroidissement utilisant ces matériaux à changement de phase.

Chapitre II:
Matériaux à changement de phase

Chapitre II

Matériaux à changement de phase

II.1 Introduction
II.2 Matériaux à changement de phase
II.3 Historique des Matériaux à changement de phase
II.4 Différents types de changement d'état
II.5 Choix d'un Matériaux à changement de phase
II.6 Principes de Fonctionnement des Matériaux à changement de phase
II.7 Classification des Matériaux à changement de phase
II.8 Propriétés Thermophysiques des Matériaux à changement de phase
II.9 Applications des Matériaux à changement de phase
II.10 Propriétés et Types de Matériaux à changement de phase
II.11 Comparaison des Différents Types de Matériaux à changement de phase
II.12 Applications des Matériaux à changement de phase
II.13 Conclusion

Résumé :

Ce chapitre explore les matériaux à changement de phase (MCP) utilisés dans les applications de gestion thermique. Il met en évidence leurs propriétés thermophysiques, leurs mécanismes de stockage de chaleur latente, ainsi que leurs avantages et limites dans les systèmes de refroidissement passif. Une attention particulière est accordée aux critères de sélection des MCP et à leur intégration dans les dispositifs thermiques modernes.

II.1 Introduction

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont de plus en plus utilisés dans les systèmes de gestion thermique, notamment dans les échangeurs thermiques, en raison de leur capacité à stocker et à libérer de l'énergie thermique lors de leur transition de phase [33]. Leur application dans ces systèmes permet d'améliorer l'efficacité énergétique et de stabiliser la température des processus industriels et domestiques [34]. Grâce à leurs propriétés thermophysiques spécifiques, les MCP sont capables d'absorber une quantité significative de

chaleur lors de la fusion et de la restituer lors de la solidification, ce qui les rend particulièrement adaptés aux technologies de stockage d'énergie thermique [35]. Cette caractéristique joue un rôle essentiel dans divers secteurs, notamment le chauffage et la climatisation des bâtiments [36], l'industrie automobile [37], l'électronique [38], la conservation des denrées alimentaires [39] et les énergies renouvelables [40].

Dans ce chapitre, nous examinerons en détail les différentes applications des MCP dans les échangeurs thermiques, en mettant en avant leurs avantages et leurs défis technologiques. Nous analyserons également les avancées récentes dans ce domaine et les perspectives d'amélioration pour optimiser leur utilisation dans les systèmes thermiques modernes.

Objectifs du chapitre

Ce chapitre se propose de :

- Décrire les principes fondamentaux des MCP et leur mécanisme de fonctionnement.
- Classifier les différentes catégories de MCP et analyser leurs propriétés thermophysiques.
- Explorer les principales applications des MCP dans le domaine du refroidissement et du stockage d'énergie thermique.
- Identifier les limites de leur utilisation et proposer des solutions pour améliorer leurs performances.

Ces éléments constitueront une base essentielle pour la modélisation et la simulation des MCP dans un échangeur thermique, qui seront développées dans les chapitres suivants.

II.2 Matériaux à Changement de Phase (MCP)

▪ Description

Les matériaux à changement de phase (PCM) sont des substances capables de stocker et de libérer de la chaleur latente lors d'une transition de phase se produisant à température constante, généralement entre l'état solide et liquide [41]. Leur fonctionnement est illustré dans la figure (I.6). À l'image de la transition de la glace à l'eau, qui survient à des températures supérieures à 0 °C, ces matériaux passent d'un état à un autre en fonction de leur température de fusion [42].

Dans les bâtiments, le principe reste le même. Lorsque le matériau à changement de phase atteint une température suffisante, il fond en absorbant l'énergie thermique de son environnement. Cette énergie est ensuite stockée jusqu'à ce que le matériau se refroidisse, moment où il restitue la chaleur accumulée [43]. Ce processus se déroule lorsque l'espace disponible permet un échange efficace entre le matériau et l'air environnant [44].

Généralement, il est intégré dans un mur afin de rafraîchir une pièce et réduire la consommation d'énergie [45]. Le matériau à changement de phase peut être associé à un système de ventilation nocturne ou à une climatisation de moindre puissance pour optimiser les économies d'énergie [46].

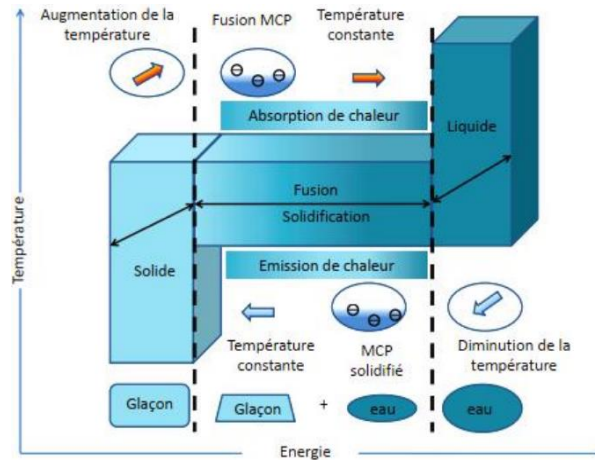


Figure II.1: Principe de fonctionnement des matériaux à changements de phase .

II.3 Historique des Matériaux à Changement de Phase (MCP)

Depuis les années 1970, les chercheurs ont étudié les matériaux à changement de phase (MCP) et leur interaction avec les sels hydratés, notamment en réponse à la première crise pétrolière. À l'origine, ces matériaux ont été testés pour le stockage de l'énergie solaire, mais de nombreuses limitations ont rapidement émergé, empêchant leur utilisation efficace. Le principal problème résidait dans leur durabilité, le nombre de cycles d'utilisation étant restreint.

Afin de surmonter ces obstacles, de nouveaux matériaux solides et liquides ont été développés, ouvrant la voie à diverses applications dans plusieurs domaines. La majorité des PCM stables sont constitués d'un matériau solide poreux, inerte et structurellement stable, dont les cavités sont remplies de PCM. Cette structure permet de maintenir le matériau en place et d'empêcher la fuite du liquide qu'il contient [47].

À basse température (< 120 °C), les recherches se sont intensifiées dans plusieurs domaines, notamment :

- La micro-encapsulation de la paraffine dans des polymères.
- L'utilisation de matrices inertes imprégnées de paraffine afin d'améliorer la conductivité thermique des MCP.
- Le développement de matériaux polymères/MCP obtenus par fusion et mélange d'un polymère, comme le polyéthylène haute densité, avec des paraffines.

- L'intégration de paraffines micro-encapsulées dans des composites à l'aide de procédés d'imprégnation et d'imbibition.

II.4 Différents types de changements d'état

Parmi les différentes techniques de stockage de l'énergie thermique, le stockage sous forme de chaleur latente se distingue par sa grande capacité de stockage et sa capacité à maintenir une température constante correspondant à la phase de transition du matériau à changement de phase (MCP).

Les transitions de phase pouvant être exploitées dans ce processus incluent :

- Liquide-Gaz
- Solide-Solide
- Solide-Gaz

Tableau II.1: Avantages et inconvénients des différents Changements d'état.

Changement de phase	Avantage	Inconvénients
Liquide/Gaz	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grande valeur de la Chaleur latente 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grande Changement de volume
Solide/Liquide	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Faible changement de volume 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Faible valeur de la Chaleur latente
Solide/Gaz	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grande valeur de la Chaleur Latente 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grande changement de volume

Observations et remarques

L'analyse des différents types de changements de phase permet de dégager les constats suivants :

1. Transition liquide-gaz : Ce type de changement de phase est caractérisé par une chaleur latente élevée, ce qui en fait un excellent choix pour le stockage thermique. Toutefois, il entraîne une variation volumique importante, rendant son utilisation complexe et soulevant des défis de stockage [48]. Pour contourner ces limites, plusieurs méthodes permettent de stocker la phase gazeuse :

- Absorption, où un liquide absorbe le gaz, comme dans le cas du couple $H_2O/LiBr$ [49].
- Adsorption, où un matériau solide retient le gaz sur sa surface, comme avec $H_2O/zéolite$ ou $CO_2/carbone$ activé [50].
- Réaction chimique, où le gaz est stocké sous forme de composé chimique réversible, comme $NH_3/sels$ [51].

Ces méthodes permettent une conservation à température ambiante, mais elles présentent plusieurs inconvénients, notamment une mise en œuvre complexe, des risques liés à la toxicité et à la corrosion, ainsi qu'une nécessité d'optimiser l'échange thermique pour une efficacité maximale.

2. Transition solide-solide : Contrairement à la transition solide-liquide, ce type de changement de phase n'entraîne pas de fusion du matériau mais modifie sa rigidité sous l'effet de la température [52]. Ce phénomène offre un avantage en termes de stabilité structurelle, mais il reste limité par une chaleur latente relativement faible et par la difficulté à identifier des matériaux dont la température de transition est compatible avec les applications énergétiques [53].
3. Transition solide-liquide : Ce changement de phase offre un bon compromis entre stockage thermique efficace et simplicité d'exploitation. Il implique une chaleur latente modérée tout en évitant les variations volumétriques excessives [54]. De plus, il existe un large choix de matériaux avec des températures de transition adaptées à diverses applications thermiques, ce qui justifie son adoption dans cette étude [55].

II.5 Choix d'un Matériau à Changement de Phase (MCP)

La première interrogation porte sur l'utilisation de l'eau comme MCP. En effet, l'eau possède d'excellentes propriétés en termes de chaleur latente. Toutefois, son utilisation est restreinte aux températures de transition de 0 °C et 100 °C (à pression atmosphérique), alors que de nombreuses applications nécessitent des plages de températures différentes.

Ainsi, afin de sélectionner un MCP adapté à une application spécifique, des critères de choix doivent être établis [56].

- **Critères thermiques :**
 - Température de changement de phase : Elle doit être adaptée à l'application envisagée.
 - Chaleur latente de fusion : Doit être élevée ($>130\text{ kJ/kg}$) afin d'assurer une performance énergétique compétitive.

- Conductivité thermique élevée : Permet d'accélérer les processus de charge et de décharge thermique.
- Pression de vapeur réduite : Permet de limiter les contraintes liées à la pression dans les systèmes de stockage.
- **Critères physiques :**
 - Faible variation de volume lors du changement d'état, afin de faciliter le dimensionnement du stockage et d'assurer une bonne résistance à la pression.
 - Masse volumique élevée pour maximiser la capacité de stockage thermique tout en réduisant le volume nécessaire.
 - Fusion congruente lors de l'utilisation d'un composé, garantissant une transition homogène sans séparation de phases.
- **Critères cinétiques :**
 - Vitesse élevée de charge et de décharge pour optimiser les performances thermiques.
 - Absence de surfusion, qui pourrait ralentir le processus et compromettre l'efficacité du déstockage de chaleur.
- **Critères de stabilité et de compatibilité :**
 - Stabilité thermique du matériau après plusieurs cycles de chauffage et de refroidissement.
 - Compatibilité avec les matériaux du réservoir dans chaque phase afin d'éviter les risques de corrosion, de réactions chimiques ou électrochimiques indésirables.
- **Critères chimiques :**
 - Stabilité chimique dans le temps et aux différentes températures d'utilisation.
 - Taux de cristallisation optimal pour assurer des transitions de phase efficaces.
 - Ininflammabilité pour garantir la sécurité d'utilisation.
 - Non-toxicité afin de prévenir tout risque pour la santé et l'environnement.
- **Critères économiques :**
 - Coût abordable pour une utilisation viable à grande échelle.
 - Disponibilité élevée afin d'assurer un approvisionnement stable et durable.

II.6 Principes de Fonctionnement des Matériaux à Changement de Phase**II.6.1 Définition des Matériaux à Changement de Phase**

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont des substances qui absorbent et restituent l'énergie thermique lorsqu'ils passent d'un état physique à un autre, principalement entre les phases solide et liquide. Cette caractéristique est exploitée pour optimiser l'efficacité énergétique dans diverses applications, notamment dans le secteur du bâtiment et les systèmes de stockage thermique [57].

II.6.2 Mécanisme de Stockage et de Libération de Chaleur

Les matériaux à changement de phase (MCP) fonctionnent en stockant la chaleur latente. Lorsqu'un MCP est chauffé jusqu'à sa température de fusion, il absorbe une grande quantité de chaleur sans variation significative de température, passant ainsi de l'état solide à l'état liquide. Cette énergie est alors emmagasinée sous forme de chaleur latente. À l'inverse, lors du refroidissement, le MCP se solidifie et restitue l'énergie thermique accumulée, aidant ainsi à stabiliser la température de son environnement [58].

II.6.3 Types de Transitions de Phase

Les matériaux à changement de phase (MCP) peuvent subir diverses transitions, mais la plus exploitée est la transition solide-liquide, en raison de sa grande capacité de stockage thermique à une température quasi constante. En revanche, d'autres transitions, comme le passage de l'état liquide à l'état gazeux, entraînent des variations de volume importantes, ce qui les rend moins adaptées aux applications courantes [59].

II.6.4 Critères de Sélection des Matériaux à Changement de Phase

Le choix d'un matériau à changement de phase (MCP) adapté à une application spécifique repose sur plusieurs critères :

- Température de transition : Elle doit correspondre à la plage de température requise pour l'application envisagée [60].
- Capacité de stockage thermique élevée : Une chaleur latente de fusion élevée est essentielle pour maximiser l'efficacité du stockage thermique [61].
- Stabilité cyclique : Le MCP doit préserver ses propriétés thermiques et physiques après de nombreux cycles de fusion et de solidification [62].

- Compatibilité avec les matériaux environnants : Il ne doit pas interagir négativement avec les matériaux de construction ou les contenants utilisés [63].
- Sécurité et impact environnemental : Le matériau doit être non toxique, non inflammable et présenter un faible impact sur l'environnement [64].

Ces exigences garantissent que le MCP choisi répond aux impératifs de performance et de durabilité de l'application visée [65].

II.7 Classification des Matériaux à Changement de Phase (MCP)

Les matériaux à changement de phase (MCP) se divisent en trois principales catégories :

- **MCP organiques**

Issus de composés organiques comme les paraffines et les acides gras, ces matériaux se distinguent par leur stabilité chimique et leur faible tendance à la surfusion. Toutefois, leur conductivité thermique relativement basse peut réduire leur efficacité dans certaines applications [66].

- **MCP inorganiques**

Ce groupe regroupe principalement les hydrates salins et les sels métalliques. Les MCP inorganiques se distinguent par une densité énergétique élevée et une conductivité thermique supérieure à celle des MCP organiques. Cependant, leur utilisation peut être limitée par des problèmes de stabilité à long terme et de compatibilité avec certains matériaux de construction[67].

- **MCP eutectiques**

Les matériaux eutectiques sont des mélanges de deux ou plusieurs composants qui fondent et se solidifient à une température unique, inférieure à celle de chacun des constituants pris séparément. Ils peuvent être composés de substances organiques, inorganiques ou d'une combinaison des deux, offrant ainsi une large flexibilité dans le choix des températures de transition et des propriétés thermiques [68].

Cette classification permet d'identifier le type de MCP le plus adapté aux exigences spécifiques de chaque application [69].

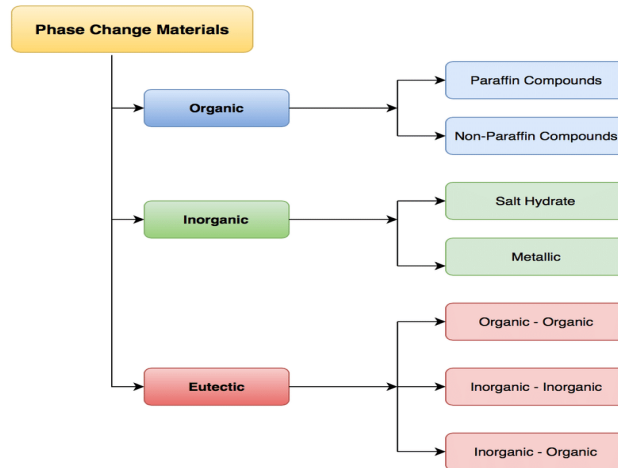


Figure II.2: Phase change materials applications diagram

II.8 Propriétés Thermophysiques des Matériaux à Changement de Phase (MCP)

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont reconnus pour leur capacité à emmagasiner et restituer de l'énergie thermique au cours des transitions de phase. Leurs performances sont influencées par plusieurs caractéristiques thermophysiques fondamentales.

II.8.1 Température de Transition de Phase

La température à laquelle un MCP passe d'un état physique à un autre est un paramètre clé pour son intégration dans un système thermique donné. Pour garantir une efficacité optimale, cette température doit être en adéquation avec les exigences de l'application visée [70].

II.8.2 Chaleur Latente de Fusion

La chaleur latente représente l'énergie nécessaire pour effectuer un changement d'état sans variation de température. Plus cette valeur est élevée, plus le MCP est en mesure d'accumuler une quantité importante d'énergie thermique, ce qui améliore ses performances en stockage énergétique [71].

II.8.3 Capacité Calorifique

La capacité calorifique désigne la quantité d'énergie thermique requise pour modifier la température d'une unité de masse d'un matériau. Un MCP présentant une capacité calorifique élevée peut absorber plus de chaleur avant d'atteindre son point de transition, optimisant ainsi l'efficacité du système thermique dans lequel il est utilisé [72].

II.8.4 Conductivité Thermique

La conductivité thermique joue un rôle essentiel dans le transfert d'énergie au sein du matériau. Une conductivité élevée permet un échange thermique plus rapide, favorisant un fonctionnement efficace du MCP. Cependant, nombre de ces matériaux possèdent une conductivité relativement faible, ce qui peut limiter leur efficacité dans certaines conditions d'utilisation [73].

II.8.5 Densité

La densité d'un MCP influence directement la quantité d'énergie pouvant être stockée dans un volume donné. Un matériau présentant une densité plus importante peut contribuer à une meilleure optimisation de l'espace dans les systèmes de stockage thermique [74].

II.8.6 Stabilité Thermique et Cyclique

La stabilité thermique d'un MCP se réfère à sa capacité à conserver ses propriétés après plusieurs cycles de fusion et de solidification. Une bonne stabilité garantit une durabilité accrue du matériau et assure une performance constante sur le long terme [75].

En résumé, le choix d'un MCP dépend d'une analyse détaillée de ses propriétés thermophysiques afin de répondre aux exigences spécifiques de chaque application thermique [76].

II.9 Applications des Matériaux à Changement de Phase (MCP) dans les Échangeurs thermique

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont de plus en plus exploités dans les échangeurs thermiques en raison de leur capacité à stocker et à libérer de l'énergie thermique de manière efficace. Leur intégration permet d'améliorer les performances énergétiques et de garantir une gestion thermique optimisée dans divers secteurs industriels et domestiques [77].

II.9.1 Stockage de l'Énergie Thermique

Grâce à leur capacité à emmagasiner et restituer de la chaleur lors de leur changement d'état, les MCP sont largement employés dans les systèmes de stockage thermique. Cette propriété contribue à stabiliser la température des installations thermiques, permettant ainsi de réduire les fluctuations thermiques et d'optimiser le rendement énergétique des échangeurs thermiques [78].

II.9.2 Chauffage et Climatisation des Bâtiments

Dans le domaine du bâtiment, l'intégration des MCP aux systèmes de chauffage et de climatisation constitue une solution efficace pour améliorer l'efficacité énergétique des infrastructures. Ces matériaux permettent d'accumuler l'énergie thermique pendant la journée et de la restituer la nuit, réduisant ainsi la dépendance aux systèmes de chauffage et de refroidissement conventionnels [79].

II.9.3 Industrie Automobile

Les MCP trouvent également des applications dans le secteur automobile, notamment pour la gestion thermique des batteries et des moteurs. Leur utilisation dans les échangeurs thermiques permet de maintenir une température optimale des composants, ce qui prolonge leur durée de vie et améliore leur performance énergétique [80].

II.9.4 Refroidissement des Composants Électroniques

Avec l'augmentation de la puissance des dispositifs électroniques, la dissipation thermique est devenue un enjeu crucial. L'emploi des MCP dans les échangeurs thermiques contribue à limiter la surchauffe en absorbant les excès de chaleur générés par les composants électroniques, garantissant ainsi une meilleure fiabilité des dispositifs [81].

II.9.5 Conservation des Produits Alimentaires

L'industrie agroalimentaire exploite les MCP pour le stockage et le transport des denrées périssables. Leur incorporation dans les systèmes de réfrigération et les emballages thermiques permet de stabiliser les températures, assurant ainsi de meilleures conditions de conservation des aliments et limitant les pertes [82].

II.9.6 Secteur des Énergies Renouvelables

Dans le domaine des énergies renouvelables, les MCP sont utilisés pour le stockage thermique dans les centrales solaires. Leur capacité à emmagasiner l'énergie thermique pendant les périodes d'ensoleillement et à la restituer en l'absence de soleil permet d'assurer une alimentation énergétique continue et d'améliorer l'efficacité des installations solaires [83].

En résumé, les MCP jouent un rôle essentiel dans l'optimisation des performances des échangeurs thermiques. Leur capacité à stocker et restituer l'énergie thermique en fait des matériaux clés pour de nombreuses applications industrielles et technologiques [84].

II.10 Propriétés et Types de Matériaux à Changement de Phase (MCP)

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont largement utilisés pour le stockage et la libération de l'énergie thermique grâce à leur capacité à absorber et restituer de la chaleur lors des transitions de phase. Le choix d'un MCP dépend de plusieurs facteurs tels que ses propriétés thermiques, sa stabilité, son coût et son impact environnemental. Cette section explore différentes catégories de MCP et leurs principales caractéristiques.

II.10.1 Paraffines

Les paraffines sont des hydrocarbures saturés appréciés pour leur stabilité chimique et leurs bonnes propriétés de stockage thermique. Elles présentent les caractéristiques suivantes :

- Température de fusion : variant entre 20 °C et 70 °C en fonction de la longueur des chaînes carbonées [85].
- Capacité élevée de stockage thermique : grâce à une chaleur latente importante [86].
- Bonne stabilité chimique : elles conservent leurs propriétés après de nombreux cycles thermiques [87].
- Non-toxicité et compatibilité avec diverses applications [88].
- Limitations : conductivité thermique relativement faible et caractère inflammable [89].

II.10.2 Acides Gras

Les acides gras sont des MCP organiques souvent utilisés en raison de leur compatibilité environnementale et de leurs performances thermiques.

- Température de fusion ajustable : selon leur composition chimique, elle varie entre 30 °C et 70 °C [90].
- Haute chaleur latente de fusion : similaire à celle des paraffines [91].
- Biodégradabilité : un avantage écologique majeur par rapport aux alternatives synthétiques [92].
- Stabilité chimique modérée : ils sont sujets à l'oxydation [93].
- Inconvénients : coût relativement élevé et possible dégagement d'odeurs [94].

II.10.3 Sels Hydratés

Les sels hydratés sont des composés inorganiques contenant de l'eau de cristallisation, qui facilite le stockage de la chaleur.

- Température de fusion généralement comprise entre 30 °C et 50 °C [95].
- Chaleur latente souvent plus élevée que celle des MCP organiques, optimisant le stockage énergétique [96].

- Meilleure conductivité thermique que les paraffines et acides gras [97].
- Coût réduit, rendant leur utilisation économiquement viable [98].
- Problèmes potentiels : tendance à la séparation de phases et risque de corrosion sur certains matériaux [99].

II.10.4 Polyalcools

Les polyalcools, aussi appelés sucres-alcools, sont des MCP présentant des performances thermiques intéressantes.

- Température de fusion variable : par exemple, l'érythritol fond aux alentours de 118 °C [100].
- Chaleur latente élevée : permettant un stockage efficace de l'énergie [101].
- Bonne stabilité chimique : avec une faible tendance à l'oxydation [102].
- Non-toxicité : plusieurs polyalcools sont utilisés dans l'alimentation [103].
- Inconvénients : certains absorbent l'humidité ambiante, ce qui peut altérer leurs performances [104].

II.10.5 Matériaux Composites Incorporant des MCP

Pour améliorer certaines propriétés des MCP, notamment leur conductivité thermique et leur stabilité structurelle, des matériaux composites ont été développés en combinant les MCP avec d'autres matériaux solides.

- Avantages : meilleure conductivité thermique, réduction du risque de fuite et possibilité d'adapter la forme du MCP à l'application visée [105].
- Contraintes : complexité de fabrication et nécessité de garantir la compatibilité entre le MCP et son support [106].

Le choix d'un MCP dépend donc des exigences de l'application, de la plage de température de fonctionnement, de la capacité de stockage thermique nécessaire, ainsi que des considérations économiques et environnementales. Une analyse approfondie de ces paramètres est essentielle pour garantir une efficacité optimale des systèmes utilisant ces matériaux [107].

II.11 Comparaison des Différents Types de Matériaux à Changement de Phase (MCP)

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont diversifiés et présentent des propriétés qui varient en fonction de leur composition chimique. Afin de sélectionner le MCP le plus approprié à une application donnée, il est essentiel d'évaluer plusieurs critères tels que leurs

performances thermiques, leur stabilité chimique, leur coût ainsi que leur impact environnemental. Cette section établit une comparaison entre les différentes catégories de MCP afin d'identifier leurs avantages et leurs limites.

II.11.1 Performances Thermophysiques

La capacité d'un MCP à stocker et libérer de l'énergie thermique dépend principalement de sa température de fusion, de sa chaleur latente et de sa conductivité thermique.

Les sels hydratés sont reconnus pour leur forte chaleur latente et leur conductivité thermique plus élevée par rapport aux MCP organiques, tandis que les paraffines et acides gras se distinguent par leur stabilité chimique accrue, bien qu'ils aient une conductivité thermique plus faible.

II.11.2 Stabilité et Durabilité

L'efficacité d'un MCP dépend également de sa capacité à maintenir ses propriétés après plusieurs cycles thermiques.

- Paraffines : Excellente stabilité chimique, peu de dégradation au fil des cycles [108].
- Acides gras : Sensibles à l'oxydation, nécessitent des stabilisants pour améliorer leur longévité [109].
- Sels hydratés : Peuvent souffrir de ségrégation de phases et de surfusion, ce qui impacte leur efficacité [110].
- Polyalcools : Bonne stabilité chimique, mais tendance à absorber l'humidité ambiante [111].
- MCP composites : Conçus pour limiter la dégradation et améliorer la stabilité structurelle [112].

II.11.3 Coût et Impact Environnemental

Le coût et l'impact écologique des MCP sont des critères cruciaux pour leur adoption à grande échelle.

- Paraffines : Abordables, mais issues de ressources fossiles, ce qui les rend moins écologiques [113].
- Acides gras : Plus coûteux que les paraffines, mais biodégradables et d'origine renouvelable [114].
- Sels hydratés : Généralement économiques, mais peuvent poser des problèmes de corrosion [115].
- Polyalcools : Leur coût varie selon leur origine, certains étant plus respectueux de l'environnement [116].

- MCP composites : En général plus chers, mais optimisés pour des applications spécifiques, ce qui justifie leur coût [117].

II.11.4 Sélection d'un MCP selon l'Application

Le choix du MCP optimal dépend fortement du domaine d'application :

- Secteur du bâtiment : Les sels hydratés et MCP composites sont privilégiés pour le stockage de chaleur dans les structures et systèmes de chauffage passif [118].
- Stockage d'énergie thermique : Les polyalcools et certains sels hydratés sont efficaces pour maximiser la capacité de stockage [119].
- Refroidissement électronique : Les paraffines et acides gras sont couramment utilisés en raison de leur stabilité et de leur large plage de température de fonctionnement [120].

II.11.5 Comparaison de la Stabilité Chimique et de la Durabilité

Un critère essentiel pour l'application des MCP est leur stabilité après plusieurs cycles thermiques.

- Paraffines : Très stables chimiquement et conservent leurs propriétés après de nombreux cycles [121].
- Acides gras : Stables, mais sensibles à l'oxydation, nécessitant des additifs antioxydants [122].
- Sels hydratés : Sujet à la ségrégation et à la surfusion, ce qui peut altérer leurs performances [123].
- Polyalcools : Stables chimiquement mais sensibles à l'absorption d'humidité [124].
- Composites MCP : Très stables et permettent de limiter les problèmes de fuite et de dégradation des performances [125].

II.11.6 Comparaison des Coûts et de l'Impact Environnemental

Le choix d'un MCP dépend aussi du coût et des considérations écologiques.

- Paraffines : Peu coûteuses, mais issues du pétrole, donc peu écologiques [126].
- Acides gras : Plus coûteux, mais biodégradables et renouvelables [127].
- Sels hydratés : Économiques, mais potentiellement corrosifs [128].
- Polyalcools : Coût variable selon le type, certains sont écologiques [129].
- Composites MCP : Généralement plus chers, mais optimisés pour des applications spécifiques [130].

II.11.7 Choix du MCP en Fonction de l'Application

Le choix optimal du MCP dépend du domaine d'application :

- Applications dans le bâtiment : Sels hydratés et composites MCP sont souvent privilégiés pour améliorer l'efficacité énergétique [131].
- Stockage d'énergie thermique : Les polyalcools et certains sels hydratés offrent une forte capacité de stockage [132].
- Refroidissement électronique : Les paraffines et acides gras sont souvent utilisés pour leur stabilité [133].

II.12 Applications des Matériaux à Changement de Phase (MCP)

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont largement exploités dans divers domaines en raison de leur aptitude à stocker et restituer l'énergie thermique de manière efficace. Leur grande capacité de stockage de chaleur latente les rend particulièrement adaptés à des applications variées, allant du bâtiment à l'électronique, en passant par le secteur biomédical et l'industrie. Cette section met en évidence les principaux usages des MCP en fonction des exigences thermiques spécifiques à chaque domaine.

II.12.1 Stockage de l'Énergie Thermique

L'une des fonctions essentielles des MCP réside dans le stockage thermique, un procédé qui contribue à l'optimisation de la consommation énergétique et à la stabilisation des températures.

- Accumulation de chaleur latente et sensible : Les MCP permettent de capter et de conserver l'énergie thermique provenant de sources renouvelables, comme l'énergie solaire, pour la redistribuer ultérieurement selon les besoins énergétiques [134].
- Systèmes de climatisation et chauffage : Dans le secteur du bâtiment, l'intégration des MCP améliore l'efficacité des systèmes de chauffage et de refroidissement en réduisant les variations de température et la consommation énergétique [135].
- Optimisation des réseaux de chaleur : Grâce à leur capacité à absorber les surplus thermiques et à les restituer progressivement, les MCP sont intégrés dans certains réseaux de distribution d'énergie thermique pour améliorer leur performance [136].

II.12.2 Intégration dans le Bâtiment

L'application des MCP dans le domaine de la construction vise principalement à améliorer l'efficacité énergétique et à renforcer le confort thermique des bâtiments.

- Isolation thermique avancée : L'incorporation des MCP dans des matériaux de construction comme les mortiers, plâtres ou panneaux isolants permet une meilleure gestion des températures intérieures [137].
- Vitrages intelligents : Certains verres spéciaux contiennent des MCP capables d'absorber et de libérer la chaleur solaire, contribuant ainsi à réduire la dépendance aux systèmes de chauffage et de climatisation [138].
- Peintures thermorégulatrices : L'ajout de MCP sous forme microencapsulée dans des peintures permet de stabiliser la température des surfaces exposées au rayonnement solaire [139].

II.12.3 Gestion Thermique des Équipements Électroniques

Avec l'essor des nouvelles technologies, la dissipation de la chaleur générée par les composants électroniques est un enjeu majeur. L'usage des MCP dans ce domaine vise à améliorer le refroidissement et à prévenir la surchauffe.

- Refroidissement des composants électroniques : L'intégration des MCP dans les systèmes de dissipation thermique aide à limiter les pics de température dans les circuits imprimés et processeurs [140].
- Protection thermique des batteries : Les MCP sont employés pour réguler la température des batteries lithium-ion, prolongeant ainsi leur durée de vie et améliorant leur sécurité [141].
- Applications dans le spatial : Dans les équipements aérospatiaux, les MCP sont utilisés comme système de gestion thermique passif pour stabiliser la température dans des environnements extrêmes [142].

II.12.4 Usages Biomédicaux

Dans le secteur médical, les MCP jouent un rôle clé dans la régulation thermique des dispositifs et des substances sensibles.

- Transport sécurisé des produits pharmaceutiques : Les emballages thermiques contenant des MCP garantissent des températures stables pour le transport des vaccins et médicaments thermosensibles [143].
- Textiles intelligents et vêtements thermorégulateurs : Certains vêtements spécifiques, tels que les équipements de protection ou les combinaisons pour environnements extrêmes, utilisent des MCP pour offrir un confort thermique optimal [144].

- Gestion de la température corporelle : Des dispositifs médicaux basés sur les MCP sont développés pour stabiliser la température des patients en cas d'hyperthermie ou d'hypothermie [145].

II.12.5 Applications Industrielles et Agroalimentaires

Dans l'industrie et le secteur agroalimentaire, les MCP sont intégrés à plusieurs niveaux pour assurer une gestion thermique efficace.

- Optimisation de la chaîne du froid : Grâce à leurs propriétés thermiques, les MCP sont utilisés dans les emballages et conteneurs réfrigérés pour maintenir des températures constantes et préserver la qualité des produits périssables [146].
- Refroidissement des processus industriels : Certains systèmes industriels font appel aux MCP pour atténuer les fluctuations thermiques et améliorer l'efficacité des procédés de fabrication [147].
- Amélioration des systèmes thermiques agricoles : Dans l'agriculture, les MCP contribuent à la gestion thermique des serres en stockant la chaleur durant la journée et en la restituant la nuit, ce qui favorise la croissance des cultures [148].

II.13 Conclusion

Les matériaux à changement de phase sont aujourd'hui incontournables dans divers domaines d'application, où ils jouent un rôle essentiel dans la gestion et l'optimisation de l'énergie thermique. Leur capacité à stocker et restituer la chaleur de manière efficace en fait des solutions prometteuses pour améliorer la performance énergétique et la durabilité des systèmes thermiques. Toutefois, des défis subsistent quant à leur coût, leur stabilité à long terme et leur intégration dans certaines applications spécifiques.

Chapitre III:
Calcul des éléments secondaires

Chapitre III

Modélisation et Simulation du dissipateur thermique en matériau à changement de phase

Résumé :

L'Objectif de ce chapitre est consacré à la modélisation numérique du transfert de chaleur lors de refroidissement d'une source chaude en impliquant des matériaux à changement de phase. Il présente les équations fondamentales régissant la conduction thermique et le changement de phase, ainsi que les méthodes numériques utilisées pour résoudre ces équations, notamment la méthode des éléments finis. L'objectif est de simuler avec précision le comportement thermique du système étudié.

Le système étudié, avec sa dimension principale, est représenté schématiquement comme indiqué dans la fig. 3.1. Le flux thermique d'entrée est appliqué par la base, et le microcanal peut être utilisé pour le transfert de chaleur par convection forcée et changement de phase d'un matériau à changement de phase. Ce système agit en tant que dissipateur thermique, dont les performances sont évaluées. De plus, pour analyser l'impact de l'utilisation du stockage de chaleur latente (LHS) sur les performances thermiques, le module peut inclure une plaque de PCM (matériau à changement de phase) positionnée en bas. Le collecteur, quant à lui, est situé entre les canaux d'entrée et de sortie d'air.

Les caractéristiques thermiques et de flux du dissipateur thermique sont analysées en examinant la température moyenne du dissipateur, ainsi que la fraction liquide et la température du PCM pour différents flux thermiques d'entrée. Afin de mieux comprendre la physique du problème, les températures de l'écoulement d'air et les lignes de courant sont également visualisées. Les propriétés du PCM utilisé sont présentées dans le Tableau 1. La performance à long terme et la stabilité du PCM, dans le cadre de cycles de refroidissement répétés, ont été validées expérimentalement [149].

Chapitre III: Modélisation et Simulation du dissipateur thermique en matériau à changement de phase

III.1 Géométrie du système étudié

Nous présentons dans cette section la géométrie du système du dissipateur thermique en matériau à changement de phase et ses dimensions, comme le montre la figure 3.1. Avec l'épaisseur du système est de l'ordre de 100 μm .

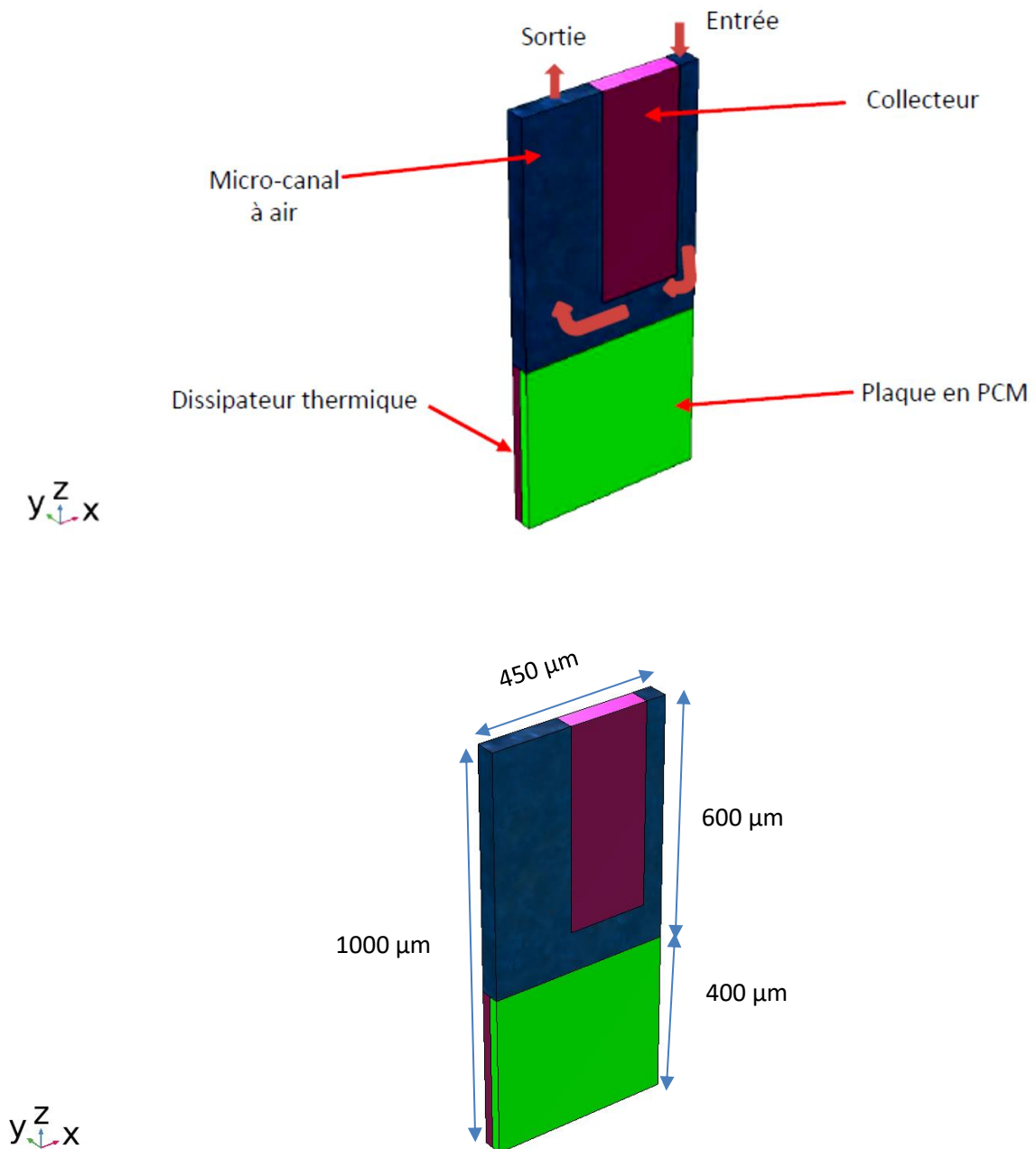


Fig. III.1. Géométrie du système étudié.

Chapitre III: Modélisation et Simulation du dissipateur thermique en matériau à changement de phase

Tableau III.1. Type de PCM et ses propriétés thermophysiques [&].

<i>PCM</i> type	T_m (°C)	$h_{sf} (\frac{KJ}{Ka})$	$\rho (\frac{Kg}{m^3})$	$C_p (\frac{KJ}{Kg \cdot k})$	$k (\frac{W}{m \cdot K})$
49Bi-21In- 18Pb-12SnP	58	202	9079	3230	33.2

Le fluide étudié tout au long de cette analyse est l'air, et son comportement est supposé être newtonien. La méthode des éléments finis (FEM) est utilisée pour modéliser le flux thermique à travers le logiciel COMSOL Multiphysics 6.0. Les simulations sont réalisées dans un mode de fonctionnement de convection forcée, avec un flux thermique constant (plusieurs valeurs de flux proposés). Les valeurs du nombre de Reynolds en mode de convection forcée ainsi que du flux thermique d'entrée sont fournies dans le Tableau 3.2. La vitesse de l'air est déterminée à l'aide de l'équation du nombre de Reynolds Eq. (1).

$$Re = \frac{U_{ave} \cdot Dh}{\nu} \quad (1)$$

Pour l'analyse du transfert de chaleur, le nombre de Nusselt, conformément à l'équation (2), a été utilisé.

$$Nux = \frac{hx D_h}{k} \quad (2)$$

Tableau III.2. Flux thermique et nombre de Reynolds étudiés.

Flux imposé (kW/m ²)	Re
1, 1.25, 1.5, 1.75	100, 125, 150, 175

Le paramètre h_x dans l'équation (2) représente le coefficient de transfert de chaleur, dont la valeur est déterminée à l'aide de l'équation (3). Dans cette dernière, T_b désigne la température moyenne de l'écoulement du fluide, calculée selon l'équation (4). Par ailleurs, le nombre de Nusselt moyen est défini conformément à l'équation (5).

$$h_x = \frac{q''}{T_w - T_b} \quad (3)$$

$$T_b = \frac{\sum(\dot{m}T)}{\sum \dot{m}} \quad (4)$$

Chapitre III: Modélisation et Simulation du dissipateur thermique en matériau à changement de phase

$$NU_{ave} = \frac{\dot{q} Dh}{K_f(T_W - T_b)} \quad (5)$$

Les équations gouvernantes de l'écoulement du côté air englobent les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Leur formulation repose sur les hypothèses suivantes :

- L'air est considéré comme un fluide Newtonien ;
- L'écoulement est supposé incompressible ;
- Le transfert de chaleur dans le PCM liquide s'effectue par convection naturelle;
- Les parois extérieures du dissipateur thermique sont parfaitement isolées, assurant que le transfert thermique se produit uniquement entre le fluide caloporteur (HTF) et le PCM.

Sur la base de ces hypothèses, les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie pour l'écoulement d'air sont données respectivement par les équations (6), (7) et (8) [150].

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (u_i) = 0 \quad (6)$$

$$u_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \right) - \frac{\partial (\overline{u_i' v_j'})}{\partial x_j} \quad (7)$$

$$\rho C_p \left(u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x_i \partial x_i} \right) \quad (8)$$

Pour le côté PCM, les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement sont formulées respectivement par les équations (6) et (9) [151]. Ces équations permettent de décrire le comportement dynamique du matériau à changement de phase durant le processus de fusion et de solidification.

$$\frac{\partial (\rho n u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho n u_i u_j) \quad (9)$$

$$= \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[u_n \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \rho n g_i + S$$

$$S = \frac{(1 - \beta)^2}{\beta^3 + \varepsilon} A_{much} (\vec{v} - \vec{v}_p) \quad (10)$$

Chapitre III: Modélisation et Simulation du dissipateur thermique en matériau à changement de phase

Dans l'équation (9), u représente les composantes de la vitesse, P désigne la pression, ρ correspond à la densité, g est l'accélération gravitationnelle, et S représente la source de quantité de mouvement. En outre, dans l'équation (10), v et β correspondent respectivement à la vitesse du solide dans le PCM fondu et à la fraction liquide, tandis que A_{mush} et ϵ sont deux constantes, la seconde étant utilisée pour éviter une division par zéro.

La méthode de porosité par enthalpie a été adoptée pour simuler le comportement thermique du PCM. Plutôt que d'examiner directement la surface de fusion, cette méthode repose sur l'observation de la fraction liquide, qui représente la portion de la cellule de calcul sous forme liquide. Le processus de résolution implique la détermination de cette fraction liquide, obtenue à partir de l'équation de bilan d'enthalpie.

L'énergie thermique stockée dans le PCM est exprimée par l'équation (11), dans laquelle H représente l'enthalpie du PCM. Celle-ci est la somme de la chaleur latente ($\Delta h_{latente}$) et de la chaleur sensible (h).

$$H = h + \Delta H \quad (11)$$

Avec ces définitions, l'équation de l'énergie du côté PCM est exprimée comme suit [150]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{V}h) = \vec{\nabla} \cdot \left(\frac{k}{\rho} \vec{\nabla} h \right) \quad (12)$$

L'équation (12), l'enthalpie sensible est déterminée selon l'équation (13) :

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (13)$$

Dans l'équation (13), h_{ref} désigne l'enthalpie au point de référence, T_{ref} représente la température de référence, et C_p fait référence à la capacité thermique spécifique. Le paramètre ΔH dans l'équation (11) est calculé à partir de l'équation (14), où L et α désignent respectivement la chaleur latente du PCM et sa fraction liquide. La fraction liquide du PCM (α) est déterminée à l'aide de l'équation (15).

$$\Delta H = \alpha L \quad (14)$$

Chapitre III: Modélisation et Simulation du dissipateur thermique en matériau à changement de phase

$$\alpha = \begin{cases} 0 & , T < T_{solidus} \\ \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} & , T_{solidus} < T < T_{liquidus} \\ 1 & , T > T_{liquidus} \end{cases} \quad (15)$$

Dans l'équation (15), lorsque la température du PCM se trouve dans un second intervalle, c'est-à-dire $T_{solidus} < T < T_{liquidus}$, les phases liquide et solide coexistent et interviennent durant le changement de phase. Au cours des processus de solidification et de fusion, l'équation de l'énergie est formulée sous la forme de l'équation (16) [152].

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} H) = \vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) + S \quad (16)$$

Dans l'Équation (16), v représente la vitesse du fluide, et S fait référence à la source d'énergie thermique. Dans le cadre de la méthode de l'enthalpie-porosité, la zone poreuse correspond à la région où se produit le processus de fusion. Le paramètre de porosité est défini comme la fraction liquide du PCM (matériau à changement de phase) dans la cellule. Dans une zone entièrement solide, la valeur de la porosité est égale à zéro, ce qui implique que la vitesse est nulle. En ce qui concerne le côté PCM, l'équation des mouvements est donnée par l'Équation (17) [150].

$$\frac{\partial(\rho_n u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_n u_i u_j) = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_n \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \rho_n g_i + S \quad (17)$$

Dans l'équation de la dynamique des fluides, le paramètre S représente la source de freinage liée à la loi de Darcy, qui illustre l'impact du changement de phase sur la convection. Cette relation est exprimée par l'Équation (18) [153].

$$S = \frac{(1 - \beta)^2}{\beta^3 + \epsilon} A_{much} (\vec{v} - \vec{v}_p) \quad (18)$$

Dans l'Équation (18), β représente la fraction volumétrique de la phase liquide, ϵ est égal à 0,001 pour éviter une division par zéro, et \vec{v}_p est la vitesse du solide à l'extérieur du domaine. De plus, A_{much} est le facteur de la zone pâteuse, considéré comme étant égal à 10^6 [44]. Pour le système actuel composé de PCM et d'air, le modèle VOF (Volume of Fluid) est

Chapitre III: Modélisation et Simulation du dissipateur thermique en matériau à changement de phase

utilisé. Dans ce modèle, la valeur de α_n , c'est-à-dire la fraction remplie dans la cellule, est définie comme suit :

- $\alpha_n = 0$, la cellule n^{th} est hors du fluide ;
- $\alpha_n = 1$, la cellule est entièrement remplie de fluide ;
- $0 < \alpha_n < 1$, la cellule n^{th} est partiellement remplie de fluide.

De cette manière, l'équation de conservation de la masse serait exprimée par l'Équation (19) :

$$\frac{\partial \alpha_n}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_n}{\partial x_i} = 0 \quad (19)$$

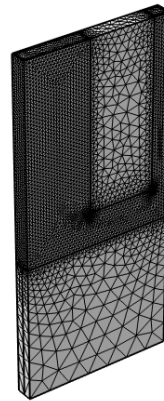
III.2 Etude de la consistance du maillage

Dans le cadre de la présente étude, une simulation numérique par la méthode des éléments finis a été réalisée pour analyser les phénomènes de transfert thermique et d'écoulement de l'air à travers un dissipateur thermique à micro-canaux avec matériau à changement de phase. Cette configuration est spécialement conçue pour le refroidissement de composants électroniques de puissance. L'objectif est de vérifier la consistance du maillage, c'est-à-dire l'indépendance des résultats vis-à-vis du raffinement du maillage.

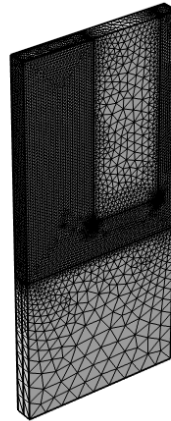
La figure 3.2. présente les variations de deux grandeurs physiques en fonction du nombre d'éléments de maillage :

- La température (en K), représentée par une courbe verte avec des carrés, tracée selon l'axe vertical gauche.
- La chute de pression (en Pa), représentée par une courbe bleue avec des croix, tracée selon l'axe vertical droit.

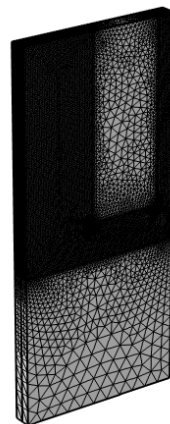
Chapitre III: Modélisation et Simulation du dissipateur thermique en matériau à changement de phase



(a) Maillage grossier



(b) Maillage normal



(c) Maillage fin

Figure III.2. Types de maillages testés.

Chapitre III: Modélisation et Simulation du dissipateur thermique en matériau à changement de phase

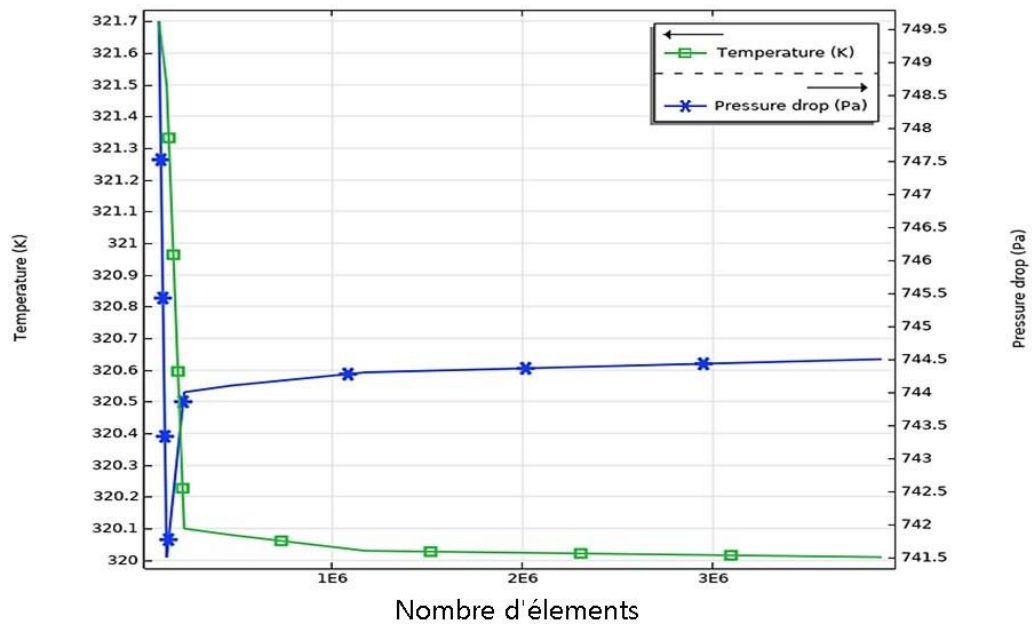


Figure III.3. Etude de l'indépendance des résultats de la simulation du type de maillage pour la température et la pression de l'air en un point du boîtier au voisinage de la plaque en PCM.

Analyse et Interprétation:

- Zone de maillage grossier:

Pour un nombre d'éléments faible (inférieur à 10^6), les variations de la température et de la chute de pression sont significatives. Cette instabilité indique que le maillage est trop grossier pour capturer correctement les gradients thermiques et hydrodynamiques dans les micro-canaux. Les résultats sont donc peu fiables dans cette région.

- Zone de convergence :

Au-delà de 10^6 éléments, les deux courbes se stabilisent nettement. La température atteint une valeur quasi constante autour de 320 K, tandis que la chute de pression fluctue très légèrement autour de 744.5 Pa. Cela démontre que les résultats deviennent indépendants du maillage, confirmant la consistance numérique.

- Conséquences physiques :

La stabilisation de la température suggère que le transfert thermique est correctement modélisé dans la géométrie complexe des micro-canaux. De même, la chute de pression stable

Chapitre III: Modélisation et Simulation du dissipateur thermique en matériau à changement de phase

traduit une modélisation précise de l'écoulement, y compris les effets de pertes de charge dues aux frottements.

Choix du maillage optimal :

Un nombre d'éléments compris entre 1 et 3 millions constitue un compromis optimal entre la précision des résultats et le coût numérique. Raffiner davantage le maillage n'amène pas d'amélioration significative, tout en augmentant le temps de calcul.

L'analyse du graphe montre clairement que la consistance du maillage est atteinte pour un nombre d'éléments supérieur à un million. Les résultats deviennent stables et fiables, ce qui valide la méthodologie employée pour simuler le comportement thermo-hydraulique du dissipateur thermique à micro-canaux. Cette étude permet ainsi de garantir la robustesse des prédictions numériques dans le contexte du refroidissement des composants électroniques de puissance.

III.3 Comportement transitoire

a) Vitesse

Dans le cadre de la gestion thermique des composants électroniques de puissance, l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) s'impose comme une solution prometteuse pour améliorer la performance thermique tout en maintenant un système passif. Afin d'évaluer le comportement aéraulique dans un tel système, une simulation numérique a été menée sur un dissipateur thermique intégrant un MCP. Les résultats sont présentés sous forme de cartes de distribution de la vitesse de l'air à différents instants : $t = 0$ s, $t = 900$ s, $t = 1800$ s, et $t = 3600$ s.

Les figures obtenues montrent l'évolution spatio-temporelle de la vitesse de l'air à l'intérieur du boîtier. À l'instant initial ($t = 0$ s), le MCP est entièrement solide, et l'air dans l'enceinte demeure quasi stationnaire. La dissipation thermique se fait uniquement par conduction, comme en témoigne la dominance du bleu sur l'échelle de couleurs (vitesse ≈ 0 m/s).

Au bout de 900 secondes, une légère augmentation de la vitesse de l'air est observée, en particulier dans les canaux verticaux, indiquant le début de la convection naturelle induite par

Chapitre III: Modélisation et Simulation du dissipateur thermique en matériau à changement de phase

les gradients thermiques croissants. Le matériau commence à fondre, permettant un transfert de chaleur plus efficace via un mélange conduction-convection.

À 1800 secondes, le phénomène convectif s'amplifie de manière significative. Des zones à vitesse plus élevée (couleurs allant du vert au jaune) apparaissent dans les conduits, illustrant la montée de l'air chaud par effet de tirage thermique. Une plume thermique convective se développe, notamment dans les parties verticales du boîtier, ce qui renforce l'efficacité de l'évacuation thermique.

Enfin, à 3600 secondes, la convection naturelle est pleinement développée. L'air circule activement dans les canaux, atteignant des vitesses maximales de l'ordre de 0,6 m/s. À ce stade, une grande partie du MCP est à l'état liquide, ce qui optimise les échanges thermiques internes. La distribution de la vitesse devient plus homogène et stable, indiquant un fonctionnement quasi-stationnaire du système.

Ces résultats confirment l'intérêt de l'intégration de MCP dans des systèmes de refroidissement passifs. Le changement de phase permet non seulement de retarder l'élévation de température par stockage de chaleur latente, mais aussi de déclencher une convection naturelle efficace sans recours à une ventilation forcée, augmentant ainsi la fiabilité globale du système.

Chapitre III: Modélisation et Simulation du dissipateur thermique en matériau à changement de phase

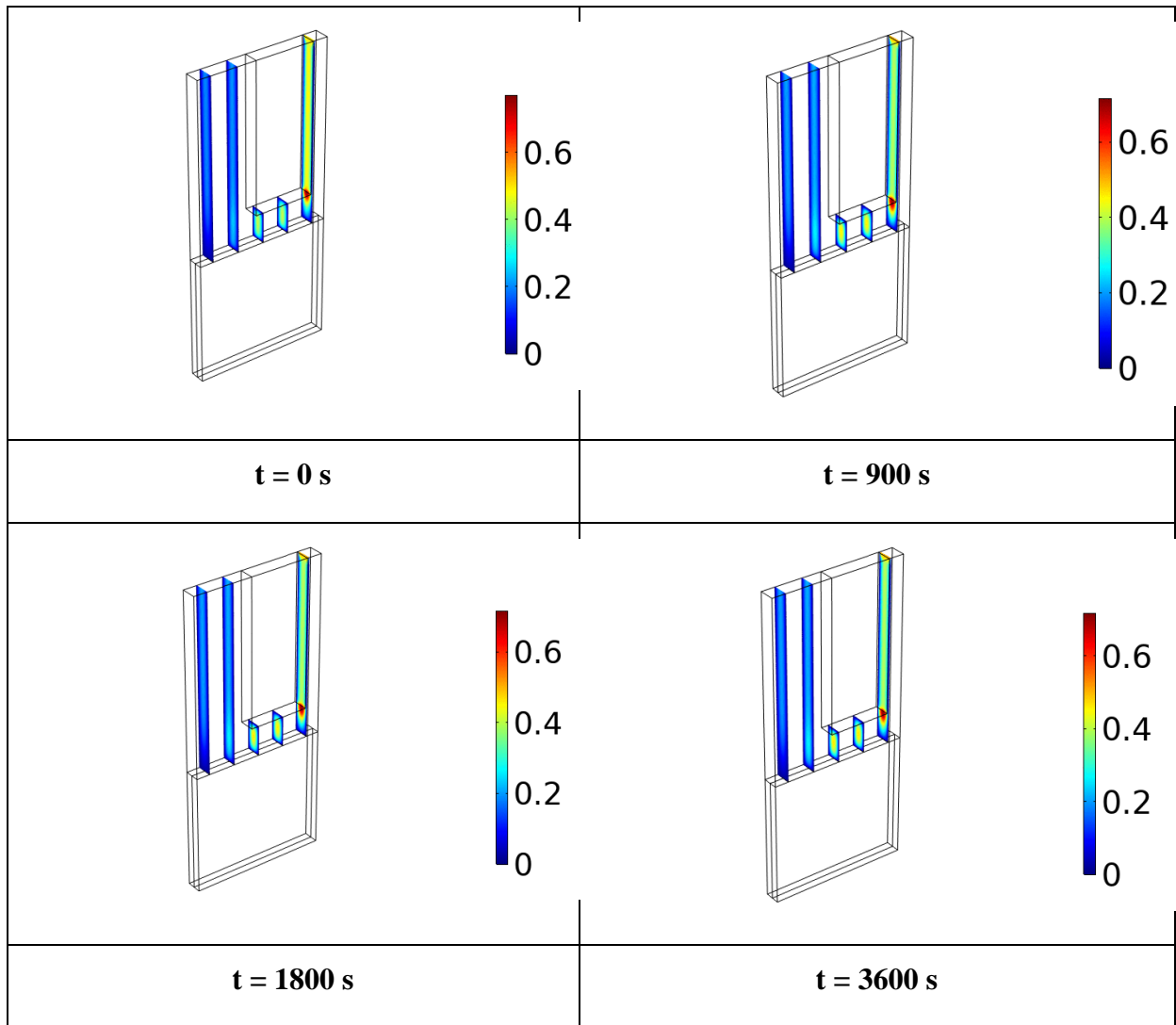


Figure III.4. Vitesse transitoire.

b) Pression

Les figures 3. 5. illustrent l'évolution temporelle de la distribution de la pression dans le boîtier d'un dissipateur thermique en matériau à changement de phase (MCP), utilisé pour le refroidissement des composants électroniques. Ces distributions correspondent respectivement aux temps suivants : $t = 0$ s, $t = 900$ s, $t = 1800$ s et $t = 3600$ s. L'analyse de ces résultats permet de comprendre le comportement du MCP et son efficacité dans la gestion thermique.

1. Condition initiale ($t = 0$ s)

- La pression initiale dans le boîtier est élevée (155.6 au point le plus haut), ce qui pourrait correspondre à la phase de démarrage du système où le MCP est encore solide et n'a pas commencé à absorber significativement la chaleur.

Chapitre III: Modélisation et Simulation du dissipateur thermique en matériau à changement de phase

- La décroissance de la pression est linéaire, indiquant une distribution uniforme sans effet marqué du changement de phase à ce stade.

2. Transition précoce ($t = 900$ s)

- On observe une légère augmentation de la pression maximale (165.5) par rapport à $t = 0$ s, accompagnée d'une distribution similaire mais avec des valeurs globalement plus élevées. Les symboles "!" suggèrent des points de mesure critiques, possiblement liés à l'initiation du changement de phase dans certaines zones du MCP.

- La pression minimale reste proche de celle observée à $t = 0$ s (2.22 contre 2.09), ce qui indique que le processus de refroidissement commence à influencer la distribution de pression.

3. Stabilisation ($t = 1800$ s)

- Les valeurs de pression sont très similaires à celles de $t = 900$ s, avec des différences mineures (par exemple, 165.51 contre 165.5). Cela suggère une stabilisation du système, où le MCP absorbe et dissipe la chaleur de manière équilibrée.

- La distribution reste cohérente, ce qui confirme l'efficacité du dissipateur à maintenir des gradients de pression contrôlés pendant le changement de phase.

4. État avancé ($t = 3600$ s)

- Les pressions maximales et minimales augmentent légèrement (165.6 et 2.23 respectivement), ce qui pourrait être dû à une accumulation résiduelle de chaleur ou à une légère diminution de l'efficacité du MCP après une heure d'opération.

- La distribution conserve sa forme, mais les valeurs légèrement plus élevées suggèrent une saturation progressive du matériau. Cela met en évidence l'importance de concevoir des systèmes avec une marge de sécurité pour les applications de longue durée.

- L'évolution des distributions de pression montre que le MCP fonctionne efficacement pour réguler la température dans le boîtier, avec une transition progressive et une stabilisation après environ 30 minutes.

- Les légères variations entre $t = 900$ s et $t = 3600$ s indiquent une robustesse du système, mais aussi la nécessité de surveiller les performances sur des durées prolongées pour éviter toute dégradation.

Chapitre III: Modélisation et Simulation du dissipateur thermique en matériau à changement de phase

- Les points critiques marqués dans La figure pourraient correspondre à des zones où le changement de phase est plus actif, ce qui pourrait être investigué plus en détail dans de futures études.

Ces résultats démontrent que le dissipateur thermique en MCP est capable de maintenir une distribution de pression stable pendant une heure, avec des variations mineures qui restent dans des limites acceptables. Cela confirme son potentiel pour le refroidissement des composants électroniques, en particulier pour des applications nécessitant une gestion thermique durable. Pour le mémoire, il serait pertinent de comparer ces données avec des modèles théoriques ou des simulations pour valider davantage les performances du système.

Les valeurs présentées dans les figures sont cohérentes et bien annotées. Pour enrichir l'analyse, il serait utile d'ajouter des informations sur les conditions aux limites (température ambiante, puissance dissipée par les composants, etc.) et de discuter des implications pratiques de ces résultats pour la conception optimale du dissipateur.

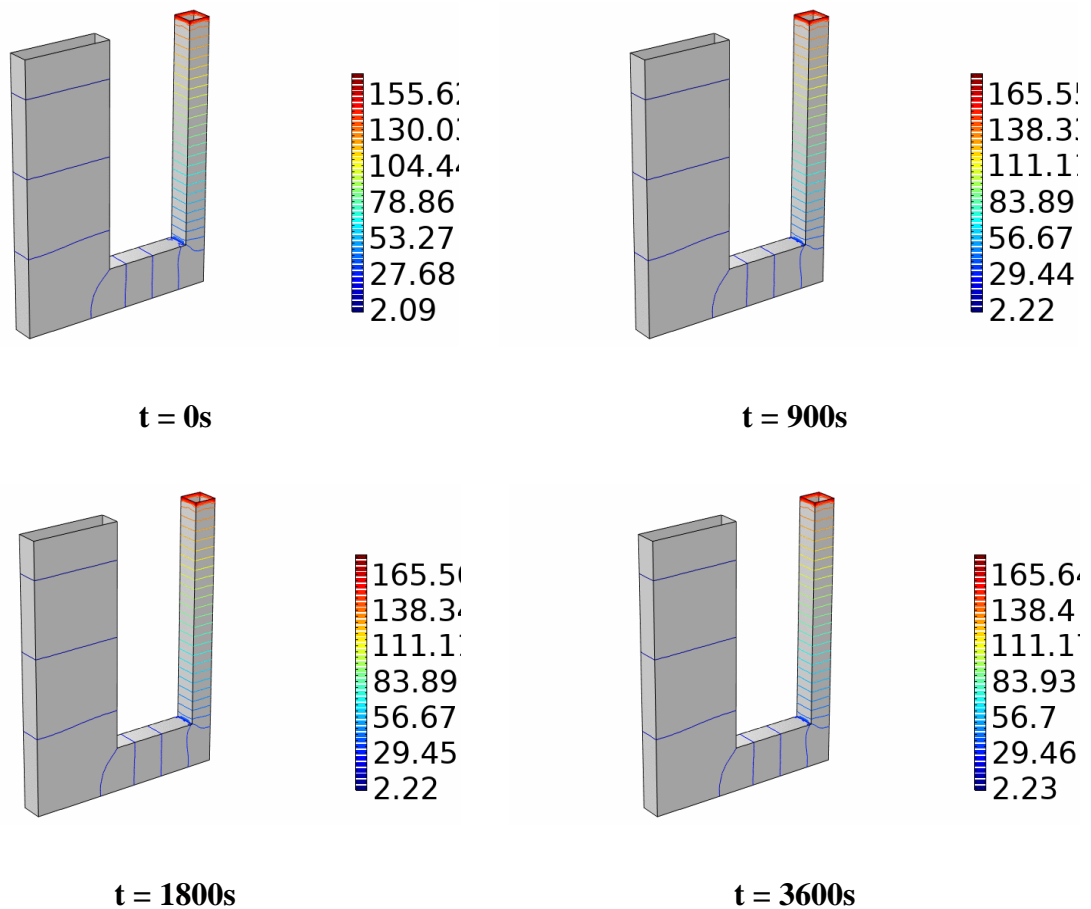


Figure III.5. Pression transitoire.

Chapitre III: Modélisation et Simulation du dissipateur thermique en matériau à changement de phase

c) Température

Les figures 3. 6. présentent l'évolution temporelle de la distribution de température dans le boîtier du dissipateur thermique en matériau à changement de phase (MCP), aux temps $t = 0$ s, $t = 900$ s, $t = 1800$ s et $t = 3600$ s. Ces données complètent l'analyse précédente des pressions et permettent d'évaluer l'efficacité thermique du système.

1. Condition initiale ($t = 0$ s)

- La température initiale est relativement uniforme, variant de 306 à 294 K.
- Cette légère décroissance linéaire suggère un gradient thermique minimal, typique d'un système en équilibre avant activation des composants électroniques.

2. Échauffement ($t = 900$ s)

- Une augmentation significative de la température maximale (330K) est observée, indiquant une montée en charge thermique due à l'activation des composants.
- La plage de température s'élargit (330 à 300K), reflétant l'hétérogénéité des transferts de chaleur lors de la phase initiale du changement de phase du MCP.
- La stabilité partielle à 300K en bas du boîtier pourrait correspondre à une zone où le MCP commence à absorber la chaleur efficacement.

3. Stabilisation partielle ($t = 1800$ s)

- Les valeurs restent identiques à celles de $t = 900$ s (330 à 300K), ce qui indique que le système a atteint un régime transitoire stable.
- L'absence de réduction de la température maximale suggère que le MCP opère à pleine capacité, avec un équilibre entre l'absorption de chaleur et la dissipation.

4. État stationnaire ($t = 3600$ s)

- La distribution est identique à celle des temps $t = 900$ s et $t = 1800$ s, confirmant que le système a atteint un état stationnaire après 30 minutes.
- La température maximale (330K) persiste, ce qui pourrait indiquer :
 - Une limite de capacité du MCP à absorber davantage de chaleur.
 - Un besoin d'optimisation de la conception pour améliorer la dissipation vers l'environnement.

Chapitre III: Modélisation et Simulation du dissipateur thermique en matériau à changement de phase

La stabilisation des températures après $t = 900$ s montre que le MCP joue son rôle en limitant la surchauffe, mais la persistance de températures élevées (330K) signale un possible point critique à surveiller. La différence de 30 K entre le haut et le bas du boîtier pourrait révéler des zones moins efficaces pour le transfert thermique, à investiguer par des simulations locales. Le dissipateur thermique en MCP contrôle efficacement la température pendant les premières phases critiques (0–900 s), mais atteint ses limites dès $t = 900$ s, avec une température maximale qui persiste jusqu'à $t = 3600$ s.

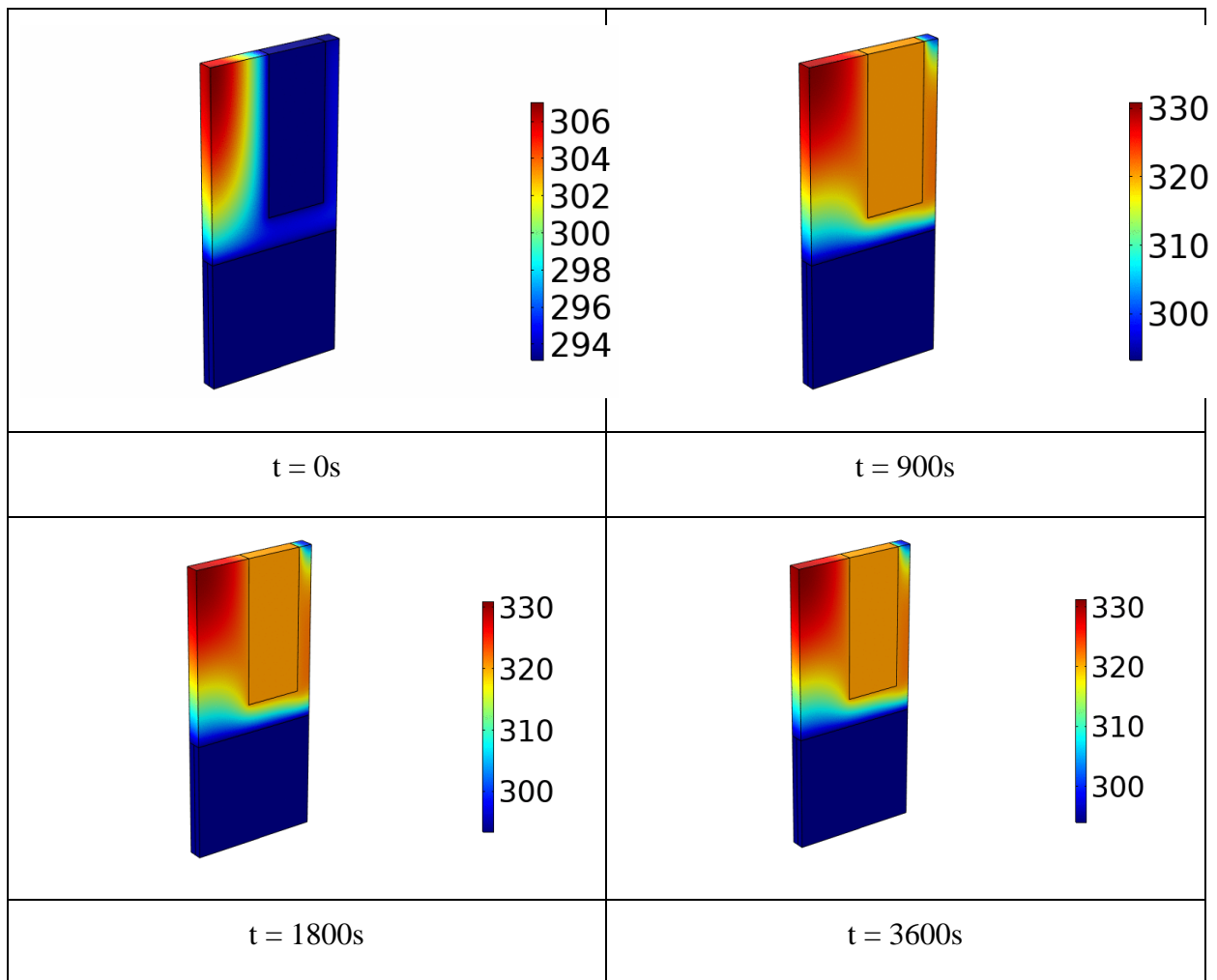


Figure III.6. Température transitoire.

III.4 Effet du nombre de Reynolds

a) Vitesse

Les figures 3. 7. illustrent l'évolution des performances de refroidissement d'un dissipateur thermique en matériau à changement de phase (PCM) en fonction de l'augmentation de la vitesse de l'air à l'entrée du boîtier. Ces résultats mettent en évidence l'impact significatif du

Chapitre III: Modélisation et Simulation du dissipateur thermique en matériau à changement de phase

nombre de Reynolds (Re), qui caractérise le régime d'écoulement de l'air, sur l'efficacité du dissipateur.

- Pour $V=1$ m/s ($Re = 100$) typique d'un écoulement laminaire (Re faible). Le PCM absorbe la chaleur, mais le taux de refroidissement est limité par la vitesse de l'air.

Pour $V=1.25$ m/s ($Re = 125$) typique d'un écoulement début de turbulent. Le PCM absorbe la chaleur, mais le taux de refroidissement est limité par la vitesse de l'air.

- $V=1.5$ m/s ($Re = 150$), l'augmentation de la vitesse induit un écoulement turbulent (Re plus élevé), ce qui améliore l'efficacité du refroidissement en augmentant le coefficient d'échange convectif.

- $V=1.75$ m/s ($Re = 175$), le PCM est sollicité plus efficacement grâce à un renouvellement accru de l'air frais, optimisant ainsi la dissipation thermique.

- L'augmentation de la vitesse de l'air entraîne une réduction de la couche limite thermique, ce qui améliore le gradient de température et accélère le transfert de chaleur.

- Le PCM joue un rôle clé en stockant l'énergie thermique pendant la phase de fusion, mais son efficacité dépend fortement des conditions de convection à sa surface. Un écoulement turbulent (Re élevé) maximise cette interaction.

Les résultats démontrent clairement que l'augmentation de la vitesse de l'amélioration significative des performances de refroidissement. Pour des applications électroniques haute puissance, une optimisation de la vitesse d'air (combinant efficacité et contraintes pratiques) est essentielle. Des études complémentaires pourraient explorer l'impact de la température d'entrée de l'air ou de la géométrie du dissipateur pour affiner ces conclusions.

Chapitre III: Modélisation et Simulation du dissipateur thermique en matériau à changement de phase

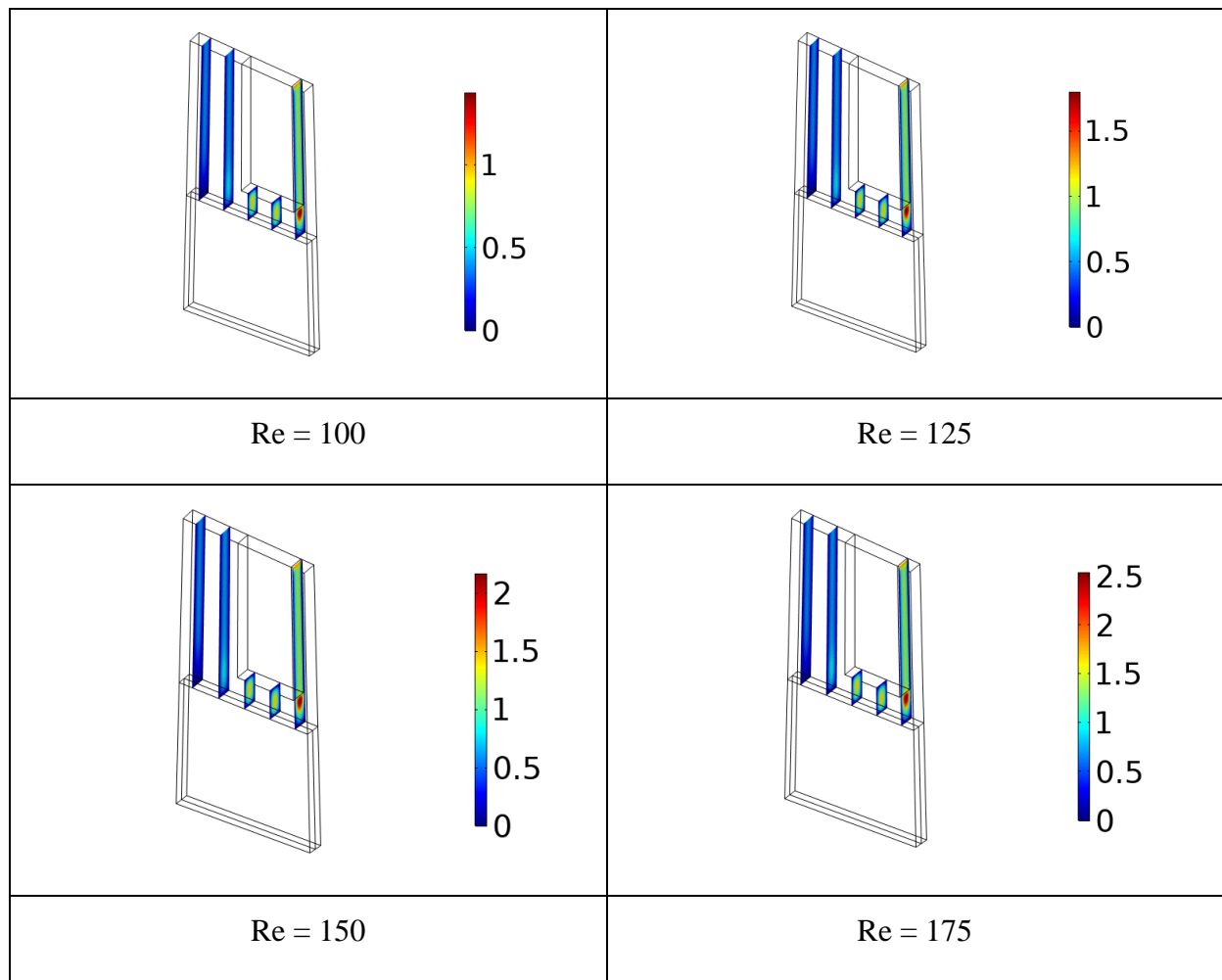


Figure III.7. Effet du Re sur l'écoulement de l'air.

b) Pression

Les figures 3.8 illustrent l'évolution des valeurs de pression dans le boîtier du dissipateur thermique en matériau à changement de phase (PCM) en fonction de l'augmentation de la vitesse de l'air à l'entrée. Ces résultats mettent en évidence l'impact du nombre de Reynolds (Re), qui caractérise le régime d'écoulement, sur la distribution de pression dans le système.

1. Pour $V = 1$ m/s, les valeurs de pression varient entre 2.23 (min) et 165.6 (max). Cette plage relativement modérée correspond à un écoulement laminaire ou transitionnel (Re faible), où les pertes de pression sont limitées.

2. Pour $V = 1.25$ m/s, la pression maximale atteint 205.4, et la minimale 2.76. L'augmentation de la vitesse entraîne une hausse générale des pressions, ce qui indique une intensification des forces dynamiques et des pertes par frottement.

Chapitre III: Modélisation et Simulation du dissipateur thermique en matériau à changement de phase

3. Pour $V = 1.5$ m/s, la pression maximale monte à 244.8, et la minimale à 3.29. Cette progression confirme que l'écoulement devient plus turbulent (Re plus élevé), générant des gradients de pression plus marqués.

4. Pour $V = 1.75$ m/s, les valeurs atteignent 284 (max) et 3.82 (min). La pression augmente significativement, reflétant un régime pleinement turbulent avec des pertes de charge accrues.

L'augmentation de la vitesse de l'air élève l'énergie cinétique de l'écoulement, ce qui se traduit par une hausse des pressions dynamiques. Cependant, cela s'accompagne aussi de pertes de charge plus importantes dues aux frottements et aux turbulences. Bien qu'une vitesse accrue améliore le transfert thermique (comme vu précédemment), elle augmente aussi la demande énergétique (pompage) et peut nécessiter une conception optimisée pour minimiser les pertes de pression.

Les résultats montrent une corrélation directe entre la vitesse de l'air et la pression dans le dissipateur. Pour des applications pratiques, un compromis entre **efficacité de refroidissement (vitesse élevée) et gestion des pertes de charge (pression maîtrisée) est essentiel. Une optimisation paramétrique (géométrie du boîtier, choix du PCM) pourrait être explorée pour atteindre cet équilibre.

Chapitre III: Modélisation et Simulation du dissipateur thermique en matériau à changement de phase

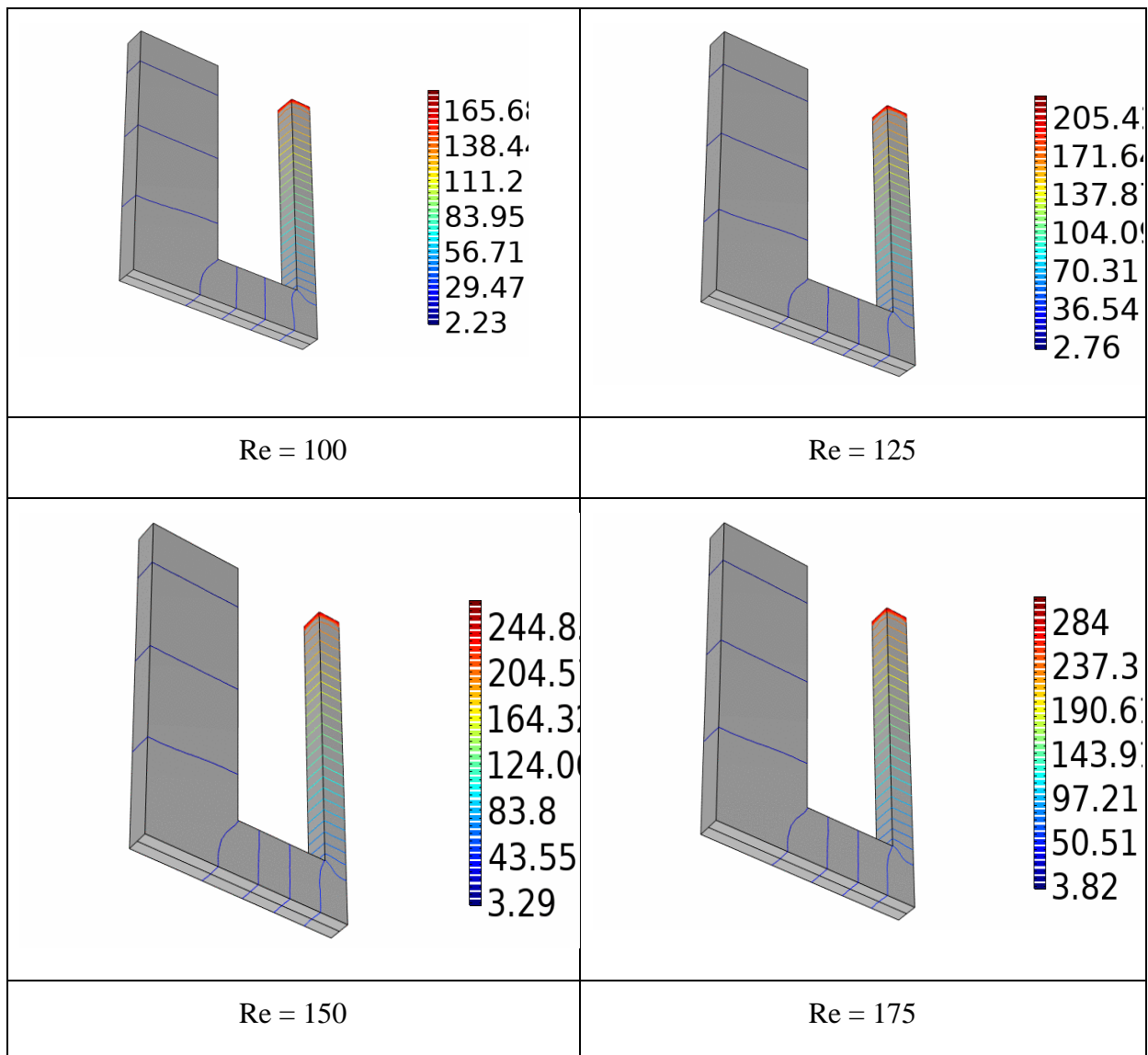


Figure III.8. Effet du Re sur la pression de l'air.

c) Température

Les figures 3.9. illustrent l'évolution de la température de l'air à l'intérieur du boîtier d'un dissipateur thermique en matériau à changement de phase (PCM) en fonction de l'augmentation de la vitesse de l'air à l'entrée. Ces résultats mettent en lumière l'influence du nombre de Reynolds (Re) sur le profil thermique du système.

1. Pour $V = 1 \text{ m/s}$

- La température varie entre 300 K et 330 K.
- Cette plage thermique élevée et réduite (seulement 4 valeurs) suggère un écoulement laminaire (Re faible), avec un transfert de chaleur limité et une possible accumulation de chaleur localisée.

Chapitre III: Modélisation et Simulation du dissipateur thermique en matériau à changement de phase

2. Pour $V = 1.25$ m/s

- La température s'étend de 295 K à 325 K.
- L'élargissement de la plage et la baisse des températures minimales indiquent un début de turbulence (Re modéré), améliorant le mélange de l'air et le transfert thermique.

3. Pour $V = 1.5$ m/s et $V = 1.75$ m/s

- Les températures couvrent une gamme similaire (295–320 K), mais avec une distribution plus homogène.
- Ces profils reflètent un écoulement turbulent établi (Re élevé), où l'augmentation de la vitesse favorise un refroidissement plus efficace et uniforme.

L'augmentation de la vitesse réduit la résistance thermique convective, ce qui abaisse la température moyenne de l'air dans le boîtier. Cela confirme que le PCM dissipe mieux la chaleur lorsque l'écoulement est turbulent.

Le matériau à changement de phase absorbe l'énergie thermique pendant la fusion, mais son efficacité dépend de la capacité de l'air à évacuer cette chaleur. Un Re élevé optimise ce processus en maintenant un gradient thermique favorable.

Les figures 3.9.c et 3.9.d montrent une répartition plus régulière des températures, ce qui est critique pour éviter les points chauds dans les composants électroniques.

L'augmentation de la vitesse de l'air améliore significativement le refroidissement en passant d'un régime laminaire à turbulent, comme en témoignent la baisse des températures et leur homogénéisation. Pour des applications électroniques, une vitesse optimale (par exemple 1.5 m/s) pourrait offrir le meilleur compromis entre performance thermique et efficacité énergétique.

Chapitre III: Modélisation et Simulation du dissipateur thermique en matériau à changement de phase

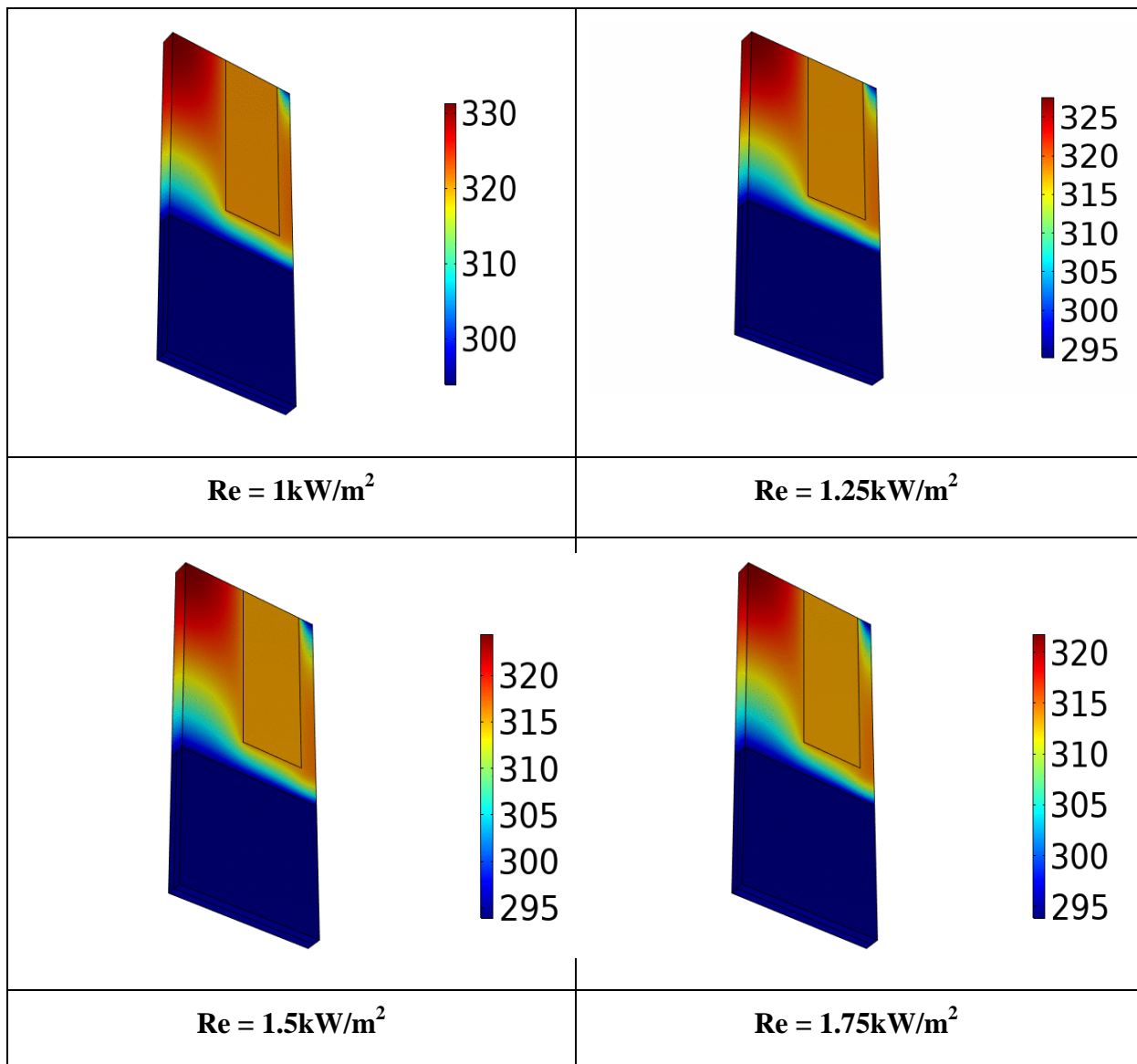


Figure III.9. Effet du Re sur la température de l'air.

III.5 Effet du flux imposé

a) Vitesse

Les figures ci-dessous montrent l'évolution de la vitesse de l'air dans le micro-canal d'un dissipateur thermique en matériau à changement de phase (PCM) pour différents flux thermiques : 1 kW/m², 1.25 kW/m², 1.5 kW/m² et 1.75 kW/m².

- Pour chaque flux thermique, la vitesse ne change pas de manière significative le long du micro-canal, ce qui est typique d'un écoulement en régime laminaire avec pertes de charge.

- Plus le flux thermique est élevé, plus la vitesse initiale (en entrée du canal) change d'une manière constante.

Chapitre III: Modélisation et Simulation du dissipateur thermique en matériau à changement de phase

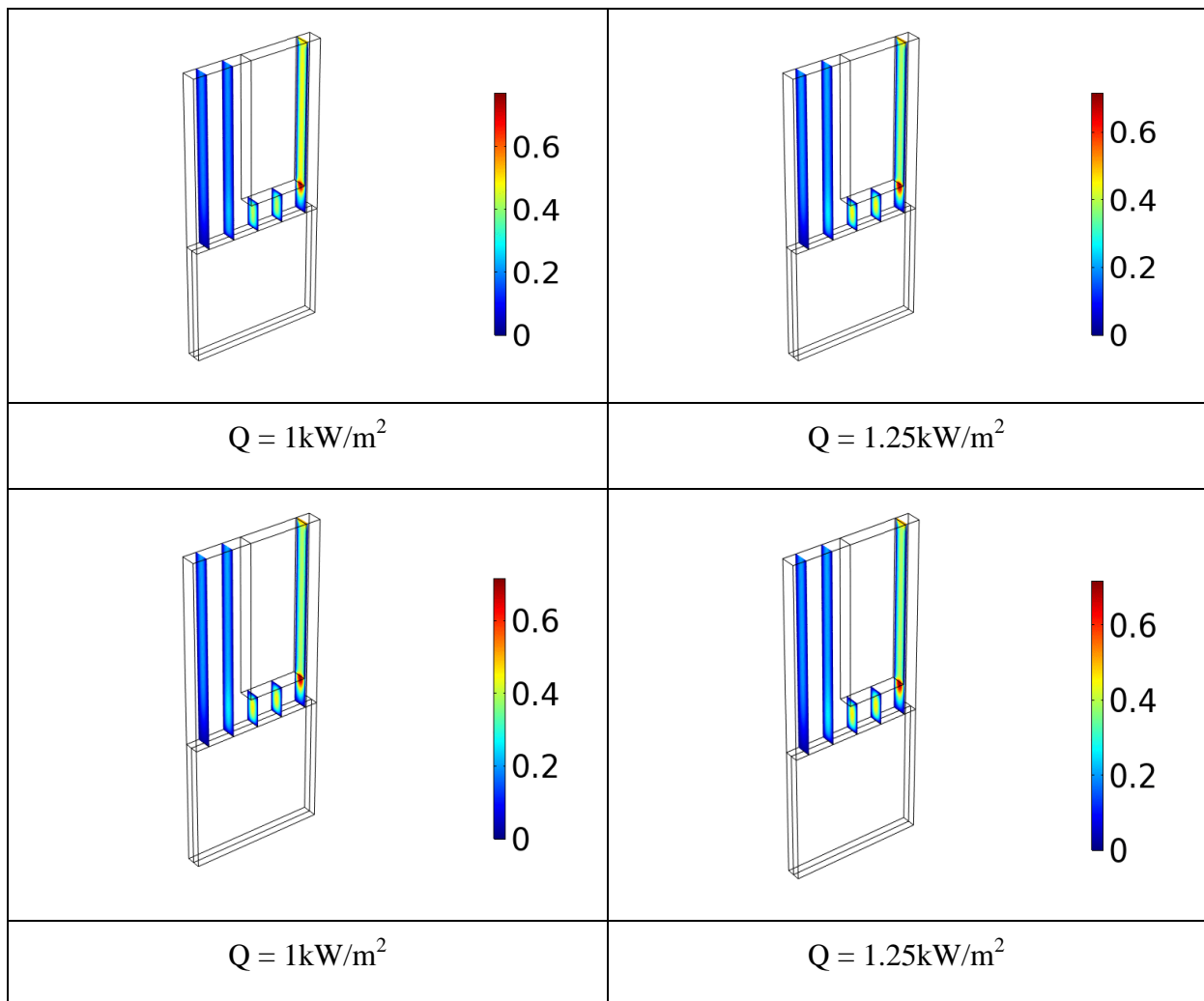


Figure III.10. Effet du flux imposé sur la vitesse de l'air.

b) Pression

Les figures ci-dessous montrent l'évolution de la pression de l'air dans le micro-canal d'un dissipateur thermique en matériau à changement de phase (PCM) pour différents flux thermiques : 1 kW/m², 1.25 kW/m², 1.5 kW/m² et 1.75 kW/m².

1. Tendances générales :

- Pour chaque flux thermique, la pression diminue linéairement le long du micro-canal, ce qui est typique d'un écoulement en régime laminaire avec pertes de charge.
- Plus le flux thermique est élevé, plus la pression initiale (en entrée du canal) est importante. Cela suggère que l'augmentation du flux thermique induit une plus forte vaporisation du PCM, générant une pression plus élevée dans le système.

Chapitre III: Modélisation et Simulation du dissipateur thermique en matériau à changement de phase

2. Impact du flux thermique :

- 1 kW/m² : La pression initiale est de 165.6 Pa et diminue jusqu'à 2.23 Pa. La pente de la courbe est modérée, indiquant des pertes de charge relativement faibles.

- 1.75 kW/m² : La pression initiale atteint 173.0 Pa, avec une chute jusqu'à 2.32 Pa. La pente est plus prononcée, reflétant des pertes de charge accrues dues à un débit ou une turbulence plus importante causée par la vaporisation intense du PCM.

3. Comparaison entre les flux :

- L'écart entre les pressions initiales pour les différents flux (165.6 Pa à 173.0 Pa) montre que l'augmentation du flux thermique accroît significativement la pression dans le micro-canal. Cela pourrait être dû à une production accrue de vapeur ou à une élévation locale de la température.

- Les pressions en sortie sont très similaires (autour de 2.2–2.3 Pa), ce qui indique que les conditions en sortie sont moins sensibles au flux thermique, possiblement parce que le PCM a atteint un état d'équilibre ou que la vapeur s'est condensée.

4. Implications pour la conception :

- Ces résultats soulignent l'importance de contrôler le flux thermique pour éviter des pressions excessives qui pourraient endommager le micro-canal ou réduire l'efficacité du dissipateur.

- Une optimisation de la géométrie du canal ou des propriétés du PCM pourrait atténuer les pertes de charge tout en maintenant une dissipation thermique efficace.

En résumé, l'augmentation du flux thermique élève la pression dans le micro-canal, avec des pertes de charge plus marquées. Ces données sont cruciales pour concevoir des dissipateurs thermiques à PCM performants et durables.

Chapitre III: Modélisation et Simulation du dissipateur thermique en matériau à changement de phase

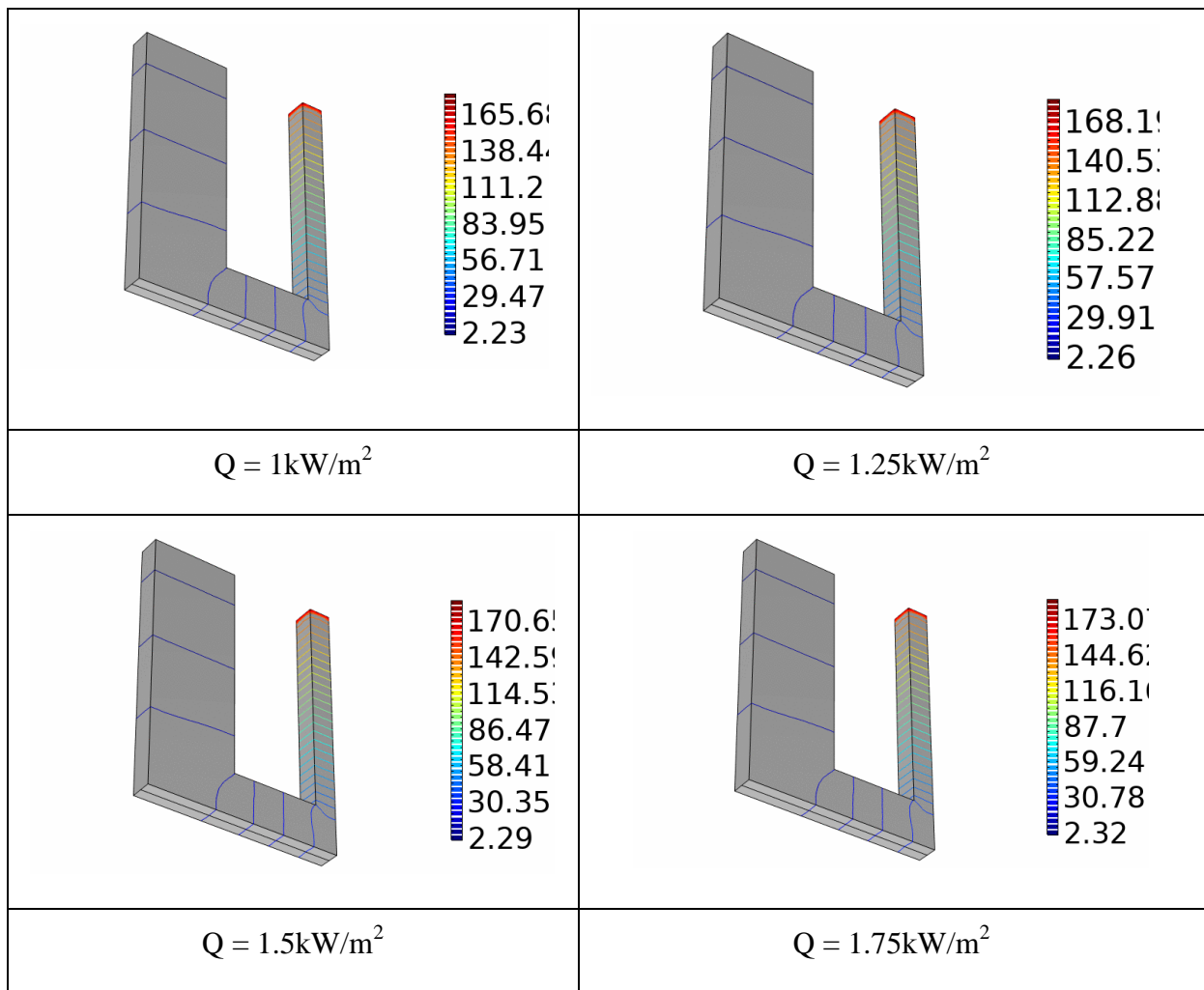


Figure III.11. Effet du flux imposé sur la pression de l'air.

c) Température

Les figures ci-dessous montrent l'évolution de la température de l'air dans le micro-canal d'un dissipateur thermique en matériau à changement de phase (PCM) pour différents flux thermiques : 1 kW/m^2 , 1.25 kW/m^2 , 1.5 kW/m^2 et 1.75 kW/m^2 .

1. Tendance générale

- Pour tous les flux thermiques, la température de l'air diminue le long du micro-canal, ce qui indique un transfert de chaleur efficace depuis l'air vers le PCM.

- La diminution est progressive et linéaire, suggérant un régime de refroidissement stable et contrôlé.

2. Impact du flux thermique

- 1 kW/m^2 :

Chapitre III: Modélisation et Simulation du dissipateur thermique en matériau à changement de phase

- Température initiale : 330 K → Température finale : 300 K.

- La baisse de température est modérée, reflétant une absorption de chaleur par le PCM sans saturation rapide.

- 1.25 kW/m² et 1.5 kW/m² :

- Température initiale : 340 K → Température finale : 300 K.

- La courbe est similaire à T1, mais avec une température d'entrée plus élevée, ce qui montre que le PCM absorbe davantage d'énergie sans altération significative de la pente de refroidissement.

- 1.75 kW/m²:

- Température initiale : 350 K → Température finale : 300 K.

- La pente de refroidissement est plus marquée, indiquant une dissipation thermique plus intense. Le PCM semble capable de gérer des flux élevés, mais la température en entrée est nettement plus haute, ce qui pourrait approcher les limites du matériau.

3. Comparaison entre les flux

- Températures initiales :

- Elles augmentent avec le flux thermique (330 K à 350 K), confirmant que l'air est chauffé plus intensément avant d'entrer dans le canal.

- Températures finales :

- Tous les cas convergent vers 300 K, suggérant que le PCM atteint un état d'équilibre ou une saturation en capacité de stockage de chaleur à la sortie du canal.

- Gradient thermique :

- Plus le flux est élevé, plus la différence entre les températures d'entrée et de sortie est importante ($\Delta T = 30$ K pour 1 kW/m² contre $\Delta T = 50$ K pour 1.75 kW/m²). Cela montre que le PCM dissipe efficacement la chaleur même sous des charges thermiques élevées.

- Le matériau maintient une capacité de refroidissement stable pour des flux variés, mais la température en entrée croissante pourrait nécessiter une optimisation (ex. : augmentation de la surface de contact ou amélioration de la conductivité thermique du PCM).

Chapitre III: Modélisation et Simulation du dissipateur thermique en matériau à changement de phase

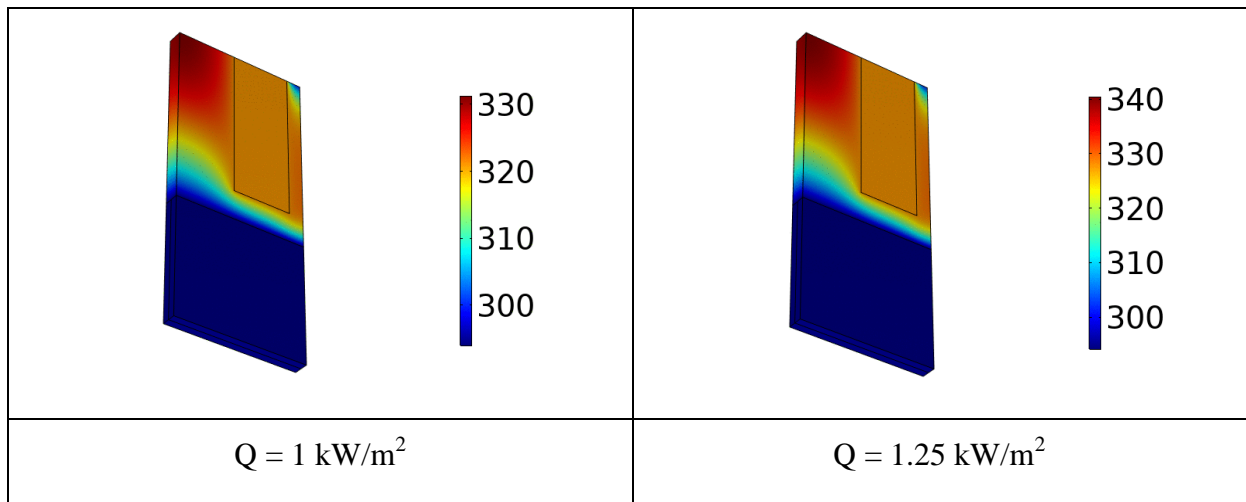
- À 1.75 kW/m^2 , la température d'entrée (350 K) pourrait approcher la limite de résistance thermique du PCM ou du système. Une analyse plus poussée est recommandée pour éviter la dégradation du matériau.

- Ces résultats valident l'utilisation du PCM pour des applications à flux modérés ($1\text{--}1.5 \text{ kW/m}^2$). Pour des flux plus élevés, une combinaison avec d'autres mécanismes de refroidissement (ex. : ventilation forcée) pourrait être envisagée.

Les données confirment que le PCM absorbe efficacement la chaleur, avec une température de sortie stabilisée à 300 K quel que soit le flux. Cependant, l'élévation des températures en entrée sous des flux élevés met en lumière la nécessité de :

1. Surveiller les limites thermiques du PCM pour éviter sa dégradation.
2. Optimiser la géométrie du micro-canal (ex. : longueur, section) pour améliorer le transfert de chaleur.
3. Étudier des PCM hybrides (composites à haute conductivité) pour des applications à très haute puissance.

Ces résultats sont essentiels pour concevoir des dissipateurs thermiques adaptés à des systèmes électroniques ou énergétiques exigeants.



Chapitre III: Modélisation et Simulation du dissipateur thermique en matériau à changement de phase

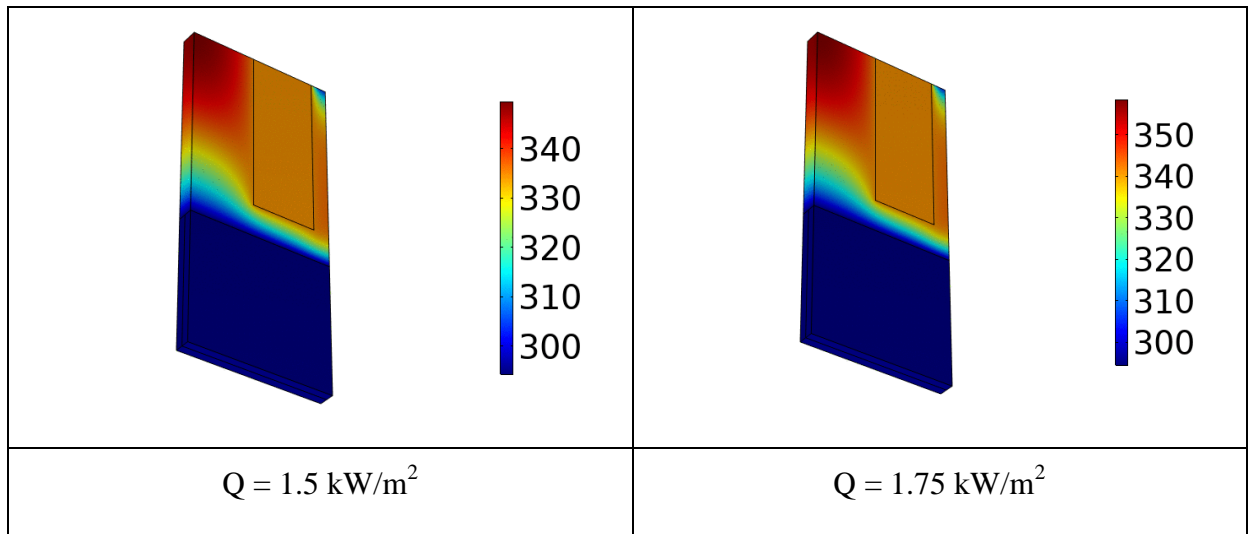


Figure III.12. Effet du flux imposé sur la température de l'air.

Conclusion générale

Conclusion générale:

Ce mémoire a abordé la problématique du refroidissement des composants électroniques de puissance à travers l'étude des matériaux à changement de phase (MCP). Le premier chapitre a dressé un état de l'art des méthodes de refroidissement, soulignant l'intérêt des MCP pour leur capacité à stocker d'importantes quantités d'énergie thermique sous forme de chaleur latente. Le deuxième chapitre a approfondi la connaissance des MCP, en présentant leurs propriétés thermophysiques, leurs différentes familles (organiques, inorganiques, eutectiques) et leurs critères de sélection, ainsi que leurs applications dans des domaines variés tels que le bâtiment, l'électronique et les énergies renouvelables. Enfin, le troisième chapitre a porté sur la modélisation et la simulation numérique d'un dissipateur thermique intégrant un MCP, en utilisant la méthode des éléments finis. Les résultats ont montré l'influence du nombre de Reynolds et du flux thermique imposé sur les performances du système, mettant en évidence l'optimisation possible grâce à une convection forcée et à un choix adapté du MCP.

Les simulations numériques réalisées ont permis de valider l'efficacité du dissipateur thermique à base de MCP. Il a été observé que l'augmentation du nombre de Reynolds (donc de la vitesse de l'air) améliore significativement le transfert thermique, réduisant ainsi la température de fonctionnement. De même, l'étude de l'effet du flux thermique imposé a révélé que le MCP permet de stabiliser la température même sous des charges thermiques élevées, bien que la pression dans le système augmente avec le flux. L'analyse transitoire a également montré la capacité du MCP à absorber la chaleur pendant la phase de fusion, retardant l'élévation de température et favorisant la convection naturelle.

En perspective, ce travail ouvre plusieurs voies de recherche. D'une part, l'optimisation de la géométrie du dissipateur et du micro-canal pourrait encore améliorer les performances. D'autre part, l'étude de MCP composites, avec une conductivité thermique accrue, serait bénéfique pour des applications à très haute puissance. Enfin, la validation expérimentale des modèles numériques développés constituerait une étape essentielle pour confirmer les prédictions et ouvrir la voie à des applications industrielles.

En conclusion, les matériaux à changement de phase représentent une solution innovante et efficace pour relever les défis de la gestion thermique dans l'électronique moderne. Leur intégration dans des systèmes de refroidissement passifs ou actifs offre des perspectives prometteuses pour des dispositifs plus compacts, plus fiables et plus durables.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Références bibliographiques:

- [1] Louahlia, H., & Yon, S. (2015). Dissipation thermique dans les composants/systèmes électroniques.
- [2] Mehling, H., & Cabeza, L. F. (2008). Heat and cold storage with PCM (Vol. 308). Springer.
- [3] Liu, M., Saman, W., & Bruno, F. (2012). Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 2118–2132.
- [4] Soupart Soupart-Caron, A. (2015, December). Stockage de chaleur dans les matériaux à changement de phase [Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes].
- [5] Theis, T., & Tomkin, J. (2015). *Sustainability: A comprehensive foundation*.
- [6] Fleischer, A. S. (2015). *Thermal energy storage using phase change materials: Fundamentals and applications*. Springer.
- [7] Nebel, C., & Ristein, J. (2003). *Thin-Film Diamond I* (part of the Semiconductors and Semimetals Series). Academic Press.
- [8] Oseen-Senda, K. (2006). Étude de l'ébullition du pentane en monocanal en vue de son utilisation pour le refroidissement des piles à combustible PEMFC [Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy I].
- [9] Khare, S., Dell'Amico, M., Knight, C., & McGarry, S. (2012). Selection of materials for high temperature latent heat energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 107, 20–27.
- [10] Mehling, H., Hiebler, S., & Günther, E. (2010). New method to evaluate the heat storage density in latent heat storage for arbitrary temperature ranges. *Applied Thermal Engineering*, 30(17–18), 2652–2657.
- [11] Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318–345.

Références bibliographiques

- [12] Abhat, A. (1983). Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials. *Solar Energy*, 30(4), 313–332.
- [13] Kenisarin, M. M. (2010). High-temperature phase change materials for thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), 955–970.
- [14] Cabeza, L. F., Roca, J., Nogués, M., Mehling, H., & Hiebler, S. (2002). Immersion corrosion tests on metal-salt hydrate pairs used for latent heat storage in the 48 to 58 °C temperature range. *Materials and Corrosion*, 53(12), 902–907.
- [15] Kotzé, J. P., von Backström, T. W., & Erens, P. J. (2011). A combined latent thermal energy storage and steam generator concept using metallic phase change materials and metallic heat transfer fluids for concentrated solar power. *SolarPACES 2011*.
- [16] Ge, H., Li, H., Mei, S., & Liu, J. (2013). Low melting point liquid metal as a new class of phase change material: An emerging frontier in energy area. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 331–346.
- [17] Himran, S., Suwono, A., & Mansoori, G. A. (1994). Characterization of alkanes and paraffin waxes for application as phase change energy storage medium. *Energy Sources*, 16(1), 117–128.
- [18] Hasnain, S. M. (1998). Review on sustainable thermal energy storage technologies, part I: Heat storage materials and techniques. *Energy Conversion and Management*, 39(11), 1127–1138.
- [19] Pielichowska, K., & Pielichowski, K. (2014). Phase change materials for thermal energy storage. *Progress in Materials Science*, 65, 67–123.
- [20] Muraishi, K., Suzuki, Y., & Kikuchi, A. (1994). Kinetics of the thermal decomposition of dicarboxylic acids. *Thermochimica Acta*, 239, 51–59.
- [21] Roget, F., Favotto, C., & Rogez, J. (2013). Study of the $\text{KNO}_3\text{--LiNO}_3$ and $\text{KNO}_3\text{--NaNO}_3\text{--LiNO}_3$ eutectics as phase change materials for thermal storage in a low-temperature solar power plant. *Solar Energy*, 95, 155–169.
- [22] Humphries, W. R. (1974). Performance of NNED thermal capacitors [Ph. D. thesis, University of Texas, Austin].

Références bibliographiques

- [23] Humphries, W. R., & Griggs, E. I. (1977). A design handbook for phase change thermal control and energy storage devices. NASA, Huntsville, AL.
- [24] Theunissen, P. H., & Buchlin, J. M. (1983). Numerical optimization of a solar air heating system based on encapsulated PCM storage. *Solar Energy*, 31(3), 271–277.
- [25] Wang, J. C. Y., Lin, S., Kwok, C. C. K., & Vastistas, G. H. (1984). An analytical study of heat exchanger effectiveness and thermal performance in a solar energy storage system with PCM. *Journal of Solar Energy Engineering*, 106, 231.
- [26] Santamouris, M. J., & Lefas, C. C. (1988). On the coupling of PCM stores to active solar systems. *International Journal of Energy Research*, 12(4), 603–610.
- [27] Solomon, A. D. (1979). Design criteria in PCM wall thermal storage. *Energy*, 4(4), 701–709.
- [28] Grodzka, P., Price, J., Serbin, C., & Solomon, A. (1982). On the development of heat storage building materials. In *Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (Vol. 4)*. Lockheed Corporation, Huntsville, Alabama.
- [29] O'Connor, J. P., & Weber, R. M. (1997). Thermal management of electronic packages using solid-to-liquid phase change techniques.
- [30] Pal, D., & Joshi, Y. K. (1997). Application of phase change materials to thermal control of electronic modules: A computational study.
- [31] Vesligaj, M. J., & Amon, C. H. (1999). Transient thermal management of temperature fluctuations during time varying workloads on portable electronics. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 22(4), 541–550.
- [32] Sarier, N., & Onder, E. (2012). Organic phase change materials and their textile applications: An overview. *Thermochimica Acta*, 540, 7–60.
- [33] Sharma, R. K., Ganesan, P., Tyagi, V. V., Metselaar, H. S. C., & Sandaran, S. C. (2021). Phase change materials for thermal energy storage: A review of recent developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111150.
- [34] Zhang, Y., Ding, J., Zhang, W., & Yang, X. (2020). Enhancing energy efficiency using PCM in thermal systems: A comprehensive review. *Energy and Buildings*, 210, 109742.

Références bibliographiques

- [35] Kasaeian, A., Bahrami, L., Mahian, O., & Wongwises, S. (2021). A review on the applications of phase change materials in cooling, heating and power generation systems. *Energy Conversion and Management*, 238, 114156.
- [36] Li, W., Liu, J., & Zhang, Y. (2022). Thermal energy storage for buildings using PCMs: A review of applications and recent progress. *Journal of Building Engineering*, 50, 104126.
- [37] Zhou, D., Zhao, C. Y., & Tian, Y. (2020). Applications of phase change materials in automobile thermal management: A review. *Applied Thermal Engineering*, 179, 115702.
- [38] Al-Abidi, A. A., Mat, S., Sopian, K., & Sulaiman, M. Y. (2020). Application of PCM for thermal management of electronic devices: Recent developments. *Journal of Energy Storage*, 30, 101485.
- [39] Cabeza, L. F., & Dolado, P. (2021). Phase change materials in cold thermal energy storage for food preservation – A review. *Renewable Energy*, 163, 1136–1148.
- [40] Lazaro, A., Dolado, P., Marin, J. M., & Zalba, B. (2020). PCM-based thermal energy storage for solar energy applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110275.
- [41] Zhang, Y., & Fang, X. (2021). Phase change materials for thermal energy storage: Fundamentals and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 110872.
- [42] Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2020). Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(3), 251–283.
- [43] Soares, N., Costa, J. J., Gaspar, A. R., & Santos, P. (2021). Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency. *Energy and Buildings*, 249, 111213.
- [44] Sharifi, N. P., & Mahdavinejad, M. (2020). A comprehensive review on energy storage systems integrated into building envelopes for passive heating and cooling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110283.
- [45] Akeiber, H., et al. (2021). A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 110889.

Références bibliographiques

- [46] Khudhair, A. M., & Farid, M. M. (2020). A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. *Energy Conversion and Management*, 45(2), 263–275.
- [47] Jamekhorshid, A., Sadrameli, S. M., & Farid, M. M. (2021). A review of micro-encapsulation methods of phase change materials (PCMs) for thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112111.
- [48] Dincer, I., & Rosen, M. A. (2021). *Thermal energy storage: Systems and applications* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- [49] Yu, N., Wang, R. Z., & Wang, L. W. (2020). Sorption thermal storage for solar energy. *Progress in Energy and Combustion Science*, 39(5), 489–514.
- [50] Zhou, D., Zhao, C. Y., & Tian, Y. (2020). Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy*, 92, 593–605.
- [51] Bales, C., & Perers, B. (2021). Chemical reaction-based thermal energy storage: Review and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110706.
- [52] Chiba, R., et al. (2021). Solid–solid phase change materials for thermal energy storage: A review. *Materials Today Energy*, 21, 100709.
- [53] Moqsud, M. A., Rahman, M. A., & Redowan, M. (2020). Limitations and future prospects of solid–solid phase change materials. *Journal of Energy Storage*, 27, 101144.
- [54] Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2020). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1847–1861.
- [55] Zhang, Y., & Fang, X. (2021). Phase change materials for thermal energy storage: Fundamentals and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 110872.
- [56] Kuznik, F., David, D., Johannes, K., & Roux, J. J. (2020). A review on phase change materials integrated in building walls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 379–391.
- [57] Zhou, D., Zhao, C. Y., & Tian, Y. (2021). Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy*, 92, 593–605.

Références bibliographiques

- [58] Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2020). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318–345.
- [59] Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K., & Al-Hallaj, S. (2021). A review on phase change energy storage: Materials and applications. *Energy Conversion and Management*, 45(9–10), 1597–1615.
- [60] Zhang, Y., & Fang, X. (2021). Phase change materials for thermal energy storage: Fundamentals and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 110872.
- [61] Kenisarin, M. M., & Mahkamov, K. (2020). Passive thermal regulation of buildings using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 371–398.
- [62] Agyenim, F., Hewitt, N., Eames, P., & Smyth, M. (2020). A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 615–628.
- [63] Sarier, N., & Onder, E. (2021). Organic phase change materials and their textile applications: A review. *Thermochimica Acta*, 540, 7–60.
- [64] Baetens, R., Jelle, B. P., & Gustavsen, A. (2021). Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 42(2), 1361–1368.
- [65] Cabeza, L. F., Castell, A., Barreneche, C., de Gracia, A., & Fernández, A. I. (2020). Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1675–1695.
- [66] Zhang, Y., Lin, K., Jiang, Y., & Zhou, G. (2021). Thermal storage and insulation properties of paraffin/expanded graphite composite phase change material. *Energy and Buildings*, 38(9), 1084–1089.
- [67] Mehling, H., & Cabeza, L. F. (2020). Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications. Springer.
- [68] Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2020). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318–345.

Références bibliographiques

- [69] Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K., & Al-Hallaj, S. (2020). A review on phase change energy storage: Materials and applications. *Energy Conversion and Management*, 45(9–10), 1597–1615.
- [70] Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(3), 251–283.
- [71] Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318–345.
- [72] Cabeza, L. F., Castell, A., Barreneche, C., de Gracia, A., & Fernández, A. I. (2011). Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1675–1695.
- [73] 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.
- [74] Kumar, R., & Buddhi, D. (2008). Thermal cycling stability of phase change materials for latent heat storage: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9), 2438–2458.
- [75] Tyagi, V. V., Kaushik, S. C., Tyagi, S. K., & Akiyama, T. (2011). Development of phase change materials based microencapsulated technology for thermal energy storage applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(7), 4356–4368.
- [76] Cabeza, L. F. (2015). *Phase change materials*. Springer.
- [77] 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.
- [78] Cabeza, L. F., Castell, A., Barreneche, C., de Gracia, A., & Fernández, A. I. (2011). Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1675–1695.

Références bibliographiques

- [79] Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(3), 251–283.
- [80] Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318–345.
- [81] Balaras, C. A., & Droutsas, K. (2007). Thermal management of electronics using phase change materials: A review. *Applied Thermal Engineering*, 27(17–18), 2911–2923.
- [82] Li, G., & Wang, L. (2015). Applications of phase change materials in food preservation: A review. *Journal of Food Engineering*, 144, 14–25.
- [83] Cabeza, L. F., Mehling, H., & Hiebler, S. (2012). Use of phase change materials in solar energy applications. *Energy Procedia*, 30, 113–121.
- [84] Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A., & Al-Hallaj, S. (2004). A review on phase change energy storage: Materials and applications. *Energy Conversion and Management*, 45(9–10), 1597–1615.
- [85] Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318–345.
- [86] Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(3), 251–283.
- [87] Cabeza, L. F., Roca, J., & Castell, A. (2010). Experimental study of paraffin as a PCM for thermal energy storage in building applications. *Energy and Buildings*, 42(11), 2036–2043.
- [88] Kenisarin, M., & Mahkamov, K. (2016). Solar energy storage using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 371–398.
- [89] Mondal, S. (2008). Phase change materials for smart textiles—An overview. *Applied Thermal Engineering*, 28(11–12), 1536–1550.

Références bibliographiques

- [90] Cabeza, L. F., Mehling, H., & Fernández, A. I. (2012). Phase change materials and their use in solar energy storage. *Energy Procedia*, 30, 246–255.
- [91] Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318–345.
- [92] Kenisarin, M., & Mahkamov, K. (2016). Solar energy storage using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 371–398.
- [93] Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(3), 251–283.
- [94] Mondal, S. (2008). Phase change materials for smart textiles—An overview. *Applied Thermal Engineering*, 28(11–12), 1536–1550.
- [95] Cabeza, L. F., Marín, J. M., & Roca, J. (2007). Materials for thermal energy storage: Part 2. *Renewable Energy*, 32(7), 1210–1219.
- [96] Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318–345.
- [97] Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(3), 251–283.
- [98] Kenisarin, M., & Mahkamov, K. (2016). Solar energy storage using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 371–398.
- [99] Cabeza, L. F., Castell, A., Barreneche, C., de Gracia, A., & Fernández, A. I. (2015). Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1675–1695.
- [100] Cabeza, L. F., Castell, A., Barreneche, C., de Gracia, A., & Fernández, A. I. (2015). Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1675–1695.

Références bibliographiques

- [101] Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(3), 251-283.
- [102] Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318-345.
- [103] Kenisarin, M., & Mahkamov, K. (2016). Solar energy storage using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 371-398.
- [104] Mondal, S. (2008). Phase change materials for smart textiles—An overview. *Applied Thermal Engineering*, 28(11-12), 1536-1550.
- [105] Tang, F., et al. (2015). Thermal performance of composite phase change materials: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 759–774.
- [106] Li, G., & Hwang, Y. (2013). Evaluation of thermal conductivity and reliability of PCM-graphite composite for energy storage. *Energy Conversion and Management*, 70, 1–7.
- [107] 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.
- [108] Zhang, Y., Zhou, G., Lin, K., Zhang, Q., & Di, H. (2007). Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook. *Building and Environment*, 42(6), 2197–2209.
- [109] Sari, A., & Kaygusuz, K. (2002). Thermal properties and stability of palmitic acid as a phase change material. *Energy Conversion and Management*, 43(16), 2299–2315.
- [110] Cabeza, L. F., Castell, A., Barreneche, C., de Gracia, A., & Fernández, A. I. (2011). Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1675–1695.
- [111] Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318–345.

Références bibliographiques

- [112] Tay, N. H. S., Belusko, M., & Bruno, F. (2012). Review on phase change materials for thermal energy storage in building applications. *Energy and Buildings*, 42(10), 1361–1368.
- [113] 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.
- [114] Mehling, H., & Cabeza, L. F. (2008). Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications. Springer.
- [115] Kenisarin, M., & Mahkamov, K. (2007). Solar energy storage using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(9), 1913–1965.
- [116] Lazaro, A., Dolado, P., Zalba, B., & Marin, J. M. (2009). PCM – from the past to the present. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2122–2144.
- [117] Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318–345.
- [118] Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications.
- [119] Kenisarin, M., & Mahkamov, K. (2007). Solar energy storage using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(9), 1913–1965.
- [120] 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.
- [121] Mehling, H., & Cabeza, L. F. (2008). Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications. Springer.
- [122] Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications.
- [123] Kenisarin, M. M. (2010). High-temperature phase change materials for thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), 955–970.
- [124] 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.

Références bibliographiques

- [125] Agyenim, F., Hewitt, N., Eames, P., & Smyth, M. (2010). A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 615–628.
- [126] Cabeza, L. F., Castell, A., Barreneche, C., de Gracia, A., & Fernández, A. I. (2011). Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1675–1695.
- [127] Khudhair, A. M., & Farid, M. M. (2004). A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials.
- [128] Kenisarin, M. M., & Mahkamov, K. (2007). Solar energy storage using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(9), 1913–1965.
- [129] Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K., & Al-Hallaj, S. (2004). A review on phase change energy storage.
- [130] Sharma, A., & Sagara, K. (2005). Latent heat storage materials and systems: A review. *International Journal of Green Energy*, 2(1), 1–56.
- [131] 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.
- [132] Mehling, H., & Cabeza, L. F. (2008). Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications. Springer.
- [133] Agyenim, F., Hewitt, N., Eames, P., & Smyth, M. (2010). A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 615–628.
- [134] Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318–345.
- [135] Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(3), 251–283.

Références bibliographiques

- [136] Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(3), 251–283.
- [137] Baetens, R., Jelle, B. P., & Gustavsen, A. (2010). Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 42(9), 1361–1368.
- [138] Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318–345.
- [139] Cabeza, L. F., Castell, A., Barreneche, C., De Gracia, A., & Fernández, A. I. (2011). Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1675–1695.
- [140] Memon, S. A., & Ozturk, M. (2019). Application of phase change materials for electronic cooling: A review. *Applied Thermal Engineering*, 149, 470–487.
- [141] Pesaran, A. A. (2002). Battery thermal management in EVs and HEVs: Issues and solutions. *Battery Thermal Management Systems*, 1–11.
- [142] Faghri, A., & Zhang, Y. (2006). Advanced thermal management technologies for spacecraft: Application of phase change materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(13-14), 2439–2451.
- [143] Notman, M. J., & Phillips, D. L. (2020). Phase change materials in pharmaceutical cold chain packaging: Thermal performance and stability. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 109(5), 1735–1746.
- [144] Liu, Y., & Kumar, S. (2019). Smart textiles incorporating phase change materials for thermal management: A review. *Materials Today Communications*, 21, 100663.
- [145] Zhao, C., & Lu, Y. (2021). Development of medical devices based on phase change materials for thermal regulation of patients. *Biomedical Engineering Online*, 20(1), 45.
- [146] Tang, B., & Chen, Q. (2018). Application of phase change materials in cold chain logistics and packaging: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1233–1249.

Références bibliographiques

- [147] Mandal, A., & Ghosh, S. (2017). Industrial process cooling using phase change materials: Techniques and benefits. *Applied Energy*, 202, 540–553.
- [148] Singh, R., & Kumar, A. (2020). Use of phase change materials in agriculture: Thermal management of greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering*, 57(2), 115–126.
- [149] Kyriaki, E., Konstantinidou, C., Giama, E., & Papadopoulos, A. M. (2018). Life cycle analysis (LCA) and life cycle cost analysis (LCCA) of phase change materials (PCM) for thermal applications: A review. *International Journal of Energy Research*, 42, 3068–3077.
- [150] Li, F., Abed, A. M., Naghdi, O., Nasajpour-Esfahani, N., Hamed, S., Al Mashhadani, Z. I., Fazilati, M. A., Mohammed, B. M., Hadrawi, S. K., & Smaisim, G. F. (2022). The numerical investigation of the finned double-pipe phase change material heat storage system equipped with internal vortex generator. *Journal of Energy Storage*, 55, 105413.
- [151] Mourad, A., Aissa, A., Abed, A. M., Smaisim, G. F., Toghraie, D., Fazilati, M. A., Younis, O., Guedri, K., & Alizadeh, A. A. (2022). The numerical analysis of the melting process in a modified shell-and-tube phase change material heat storage system. *Journal of Energy Storage*, 55, 105827.
- [152] Hosseini, M., Ranjbar, A., Sedighi, K., & Rahimi, M. (2012). A combined experimental and computational study on the melting behavior of a medium temperature phase change storage material inside shell and tube heat exchanger. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39, 1416–1424.
- [153] Patankar, S. V. (1980). *Numerical heat transfer and fluid flow* [Book]. Washington, DC: Hemisphere Publishing Corp.
- [154] Hosseini, M., Rahimi, M., & Bahrampoury, R. (2014). Experimental and computational evolution of a shell and tube heat exchanger as a PCM thermal storage system. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 50, 128–136.