الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة

Mémoire

Présentée pour obtenir le diplôme de

Master

Spécialité : Energétique

Filière : Génie mécanique

Amélioration du stockage thermique d'un MCP : Etude numérique

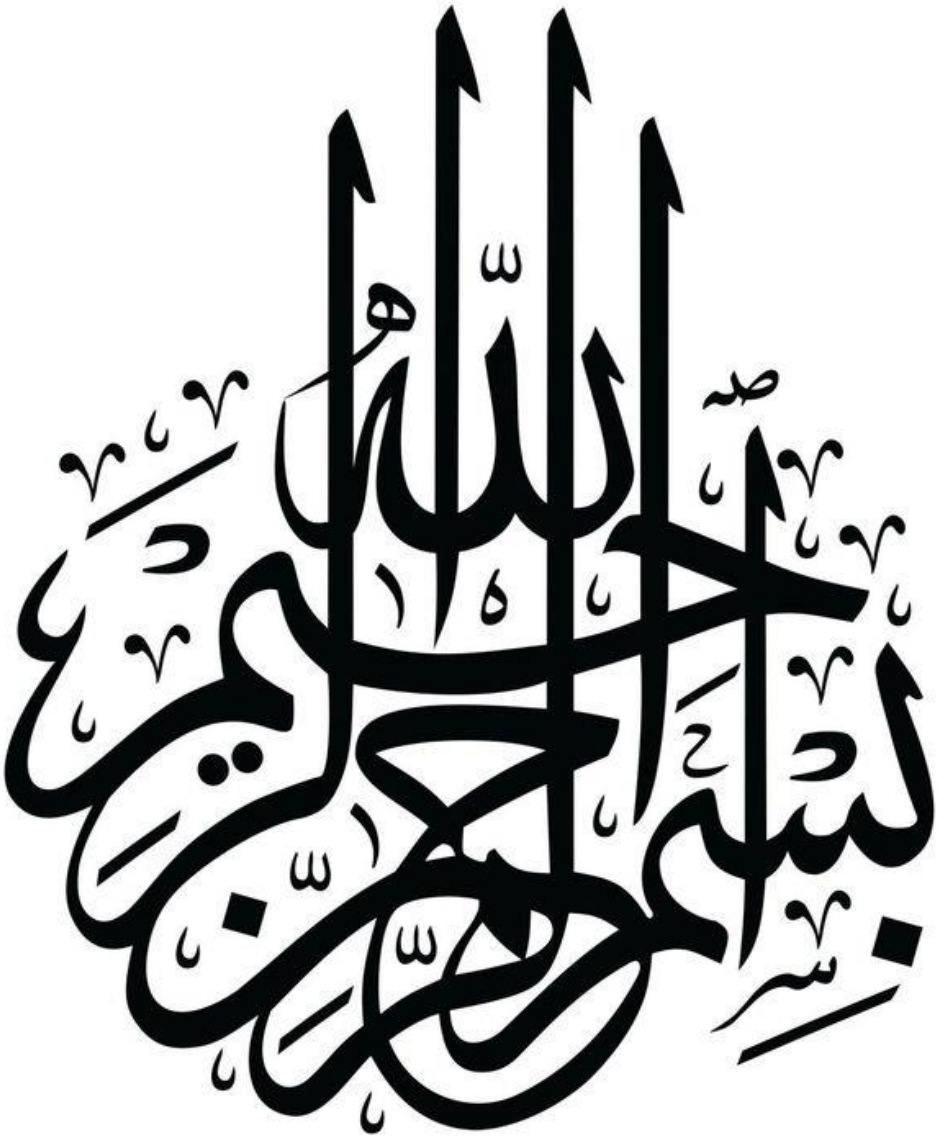
Présenté par :

NECIB Amira

Mémoire soutenue le 11 / 06 / 2025 devant le jury composé de

Chef du jury :	LAOUER Radouan	MCA
Encadrant :	BOUZENNADA Tarek	MCB
Examinateur :	CHELLOUG Fatima Zahra	MAA

Année universitaire :2024/2025


بسم الله الرحمن الرحيم

RESUMER

Ce travail présente une étude numérique du processus de fusion d'un matériau à changement de phase (RT-27) dans une cavité rectangulaire chauffée par convection naturelle. L'objectif est d'évaluer l'influence de l'ajout d'ailettes sur les performances thermiques du système.

La simulation, réalisée sous COMSOL Multiphysics, couvre quatre configurations : sans ailettes, avec une, deux et quatre ailettes. L'analyse repose sur l'évolution de la température, de la fraction liquide, de la vitesse du fluide, du nombre de Nusselt et de l'énergie thermique stockée.

Les résultats indiquent que les ailettes améliorent la conduction thermique dans les premières étapes, mais ralentissent initialement la convection naturelle. Toutefois, un nombre plus élevé d'ailettes permet une fusion plus rapide et plus homogène. Le cas à quatre ailettes se distingue par de meilleures performances thermiques, avec un taux de fusion élevé et une répartition efficace de la chaleur.

Cette configuration apparaît comme la plus adaptée pour optimiser le stockage thermique à base de MCP dans des applications énergétiques.

Abstract

This work presents a numerical study of the melting process of a phase change material (RT-27) in a rectangular cavity heated by natural convection. The objective is to evaluate the influence of fin addition on the thermal performance of the system.

The simulation, carried out using COMSOL Multiphysics, includes four configurations: without fins, with one, two, and four fins. The analysis is based on the evolution of temperature, liquid fraction, fluid velocity, Nusselt number, and stored thermal energy.

The results indicate that fins enhance thermal conduction in the early stages but initially slow down natural convection. However, a higher number of fins leads to faster and more uniform melting. The case with four fins stands out with better thermal performance, featuring a high melting rate and efficient heat distribution.

This configuration appears to be the most suitable for optimizing thermal energy storage using PCMs in energy applications.

ملخص

يقدم هذا العمل دراسة عددية لعملية انصهار مادة متغيرة الطور (RT-27) داخل تجويف مستطيل الشكل يتم تسخينه بالحمل الحراري الطبيعي. الهدف هو تقييم تأثير إضافة الزعانف على الأداء الحراري للنظام.

تم إجراء المحاكاة باستخدام برنامجCOMSOL Multiphysics ، وشملت أربع تكوينات: بدون زعانف، ومع زعنفة واحدة، زعنفَتين، وأربع زعانف. استند التحليل إلى تطور درجة الحرارة، ونسبة المادة السائلة، وسرعة السائل، وعدد نوسلت، والطاقة الحرارية المخزنة.

تشير النتائج إلى أن الزعانف تُحسِّن التوصيل الحراري في المراحل الأولى، لكنها تُبطئ الحمل الحراري الطبيعي في البداية. ومع ذلك، فإن زيادة عدد الزعانف يؤدي إلى انصهار أسرع وأكثر تجانسًا. وقد تميزت حالة الأربع زعانف بأداء حراري أفضل، حيث تحقق معدل انصهار مرتفع وتوزيع حراري فعّال.

REMERCIEMENT

Avant d'entamer ce travail, il est d'une grande importance pour moi d'exprimer ma gratitude envers tous qui m'ont aidé pour réaliser mon propos dans le cadre de ma soutenance de thèse. La première et la dernière chose et pour Allah qui me donne la capacité suffisante pour terminer ce travail. À notre université et à tout le personnel enseignant, je vous adresse mes remerciements pour tout ce que vous avez fait pour nous amener là où nous sommes aujourd'hui.

Je remercie également notre université pour ses efforts et pour avoir consacré toutes les ressources nécessaires afin d'assurer le bon déroulement des études. Je tiens à remercier mon superviseur M. Tarek qui m'a soutenu par ses conseils et ses orientations tout au long de ce parcours. Son accompagnement rigoureux et humain a grandement contribué à la qualité de ce mémoire.

Mes sincères remerciements aux membres du jury pour votre présence et l'intérêt que vous portez à mon travail. Enfin, je tiens à me remercier moi-même pour n'avoir pas abandonné, pour avoir continué à croire, même quand c'était difficile.

Ce mémoire est l'aboutissement d'un engagement personnel et d'une volonté sereine de réussir. A tous, merci infiniment

DEDICACE

بسم الله الرحمان الرحيم :{ لَئِن شَكَرْتُمْ لَأَزِيدَنَّكُم } إبراهيم 7

بسم الله الرحمان الرحيم :{ وَأَن لَّيْسَ لِلإِنسَانِ إِلاَّ مَا سَعَى، وَأَنَّ سَعْيَهُ سَوْفَ يُرَى} النجم 39

فاللهُم لك الحمد ولك الشكر

لكل بداية نهاية، ولكل جهد طيب ثمرة طيبة..

بسم الله الرحمان الرحيم: { قَالَ له مُوسَىٰ هَلْ أَتَّبِعُكَ على أَن تُعَلِّمَنِ مِمَّا عُلِّمْتَ رُشْدًا} الكهف 66

إلى أستاذي

شرفٌ لي أن أكون من طلبتكم

شكراً لكل دقيقة منحتموني إياها، ولكل ملاحظة كانت خطوة نحو الأفضل

تخرجي يحمل من عطائكم الكثير، فلكم كل التقدير.

بسم الله الرحمان الرحيم: { وَوَصَّيْنَا الْإِنسَانَ بِوَالِدَيْهِ} لقمان 14

إلى من زرعا الأمل في طريقي،

إلى أمي وأبي

شكراً لأنكما كنتما النور الذي أرشدني، والدعاء الذي ساندني، والحب الذي لا ينضب

بسم الله الرحمان الرحيم: {قَالَ سَنَشُدُّ عَضُدَكَ بِأَخِيكَ} القصص 35

إلى أخواتي

كنتنّ دائماً السند والملجأ، ومصدر الحب والضحكة في كل مراحل حياتي

شكراً لوجودكنّ الدائم

بسم الله الرحمن الرحيم

﴿ الْأَخِلَّاءُ يَوْمَئِذٍ بَعْضُهُمْ لِبَعْضٍ عَدُوٌّ إِلَّا الْمُتَّقِينَ ﴾ سورة الزخرف – الآية67

إلى أصدقائي الذين كانوا لي خير رفيق في درب العلم، وسندًا في كل لحظة صعبة.

إلى أولئك الذين شاركوني التعب والضحكة، الحلم والطموح، وكانوا نورًا يضيء عتمة الطريق.

لكم منّي أصدق عبارات الشكر وأجمل كلمات الوفاء، فأنتم نعمة أحمد الله عليها دائمًا.

كنتم أكثر من مجرد أصدقاء، كنتم إخوة زرعهم الله في طريقي، فكانوا لقلبي سكنًا ولروحي دفئًا.

SOMMAIRE

TABLE DES MATIERES

RESUMER I

REMERCIEMENT III

DEDICACE IV

SOMMAIRE V

LISTE DES FIGURES VII

LISTE DES TABLEAUX IX

NOMENCLATURE X

1. CHAPITRE I 2

1.1 Introduction 3

1.2 Modes de transfert de chaleur 3

1.2.1 Conduction 4

1.2.2 Convection 5

1.3 Stockage thermique : 7

1.3.1 Stockage sensible : 8

1.3.2 Stockage latent : 9

1.3.3 Stockage thermochimique : 11

1.4 Définition de MCP : 11

1.5 Comparaison des systèmes de stockage : 13

1.6 Applications des MCPs : 15

1.6.1 Le stockage de l'énergie thermique : 15

1.6.2 Isolation thermique : 15

1.6.3 Transport des produits alimentaires : 17

1.6.4 Application Médical : 17

2. CHAPITRE 2 19

2.1 Introduction 20

3. CHAPITRE 3 32

3.1 Introduction 33

3.2 Considérations générales et modèle mathématique 33

3.3 Les équations gouvernantes 35

3.4 Introduction sur COMSOL Multiphysics : 38

4. CHAPITRE 4 41

4.1 Introduction 42

4.2 Considérations générales 42

4.3 Résultats et discussion 44

4.4 Evaluation de la température 55

4.5 Nombre du Nusselt 57

4.6 Energie thermique stockée 58

5. CONCLUSION GENERALE 60

6. BIBLIOGRAPHIE 62

LISTE DES FIGURES

FIG. 1-1 : LES DIFFERENTS MODES DE TRANSFERT DE CHALEUR. 3
FIG. 1-2 : DIRECTION DU TRANSFERT DE CHALEUR PAR CONDUCTION. 4
FIG. 1-3 LES DIFFERENTS MODES DE CONVECTION 6
FIG. 1-4 REGIMES D'ECOULEMENT D'UN FLUIDE DANS UN ECOULEMENT DE FLUIDE 6
FIG. 1-5 MODES DE STOCKAGE DE L'ENERGIE THERMIQUE PHYSIQUES DE STOCKER L'ENERGIE THERMIQUE 8
FIG. 1-6 VARIATION DE LA TEMPERATURE DANS LE STOCKAGE SENSIBLE AU COURS DU STOCKAGE PAR CHALEUR SENSIBLE. 9
FIG. 1-7 TEMPERATURE VS ENTHALPIE POUR STOCKAGE LATENT ET SENSIBLE PRESENTANT L'ENERGIE STOCKEE DANS UN SYSTEME DE STOCKAGE LATENT EN COMPARAISON AVEC UN SYSTEME DE STOCKAGE SENSIBLE. 9
FIG. 1-8 MODELE CFD D'UNE CAPSULE MCP BASE SUR LES RESULTATS CFD POUR LA CHALEUR LATENTE THERMIQUE. 12
FIG. 1-9 CLASSIFICATION DES MCPS A CHANGEMENT DE PHASE 13
FIG. 1-10 SCHEMA DES CHANGEMENTS DE PHASE (MCP) DE PHASE 15
FIG. 1-11 ISOLATION PAR MCP. 16
FIG. 1-12 RECIPIENTS DE TRANSPORT THERMIQUE AVEC MCP ET DES ORGANES QUI CONTIENNENT MCP. 17
FIG. 2-1 EFFET DE NFN ET PE SUR LA DISTRIBUTION DE TEMPERATURE 20
FIG. 2-2 STRUCTURE REELLE DU MUR EN MCP. 21
FIG. 2-3 DESSIN EN COUPE DU SYSTEME 21
FIG. 2-4 CAPSULE CYLINDRIQUE CONTENANT DU MCP, AVEC DE L'AIR AU CENTRE ET EN HAUT 21
FIG. 2-5 CAPSULE RECTANGULAIRE REMPLIE DE MCP : A) AVEC 1 AILETTE, B) AVEC 3 AILETTES, C) AVEC UNE INCLINAISON DE 45°, D) AVEC UNE INCLINAISON DE 90° 22
FIG. 2-6 UNITE DE STOCKAGE THERMIQUE A TUBE ET CALANDRE. 23
FIG. 2-7 FRACTION LIQUIDE-SOLIDE (A GAUCHE) ET LIGNES DE COURANT (A DROITE) POUR CHAQUE CONFIGURATION D'AILETTES A DIFFERENTS PAS DE TEMPES 24
FIG. 2-8 VARIATION DE LA TEMPERATURE POUR UN CAS A 10 % DE SEL 25

FIG. 2-9 VARIATION DE LA TEMPERATURE POUR UN CAS A 20 % DE SEL 25
FIG. 2-10 FRACTION LIQUIDE EN FONCTION DU TEMPS. 26
FIG. 2-11 (A) REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU UCT AVEC SOURCE DE CHALEUR, DISSIPATEUR ET COUPLAGE THERMIQUE (B) VUE ECLATEE DU TCU (C) VUE ISOMETRIQUE DU CONTENEUR AVEC MCP ET PLAQUE DE RECOUVREMENT AVEC AILETTES. 27
FIG. 2-12 CAVITE OUVERTE CONTENANT DU MCP AVEC UNE AILETTE 27
FIG. 2-13 CHAMPS DE TEMPERATURE A DIFFERENTS PAS DE TEMPS ET DES ANGLES DE CONFIGURATION EN ZIGZAG LORS LA FUSION DE MCP A TFC = 50 °C 28
FIG. 2-14 FRACTION LIQUIDE SOUMIS A T = 50 MIN, WF = 20 ET 48 MM: (A) Φ = 0.01; (B) Φ = 0.05; (C) Φ = 0.2 ET (D) Φ = 0.3 29
FIG. 2-15 SCHEMA D'UN ECHANGEUR DE CHALEUR A TUBES TRIPLEX (A) SANS AILETTE ET (B) AVEC AILETTES UNIFORMES. 30
FIG. 2-16 VARIATION DE LA FRACTION DE FUSION (ASADI ET AL 2024). 31
FIG. 2-17 FRACTION LIQUIDE ET DE TEMPERATURE DES CAS 1, 2, 3, 5 ET 7 31
FIG. 3-1 VARIATION DE LA COURBE DE GAUSS 37
FIG. 3-2 INTERFACE DU LOGICIEL COMSOL 40
FIG. 4-1 SCHEMA DU DOMAINE DE CALCUL ET DES CONDITIONS AUX LIMITES. 43
FIG. 4-2 SCHEMA DU MAILLAGE. 45
FIG. 4-3 LA FRACTION LIQUIDE EN DIFFERENTS MAILLAGES. 45
FIG. 4-4 ÉVOLUTION DE LA FRACTION LIQUIDE DU MODELE UTILISE PAR RAPPORT AU TRAVAIL DE .. 46
FIG. 4-5 FRACTION LIQUIDE ET STRUCTURE D'ECOULEMENT A DIFFERENTS PAS DE TEMPS 49
FIG. 4-6 COURBE FRACTION LIQUIDE DE DIFFERENTE ETAT (A, B, C ET D). 50
FIG. 4-7 DISTRIBUTION DU CHAMP DE TEMPERATURE DANS (MCP) A DIFFERENTS PAS DE TEMPS. 52
FIG. 4-8 DISTRIBUTION DU CHAMP DE VITESSE DANS (MCP) A DIFFERENTS PAS DE TEMPS. 55
FIG. 4-9 EVALUATION DE LA TEMPERATURE EN 3 POINTS P1(18,5), P2(18,25), P3(18,45) 57
FIG. 4-10 LA VARIATION DE NUSSELT MOYEN EN FONCTION DU TEMPS 58
FIG. 4-11 EVALUATION DE L'ENERGIE THERMIQUE STOCKEE EN FONCTION DU TEMPS 59

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1-1 COMPARAISON DES TYPES DE STOCKAGE THERMIQUE (EN KWH/M³) : COMPARAISON DES DIFFERENTS TYPES DE STOCKAGE EN FONCTION DE LEUR DENSITE ENERGETIQUE 13

TABLEAU 4- 1 PROPRIETES THERMOPHYSIQUES DE MCP UTILISE ET DU CUIVRE (SOLIDE). 43

NOMENCLATURE

Symbole	***Définition***	***Unité***
A	Fonction de porosité	—
c_p	Capacité calorifique à pression constante	J/kg·K
Cp	Capacité thermique spécifique du milieu	J/kg·K
F_a, F_b, F_g	Termes de source de la fonction de porosité	kg /m^2. s^2
f_l	Fraction massique liquid	—
g	Accélération de la gravité	m/s^2
h	Coefficient de change convective	w/ m^2k
h	Chaleur sensible	J
H	Enthalpie totale	J
K	Conductivité thermique	W/m·K
L_f	Chaleur latente de fusion	J/kg
L	La langueur caractéristique	M
Nu	Nombre de Nusselt	—
Q	Énergie thermique stockée	J
S_h	Terme source de l'équation de conservation de l'énergie	—
T	Température	K
T_{ref}	Température à 25°C	°C
T_l	Température du liquide	K
T_s	Température du solide	K
T_f	Température du fusion	K
u	Composante de la vitesse dans la direction x	m. s -1
v	Composante de la vitesse dans la direction y	m. s^{-1}

Lettres grecques :

Symbole	***Définition***	***Unité***
α	Diffusivité thermique	m2 s-1
β	Coefficient de dilatation thermique	1/K
ΔH	Chaleur latente	kJ/kg
Δh_{ref}	Enthalpie de formation du matériau à la température standard	kj /kg
ε_l	Porosité	—

η	Fonction Delta de Dirac	—
μ	Viscosité dynamique	Pa. s
ν	Viscosité cinématique	m2/s
ρ	Masse volumique	kg/m^3
Φ	Fraction liquid	—
Φ	Flux de chaleur transmis	W

INDICES :

Indices	***Définition***
P	Parois
F	Fluide
C	Chaud
s	Solide
in	Initial
l	Liquide
max	Valeur maximale
MCP	Matériaux à changement de phase

INTRODUCTION GENERALE

La question de l'énergie et de l'efficacité thermique représente aujourd'hui l'un des défis majeurs auxquels sont confrontés les secteurs industriel, technologique et environnemental. Face à l'augmentation constante de la demande énergétique et à la nécessité d'optimiser l'utilisation des ressources, plusieurs solutions innovantes ont vu le jour pour améliorer les systèmes de stockage thermique et limiter les pertes énergétiques. Parmi ces solutions, les matériaux à changement de phase (MCPs) se distinguent comme une alternative prometteuse et efficace.

Les MCPs possèdent la capacité remarquable de stocker une grande quantité d'énergie thermique lors de leur transition de phase ، notamment lors de la fusion et de la solidification à une température pratiquement constante. Cette propriété thermique singulière les rend particulièrement adaptés à diverses applications dans le domaine du transfert de chaleur et du stockage de l'énergie thermique, allant des systèmes de chauffage et de climatisation aux technologies des énergies renouvelables, voire même aux dispositifs électroniques.

Ce travail met en lumière le stockage de chaleur au sein des matériaux à changement de phase lors du processus de fusion (chaleur latente). Pour bien définir et comprendre ce genre de problème, ce mémoire a été structuré comme suit :

* **Premier chapitre** : Généralités sur le transfert de chaleur et les matériaux à changement de phase.

* **Deuxième chapitre** : État de l'art sur les matériaux à changement de phase.

* **Troisième chapitre** : Modèle mathématique.

* **Quatrième chapitre** : Résultats et discussion

1. CHAPITRE I

Généralités sur le transfert de chaleur et les Matériaux à changement de phase.

1.1 Introduction

Le transfert et le stockage de chaleur sont des aspects fondamentaux du génie thermique, jouant un rôle clé dans l'amélioration de l'efficacité énergétique et la réduction de la consommation d'énergie. Dans ce chapitre, nous commencerons par introduire les modes de transfert de chaleur utilisés dans notre étude, afin de comprendre comment l'énergie thermique se propage à travers les matériaux et les systèmes. Ensuite, nous aborderons le stockage thermique, un élément essentiel dans diverses applications telles que l'énergie solaire et le chauffage central.

Par la suite, nous introduirons la définition des matériaux à changement de phase (MCP), qui représentent une technologie avancée pour le stockage thermique grâce à leur capacité thermique à absorber et stocker une grande quantité de chaleur lors des transitions de phase. Enfin, nous effectuerons une comparaison des différents systèmes de stockage thermique.

1.2 Modes de transfert de chaleur

Le transfert de chaleur par conduction se produit dans la même phase au repos ou mobile, dans des Liquides celle-ci est superposé à la convection et au rayonnement (Holman, 2002).

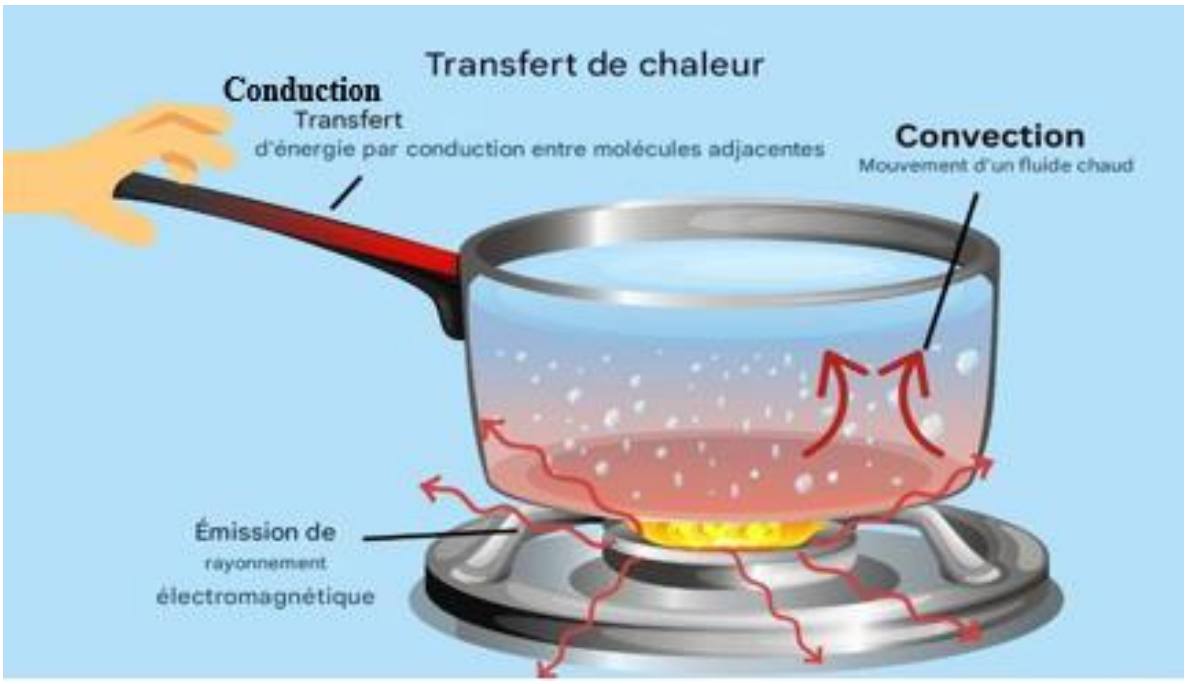


Fig. 1-1 Les différents modes de transfert de chaleur.

1.2.1 Conduction

La conduction se produit dans matière solide ou bien avec un fluide en repos c'est-à-dire sans mouvement macroscopique.

L'expérience montre que lorsqu'il y a un gradient de température dans un corps, un transfert d'énergie peut se produire d'une région de température plus élevée vers une région de température plus basse. Ce processus de transfert est appelé transfert de chaleur par conduction. La densité du flux de conduction transmis par unité de surface (ϕ/ A) est proportionnelle au gradient de température (Holman, 2002), Ainsi on trouve :

$$\phi/A=\partial T/\partial x \qquad (1\text{-}1)$$

Lorsque le corps (un solide par exemple) possède une conductivité constante, k, nous pouvons écrire:

$$\phi/A=-k\ \partial T/\partial x \qquad (1\text{-}2)$$

Φ : est le flux de chaleur transmis, [w].

K : est la conductivité thermique du corps solide, [W/m. K].

: est le gradient de température dirigé dans la direction de propagation de la chaleur [K / m].

Le signe moins (-) correspond aux exigences du deuxième principe de la thermodynamique, c'est-à-dire que le flux doit diminuer progressivement avec le gradient de température (Figure 1-1). La loi donnée par l'équation (1-1) qui régit la conduction est appelée loi de Fourier.

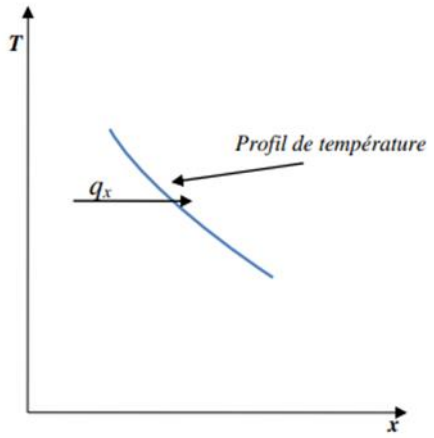


Fig. 1-2 Direction du transfert de chaleur par conduction (Holman, 2002).

1.2.2 Convection

Le transfert thermique par convection thermique représente les processus de transfert effectués par le mouvement macroscopique d'un fluide, c'est-à-dire La convection est un échange thermique entre un fluide en mouvement et une surface solide ou entre des régions d'un fluide de températures différentes (Holman, 2002). Généralement, nous pouvons définir :

• La convection est à l'intersection de deux domaines d'études : le transfert de chaleur et la mécanique des fluides, alors résoudre correctement un problème de convection nécessite une bonne connaissance des deux domaines.

Généralement, trois types de convection peuvent être envisagés, selon les causes qui produisent le mouvement de fluide : la convection forcée, la convection libre ou naturelle et la convection mixte.

• Convection forcée : elle se produit lorsque le mouvement du fluide est la conséquence d'actions externes imposées (pompe, ventilateur, vent, etc.). Dans ce cas, le champ de température est déterminé par un flux externe imposé. Le couplage réciproque entre le champ de vitesse et le champ de température est inconnu.

• Convection libre ou naturelle : elle est produite par un mouvement du fluide, généré par une différence de masse volumique entre les parties froide et chaude du fluide. En fait, la différence de température génère un mouvement naturel du fluide en créant des forces d'Archimède rotationnelles. Il existe également un autre type spécial de convection libre : l'effet Marangoni ou thermo-capillaire. Elle résulte de variations de tension superficielle à la surface libre d'un liquide, elles-mêmes résultant de variations de température.

• Convection mixte : dans ce mode, la convection libre et la convection forcée sont appliquées, où le mouvement du fluide est régi par deux modes de transfert de chaleur, c'est-à-dire qu'une partie du fluide est déplacée par une force externe et une autre partie se déplace par une force de flottabilité (poussée d'Archimède).

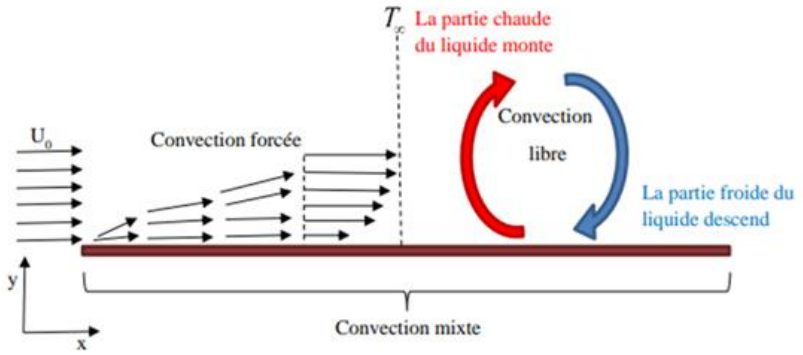


Fig. 1-3 Les différents modes de convection (Bouzennada. 2021).

Régime d'écoulements :

En raison de l'interaction étroite entre le mouvement du fluide et le transfert de chaleur, les différents types d'écoulement conduisent à la présence de deux régimes de convection :

Le régime turbulent (a) où le champ de température présente des fluctuations aléatoires, aussi bien dans l'espace que dans le temps. Le mouvement du fluide est désordonné et chaotique, et la chaleur y est transférée par conduction entre les couches turbulentes.

Le régime laminaire (b) où le champ de température reste homogène et stable, et le fluide se déplace de manière régulière, formant des couches parallèles. Autrement dit, les lignes de courant du fluide ne se mélangent pas, et la chaleur est transférée par conduction entre ces couches**.**

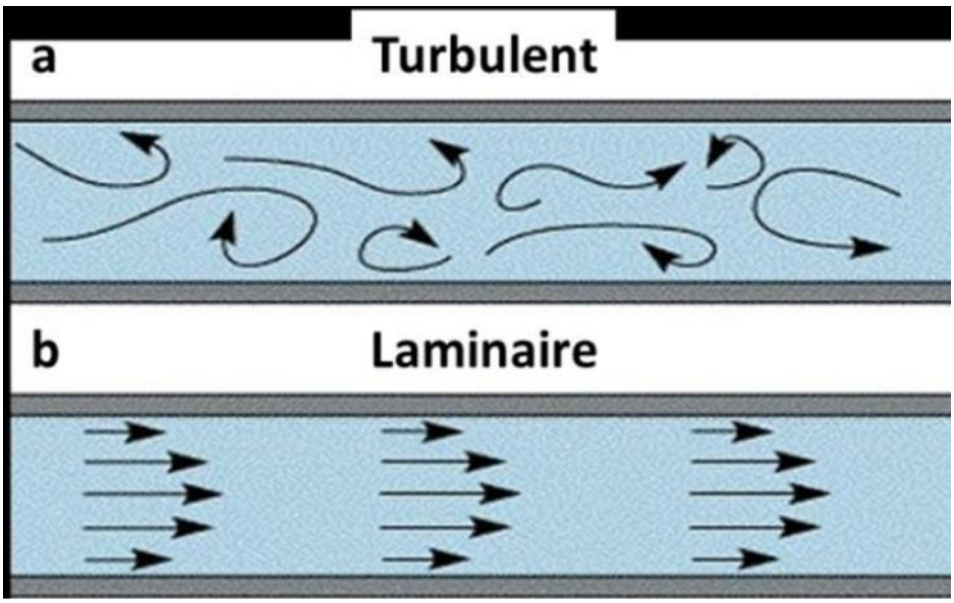


Fig. 1-4 Régimes d'écoulement d'un fluide dans un écoulement de fluide

Les nombres adimensionnels :

- ✓ **Nusselt :** Il représente le rapport entre le transfert de chaleurs convectives et le transfert de chaleur par conduction**.**

$$Nu=\frac{hL_c}{k} \quad (1\text{-}3)$$

k: est la conductivité thermique du fluide

L_c: est la longueur caractéristique **:**

L_c=D : Conduite cylindrique

L_c=L : écoulement sur une plaque plane

- ✓ **Prend :** nombre adimensionnel qui caractérise la distribution des vitesses relativement à celle des températures.il représente la viscosité cinématique à la diffusivité thermique.

$$\mathbf{Pr} = \frac{\mu c_p}{k} = \frac{\nu}{\frac{k}{\varrho c_p}} \quad (1\text{-}4)$$

- ✓ **Grashof :** caractérise la nature du régime d'écoulement laminaire ou turbulent :

$$\mathbf{Gr} = \frac{g ß (Tp - Tf) \delta^3}{\nu^2} \quad (1\text{-}5)$$

ß : coefficient de dilatation thermique [K-1]

g: accélération de gravité [m/s2]

δ : longueur caractéristique [m]

υ : viscosité cinématique [m2/s]

1.3 Stockage thermique :

Le stockage de l'énergie thermique permet de conserver la chaleur pour une utilisation ultérieure Cette chaleur peut être stockée de différentes manières :

- **Chaleur sensible** : stockage dans des matériaux inertes.
- **Chaleur latente** : utilisation de matériaux à changement de phase qui emmagasinent l'énergie lors de leur transformation.
- **Chaleur des réactions** : recours à la thermochimie et à l'absorption pour stocker l'énergie.

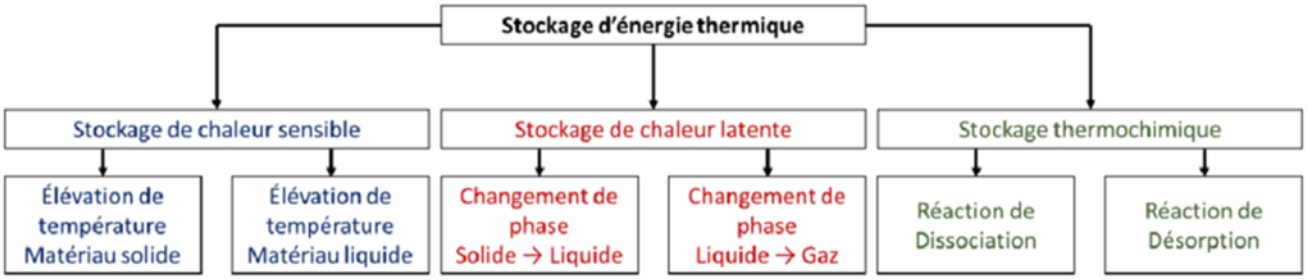


Fig. 1-5 Modes de stockage de l'énergie thermique physiques de stocker l'énergie thermique.

1.3.1 Stockage sensible :

Le stockage sensible est la méthode la plus courante pour récupérer la chaleur. Dans les dispositifs de stockage sensible, la température du matériau de stockage augmente en fonction de la chaleur transférée. Ce type de stockage, qui n'est pas isotherme, permet d'accumuler une quantité de chaleur proportionnelle à la masse et à la capacité calorifique du matériau, comme l'indique l'équation suivante :

$$\mathbf{E\ sensible} = m \cdot cp.\Delta t \qquad (1\text{-}6)$$

Dans les systèmes de stockage thermique, le matériau peut être liquide, solide, ou une combinaison des deux. Dans les réservoirs de stockage solide, le matériau est souvent organisé en lit granulaire ou matriciel fixe, et l'échange de chaleur se fait par un fluide caloporteur qui transfère la chaleur, soit via un échangeur thermique, soit directement à travers le matériau de stockage poreux. Si le fluide est un gaz, sa contribution au stockage est faible, mais s'il est liquide, il devient significatif, qualifiant le système de "dual". Le béton est fréquemment utilisé comme matériau de stockage en raison de son coût, sa résistance et sa capacité calorifique élevée, bien que d'autres matériaux comme les roches ou le sable soient également possibles.

Dans les réservoirs de stockage liquide, la stratification naturelle permet de stocker des fluides chauds et froids dans un même réservoir, créant une zone de gradient thermique appelée thermocline. Cette stratification dépend du matériau de stockage et du débit du fluide caloporteur. Lorsqu'un régénérateur est utilisé, l'inertie thermique du matériau solide permet une stratification plus marquée, réduisant ainsi le volume du réservoir.

Il existe aussi des systèmes où la chaleur et le froid sont stockés dans des réservoirs séparés, doublant ainsi les volumes de stockage, comme dans certaines centrales solaires à concentration. Les liquides utilisés pour ce stockage incluent les sels fondus, les huiles et l'eau, souvent utilisée dans les ballons d'eau chaude pour le stockage de chaleur sensible.

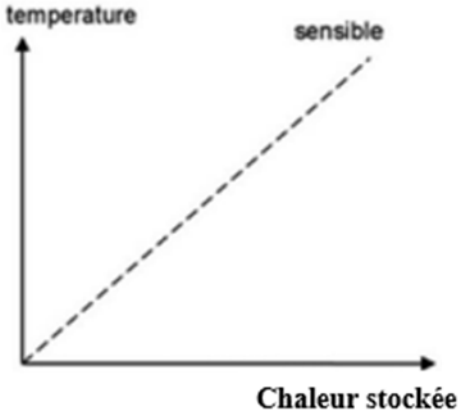


Fig. 1-6 Variation de la température dans le stockage sensible au cours du stockage par chaleur sensible (Kraiem, M. 2021).

1.3.2 Stockage latent :

Le stockage de chaleur latente consiste à chauffer un matériau jusqu'à ce qu'il subisse un changement de phase, comme le passage de la phase solide à la phase liquide, de la phase liquide à la phase gazeuse, ou encore lors d'une transition solide-solide. Lorsque le matériau atteint sa température de changement de phase, il absorbe une quantité de chaleur nécessaire à cette transformation, appelée chaleur latente de fusion ou de vaporisation, selon le cas. En revanche, lorsque le matériau liquide ou gazeux est refroidi, il revient à la phase solide ou liquide en libérant sa chaleur latente. La quantité de chaleur stockée et restituée dépend de la masse du matériau, et peut être exprimée par l'équation :

$$E_\{\text{latent}\} = m \cdot \text{L} \qquad (1\text{-}7)$$

La quantité de chaleur stockée dans un système à changement de phase est représentée sur le graphique température – énergie de la Figure 1-5 :

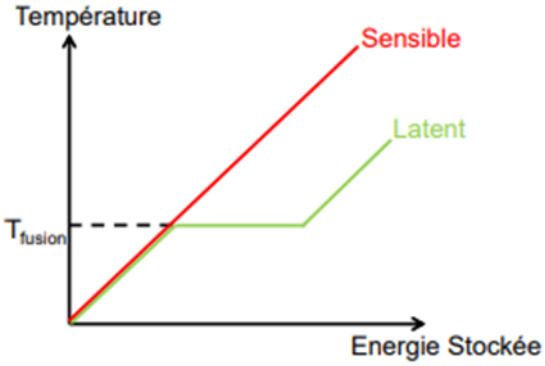


Fig. 1-7 Température vs enthalpie pour stockage latent et sensible présentant l'énergie stockée dans un système de stockage latent en comparaison avec un système de stockage sensible (Soupart,2015).

Lorsque le matériau est chauffé, il accumule d'abord de l'énergie sensible, ce qui lui permet d'atteindre la température de changement de phase. À ce moment, l'énergie ajoutée ne sert plus à augmenter la température, mais est utilisée pour réaliser le changement de phase. La chaleur est alors stockée de manière isotherme, à condition que le matériau soit pur, sous forme de chaleur latente. Une fois la transformation terminée, la température recommence à augmenter proportionnellement à l'énergie apportée, jusqu'à atteindre celle de la source de chaleur. Ainsi, il est impossible de stocker uniquement la chaleur latente, car pour atteindre le point de changement de phase, le matériau doit d'abord subir une élévation de température, emmagasinant inévitablement une certaine quantité d'énergie sensible. La quantité d'énergie stockée peut être exprimée pour le cas de la transition solide-liquide selon l'équation :

$$Q = \int_{Tinitial}^{Tfusion} mc_{p,s}dT + m\Delta h_{S-L} + \int_{Tfusion}^{Tfinal} mc_{p-L}dT \qquad (1\text{-}8)$$

Les matériaux utilisés pour le stockage thermique latent sont appelés Matériaux à Changement de Phase (MCP). Ces derniers peuvent être utilisés pour leurs transitions solide-solide, solide-liquide ou liquide-gaz. La transition solide-solide a été envisagée comme alternative à l'encapsulation des MCP utilisés en batch dans certains réservoirs de stockage. Elle est relativement simple à gérer, car elle entraîne peu ou pas d'expansion volumique, ce qui limite les risques de fuites et de surpression. Cependant, peu de matériaux conviennent, souvent parce que la chaleur latente de la transition solide-solide est trop faible par rapport à celle de la transition solide-liquide, ou parce que le matériau manque de stabilité thermique.

Les transformations liquide-gaz, bien qu'attrayantes en raison de leur grande chaleur latente, posent des défis importants en raison du changement de volume majeur lié à l'évaporation du liquide, rendant leur utilisation complexe et souvent peu pratique. Par conséquent, cette transition est généralement écartée dans les systèmes de stockage latent.

Bien que la chaleur latente de fusion soit inférieure à celle de l'évaporation, la transition solide-liquide est la plus prometteuse car elle limite l'expansion volumique et donc l'augmentation de pression due au changement de phase. Lors de la fusion, l'expansion volumique est d'environ 10 %. Si un espace d'expansion est prévu dans le réservoir, tant le solide que le liquide peuvent être contenus, ce qui permet de limiter la pression exercée sur le système de stockage.

1.3.3 Stockage thermochimique :

La troisième méthode de stockage de l'énergie thermique repose sur l'utilisation de l'énergie endothermique des réactions chimiques réversibles. La chaleur de réaction stockée est généralement liée à la dissociation des réactifs chimiques en deux composants. Une partie ou la totalité de Cette chaleur peut être récupérée plus tard lors de la réaction de synthèse.

$$A + \Delta H_r \Leftrightarrow B + C$$

A=Réactif solide ou liquide

ΔH_r = Chaleur de réaction en [J/mol]

B et C = Produits sous forme gazeuse, liquide ou solide

Pour que le stockage soit suffisamment compact, il est nécessaire que les réactifs soient principalement sous forme solide ou liquide. Les produits obtenus peuvent être sous forme de gaz, liquide ou solide, indépendamment du type. Lorsque la réaction implique un gaz, le système de stockage peut être conçu sous forme d'un réacteur à lit fluidisé. Ce type de stockage permet de conserver les produits pour une utilisation future et est particulièrement adapté au stockage inter-saisonnier.

1.4 Définition de MCP :

Un matériau à changement de phase (MCP) constitue l'élément principal du système SET, et son efficacité dépend de la chaleur latente. Tout matériau susceptible de subir un changement de phase peut potentiellement être utilisé comme MCP pour des applications SET.

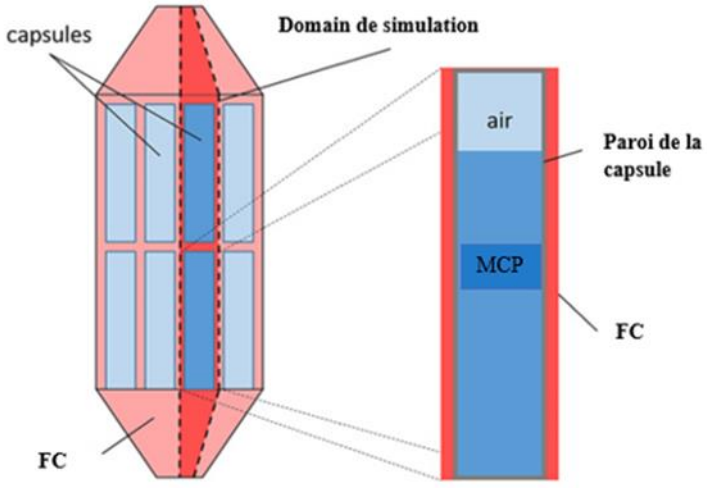


Fig. 1-8 Modèle CFD d'une capsule MCP basé sur les résultats CFD pour la chaleur latente thermique.

Bien que quatre types de changements de phase distincts puissent se produire, tant naturellement qu'industriellement – à savoir liquide-gaz, solide-gaz, solide-liquide et solide-solide – le changement de phase solide-liquide est celui qui est le plus couramment utilisé dans les applications SET. Cela est dû à son faible changement de volume et à son enthalpie de fusion modérée.

Cependant, il convient de noter que bien qu'il existe de nombreux matériaux ayant des températures de fusions variées, tous ne sont pas adaptés comme MCP pour les applications SET. Il est essentiel que le matériau présente également d'autres caractéristiques thermophysiques, cinétiques et chimiques avantageuses, telles qu'une chaleur latente de fusion élevée, un faible changement de volume, un taux de cristallisation approprié et une bonne stabilité chimique. De plus, il doit être disponible sur le marché à un coût abordable.

Les MCPs peuvent être classés en trois catégories : organiques, inorganiques et eutectiques. La figure (1-4) présente un aperçu de la caractérisation des MCPs.

Des recherches ont été menées sur des matériaux susceptibles d'être utilisés dans des systèmes de stockage d'énergie thermique (SET) à chaleur latente à des températures inférieures à 120 °C. Cette plage de températures est particulièrement intéressante pour les applications de refroidissement dans les centrales électriques. Parmi les matériaux appropriés pour cette plage de températures, on retrouve les cires de paraffine, les graisses insaturées et les hydrates de sel. Le stockage d'énergie thermique à l'aide de MCP, basé sur la chaleur latente, constitue une méthode prometteuse pour stocker l'énergie thermique renouvelable, car elle permettrait de maintenir des conditions de stockage proches de l'isotherme tout en offrant une capacité de stockage énergétique élevée.



Fig. 1-9 Classification des MCPs à changement de phase (Chili& Bourmel, 2021).

1.5 Comparaison des systèmes de stockage :

Tous les systèmes de stockage suivent trois étapes clés : la charge, le stockage et la décharge. Le choix du type de stockage dépend de l'application visée. Ainsi, les systèmes de stockage latent et sensible sont généralement utilisés comme tampon pour réguler la production ou différer la consommation d'énergie. À l'inverse, les systèmes thermochimiques conviennent mieux pour un stockage à long terme ou inter saisonnier, permettant de conserver la chaleur excédentaire produite en été pour la restituer en hiver.

Chaque système de stockage présente un degré de maturité différent. Le stockage sensible est déjà bien développé, notamment avec des applications comme les chauffe-eaux sanitaires, bien qu'il nécessite encore des améliorations pour des températures supérieures à 100 °C, notamment au niveau de la résistance des matériaux, de la corrosion et de la stratification thermique. Les Matériaux à Changement de Phase (MCP) sont utilisés dans des projets pilotes, comme le projet ISET, mais leur déploiement à grande échelle reste limité et nécessite davantage de recherches. Le stockage thermochimique, en raison de sa haute densité énergétique, est prometteur, mais n'est pour l'instant testé qu'à l'échelle du laboratoire en raison de sa complexité. Des efforts de recherche sont en cours pour améliorer et industrialiser ces technologies.

Le stockage thermochimique n'est pas considéré comme une solution pour valoriser la chaleur fatale en raison de son faible degré de maturité technologique et des délais longs qui conviennent mieux au stockage inter-saisonnier

Les densités énergétiques obtenues mais aussi les températures de fonctionnement de chaque système de stockage thermique sont présentées pour quelques matériaux dans le Tableau 1.1 : Comparaison des types de stockage thermique (en kWh/m³).

Tableau 1-1 Comparaison des types de stockage thermique (en kWh/m³) : Comparaison des différents types de stockage en fonction de leur densité énergétique (Soupart, 2015) .

Stockage sensible	Température (°C) Froid	Chaud	Capacité calorifique c_p (kJ/kg.K)	Masse volumique ρ (kg/ m³)	Densité énergétique (kWh$_t$/m³)
Sable – roche – huile minérale	200	300	1.3	1700	61
Béton renforcé	200	300	0.85	2200	52
Huile minérale	200	300	2.6	770	56
Eau	20	80	4.18	1000	70
Nitrates de sels fondus	250	350	1.5	1825	76
Stockage latent	Température de fusion T_{fusion} (°C)		Chaleur latente Δh_{S-L} (kJ/kg)	Masse volumique ρ (kg/ m³)	Densité énergétique (kWh$_t$/m³)
Acide maléique	131-140		235	1590	103
Xylitol	95		232	1500	97
Erythritol	118		340	1450	137
MgCl2.6H2O	117		165	1569	72
$NaNO_3$	307		172	2260	108
Stockage thermochimique	Température de réaction (°C) Charge	Décharge	Enthalpie de réaction ΔH_r (kJ/mol)		Densité énergétique (kWh$_t$/m³)
$MgH_2 + \Delta Hr \leftrightarrow Mg + H_2$	380 à 1 bar	230 à 4 bar	-75		430
$CaCO_3 + \Delta Hr \leftrightarrow CaO + CO_2$	700	650	-178		110
$MgH_2 + \Delta Hr \leftrightarrow Mg + H_2$	450	25-400	-94.6 (charge) 64.8 (décharge)		300

Le stockage sensible a une densité énergétique de 52 à 76 kWh/m³ pour les matériaux sélectionnés, mais seul le volume de matériau est pris en compte dans ces calculs. Lors de l'utilisation de régénérateurs avec un lit fixe granulaire, le volume réel de la cuve doit être considéré, réduisant la densité énergétique à environ 36.6 kWh/m³. Augmenter le gradient de température peut améliorer cette densité, mais cela dépend des limites de température des matériaux utilisés, comme les huiles et les sels fondus. Certaines substances comme l'acier ou le fer offrent une densité énergétique bien plus élevée, mais leur coût reste un frein majeur à leur utilisation.

Le stockage latent offre une densité énergétique de 72 à 137 kWh/m³, et l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) permet de réduire les volumes de stockage et les coûts, comparés au stockage sensible. Un autre avantage est la restitution de chaleur à température constante, dépendant uniquement de la masse du matériau et de sa chaleur latente. Bien que la chaleur soit restituée à la température de fusion du MCP, un gradient thermique minimal est nécessaire pour garantir le transfert de chaleur. De plus, les MCP peuvent également stocker de la chaleur sensible après leur fusion, augmentant leur efficacité.

Le stockage dans les MCP émerge à l'échelle des démonstrateurs, offrant des avantages tels que la réduction des volumes de stockage et des coûts. La restitution de la chaleur à température constante simplifie son utilisation et assure une qualité d'énergie stable, indépendamment du gradient thermique entre le fluide caloporteur et le matériau de stockage.

1.6 Applications des MCPs :

1.6.1 Le stockage de l'énergie thermique :

Les Matériaux à Changement de Phase (MCP) emmagasinent l'énergie en se transformant de l'état solide à l'état liquide (fusion) et la libèrent lors de leur retour à l'état solide depuis l'état liquide (solidification). La sélection du MCP idéal repose sur divers critères, tels que le coût, la chaleur latente et la conductivité thermique des phases liquide et solide, entre autres. Un exemple fréquent de MCP utilisé dans ce contexte est l'acétate de sodium tri-hydraté, qui a un point de fusion approximatif de 58°C. Ce matériau a été utilisé dans des conteneurs mobiles transportés par camion pour stocker la chaleur captée des incinérateurs d'ordures ménagères. L'énergie emmagasinée est ensuite restituée à distance vers les stations appropriées à une température avoisinant les 50 °C.

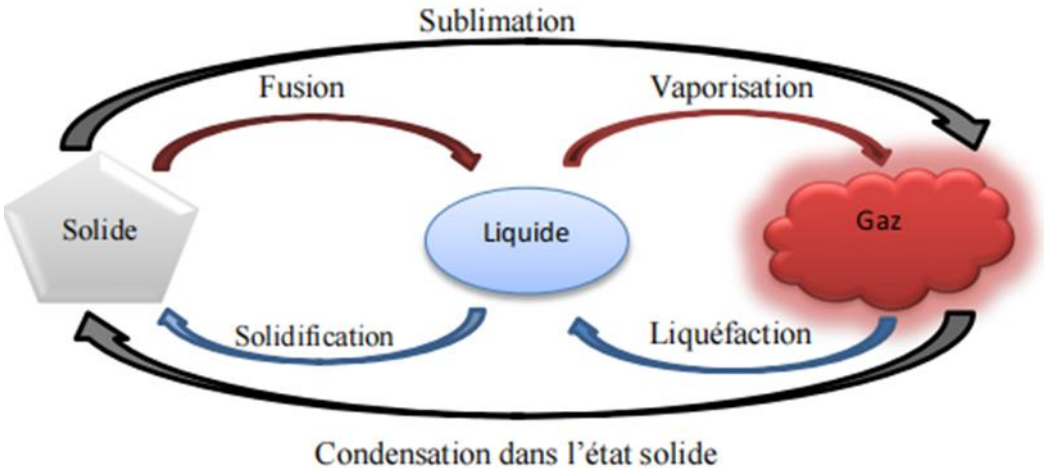


Fig. 1-10 Schéma des changements de phase (MCP) de phase (Bouzennada. 2021).

1.6.2 Isolation thermique :

L'utilisation des MCP (Matériaux à Changement de Phase) dans l'isolation est un domaine de plus en plus étudié, notamment pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments et des structures.

Application dans l'isolation :

- **Amélioration de la gestion thermique** : Les MCP absorbent l'excès de chaleur et le restituent lorsque la température baisse, maintenant une température intérieure stable.
- **Isolation thermique dynamique** : Ils régulent la température au fil du temps, réduisant ainsi la consommation d'énergie (chauffage et climatisation).

- **Utilisation dans les matériaux de construction** : Intégrés dans des panneaux isolants, enduits, ou peintures pour améliorer la performance thermique des bâtiments.

- **Réduction des coûts énergétiques** : En réduisant la dépendance aux systèmes de chauffage et de climatisation, les MCP permettent de diminuer les coûts énergétiques.

- **Applications dans les bâtiments à haute performance énergétique** : Utilisés dans les constructions écologiques ou passives pour atteindre des niveaux de performance énergétique élevés.

En résumé, l'intégration des matériaux à changement de phase dans l'isolation permet une gestion thermique plus efficace, une meilleure régulation de la température et une réduction de la consommation énergétique, contribuant ainsi à la durabilité des bâtiments.

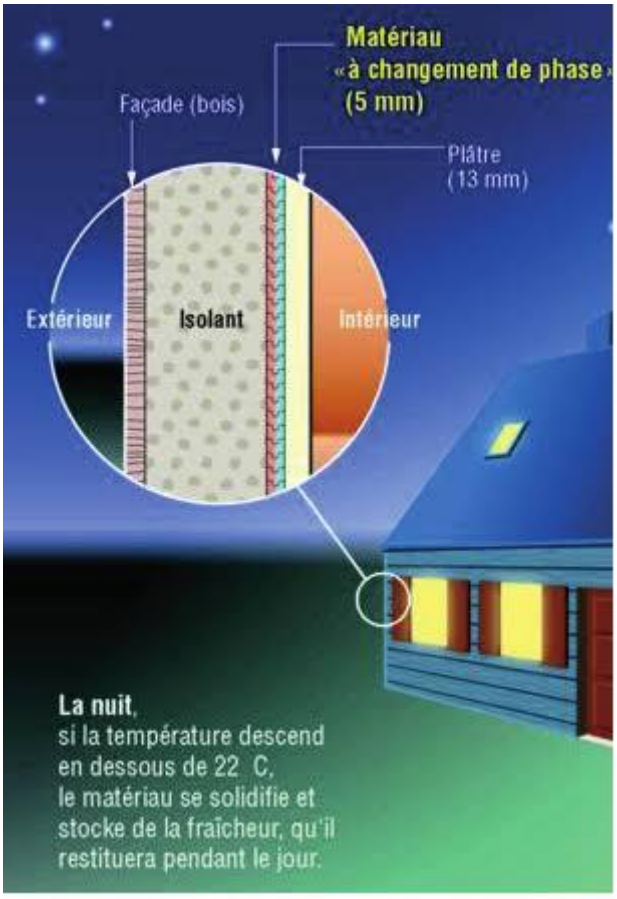


Fig. 1-11 Isolation par MCP.

Evacuation de la chaleur de la composante électrique pour éviter le risque de température :

L'évacuation de la chaleur des composants électriques est cruciale pour éviter des risques liés à la température excessive, tels que la dégradation des matériaux, la réduction de la durée de vie des

composants, voire des risques d'incendie. Parmi les solutions pour gérer efficacement la dissipation thermique dans un système électrique :

Gestion thermique avancée avec des matériaux à changement de phase (MCPs) : Certains matériaux peuvent absorber la chaleur en changeant de phase (par exemple, de solide à liquide), permettant de réguler la température pendant les périodes de forte dissipation thermique.

Cette stratégie permet de contrôler la température des composants électriques et d'éviter les risques associés à la surchauffe.

1.6.3 Transport des produits alimentaires :

Les MCPs sont employés dans le secteur agroalimentaire, pharmaceutique et médical, afin de minimiser au maximum les fluctuations de température que peuvent subir les aliments, les médicaments ou les composants sensibles, ce qui est fréquent dans le transport de produits sensibles comme le sang. Ces derniers se présentent surtout sous la forme de « petits sacs » en plastique renfermant le choix de matériau positionné au plus près du produit à préserver.

1.6.4 Application Médical :

Dans le domaine médical, l'une des principales applications concerne le transport du sang et des organes. Des récipients similaires à ceux décrits précédemment sont utilisés à cet effet. D'autres usages médicaux incluent également des coussins thermiques, chauds ou froids, destinés au traitement de la douleur localisée dans le corps.



Fig. 1-12 Récipients de transport thermique avec MCP et des organes qui contiennent MCP (BERRAHIL,2019).

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les principes fondamentaux du transfert de chaleur et les différentes méthodes de stockage thermique, en mettant particulièrement l'accent sur les Matériaux à Changement de Phase (MCP). Après avoir introduit les trois modes de transfert de chaleur — conduction, convection et rayonnement — nous avons exposé les bases théoriques nécessaires à la compréhension des phénomènes thermiques dans les systèmes énergétiques.

Nous avons ensuite exploré les trois grands types de stockage thermique : sensible, latent et thermochimique, en soulignant les avantages, les limites et les applications spécifiques de chacun. Une attention particulière a été portée aux MCP, en raison de leur capacité à stocker l'énergie de manière efficace à travers les transitions de phase, avec un bon potentiel pour les systèmes de stockage thermique à haute performance.

Enfin, une comparaison détaillée des systèmes de stockage a permis de mieux cerner leurs performances respectives et leur degré de maturité technologique. Les nombreuses applications des MCP, que ce soit dans le bâtiment, l'énergie ou l'électronique, confirment leur rôle croissant dans les solutions énergétiques durables et innovantes.

ÉTAT DE L'ART SUR LES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE.

2.1 Introduction

Dans ce chapitre bibliographique, nous présentons des exemples d'applications de stockage de chaleur dans le domaine du MCP existent déjà. Ensuite, les derniers types de MCP nous permettent d'effectuer aperçu des matériaux les plus couramment utilisés.

Kayansayan et Acar (2006), ont étudié un problème concernant un fluide circulant à l'intérieur d'un tube à ailettes horizontal, entouré d'un matériau à changement de phase (MCP). L'objectif de cette étude est de prévoir la distribution de la température et de l'interface des phases liquide-solide le long du tube et d'examiner l'impact de la densité et de la taille des ailettes (Nfn) et le débit du fluide froid (Pe) sur le rendement thermique du système, lors d'un régime d'écoulement turbulent, la présence de longues nageoires et plus denses accélère significativement le processus de solidification, entraînant un bond dans l'énergie emmagasinée, et aussi le taux de solidification augmente relativement avec l'augmentation de débit

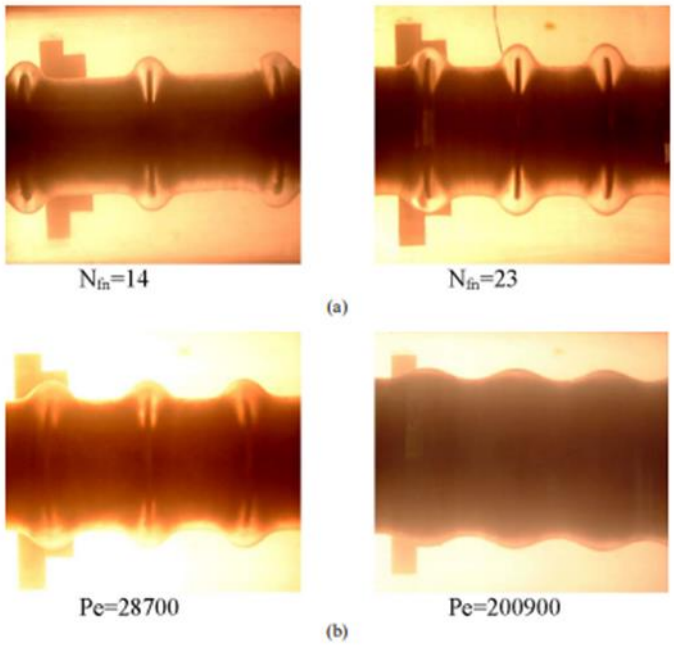


Fig. 2-1 Effet de Nfn et Pe sur la distribution de température (Kayansayan et Acar, 2006).

Shi et al (2014) ont réalisé une évaluation expérimentale des différentes configurations de matériaux à changement de phase (MCP), soit intégrés de manière externe, soit laminés et collés à l'intérieur des murs de béton, en tenant compte des températures intérieures et du taux d'humidité. Les résultats ont révélé que le modèle avec les MCP laminés dans les murs de béton offrait les meilleures performances en termes de contrôle de la température, réduisant ainsi la température maximale de 4 °C. Toutefois, le

modèle avec les MCP placés à l'intérieur des murs de béton a démontré une efficacité supérieure dans le contrôle de l'humidité, réduisant l'humidité relative de 16 % par rapport au modèle de référence.



Fig. 2-2 Structure réelle du mur en MCP (Shi et al, 2014).

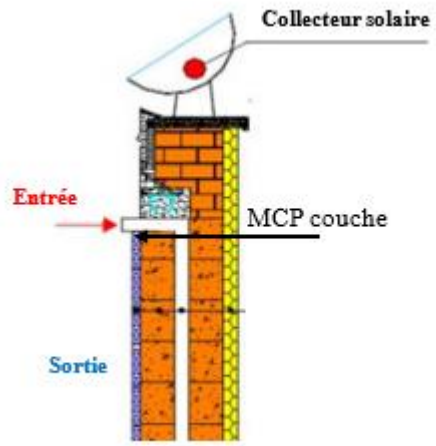


Fig. 2-3 Dessin en coupe du système (Shi et al, 2014).

Solomon et al (2015), ont aussi réalisé un travail concernant l'effet de l'air interne sur les performances du transfert de chaleur et sur le stockage d'énergie par changement de phase dans une capsule sphérique. Le cas d'un vide initial localisé au centre de la capsule a le plus haut taux de transfert de la chaleur et donc le plus court temps de fusion, une capsule avec un vide localisé au sommet a le plus long temps de fusion. En conclusion le vide central est le meilleur rendement.

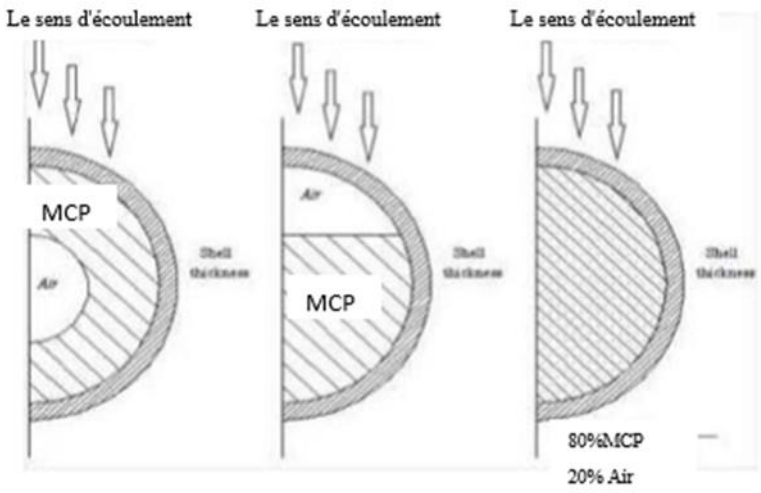


Fig. 2-4 Capsule cylindrique contenant du MCP, avec de l'air au centre et en haut (Solomon et al, 2015)

Soupart (2015), a examiné l'utilisation de Matériaux à Changement de Phase (MCP) pour le stockage de chaleur fatale industrielle. Elle explore l'amélioration des transferts thermiques à travers des échangeurs à surface augmentée. Des tests expérimentaux ont révélé des phénomènes thermiques comme la convection naturelle et la contraction volumique. Trois MCP ont été testés à température réelle, avec l'acide sébacique et l'érythritol montrant de bons résultats, tandis que le mélange de sels a été écarté. Le contrôle de la cristallisation de l'érythritol reste un défi pour son utilisation. Les résultats montrent que parmi les trois types de MCP utilisés, l'alcool de sucre donne meilleur rendement énergétique : changement de direction.

Kabbara et al (2016), ont réalisé une étude numérique visant à comprendre l'influence de la constante de zone bouillonnanteA_{mush} , sur le transfert de chaleur par changement de phase simulé avec des géométries variables (angles d'inclinaison et ajouts d'ailettes). Les résultats ont démontré que l'effet d'A_{mush} sur le taux de fusion du MCP diminue avec l'augmentation des angles d'inclinaison de l'enveloppe, lorsque l'interface de fusion est perpendiculaire à la direction de la gravité.

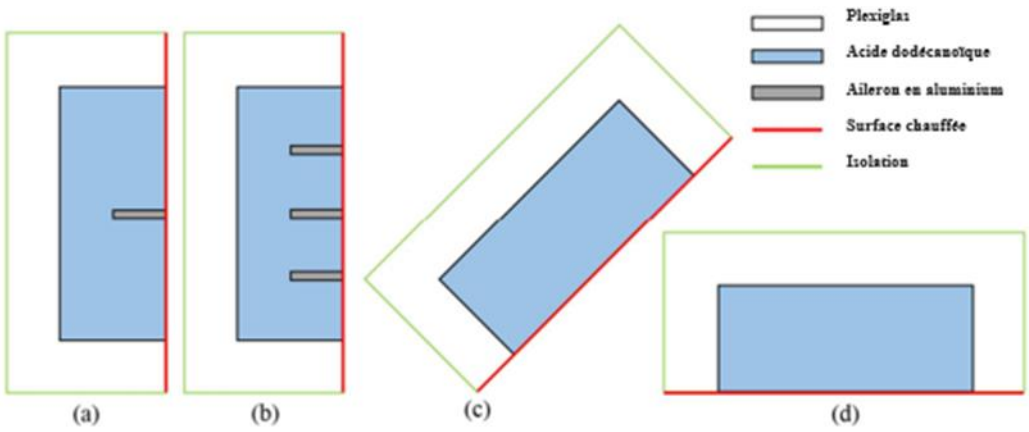


Fig. 2-5 Capsule rectangulaire remplie de MCP : a) avec 1 ailette, b) avec 3 ailettes, c) avec une inclinaison de 45°, d) avec une inclinaison de 90° (Kabbara et al, 2016)

Parsazadeh & Duan. (2018), ont fait une étude numérique porte sur une unité de stockage thermique à tube et calandre utilisant la cire de paraffine comme matériau à changement de phase (MCP). L'amélioration du transfert de chaleur est étudiée en intégrant des ailettes circulaires sur le tube du fluide caloporteur et des nanoparticules d'Al_2O_3 dans le MCP. L'analyse révèle que l'angle des ailettes et la concentration en nanoparticules influencent significativement la fusion du MCP, tandis que le pas des ailettes a peu d'effet. L'ajout de nanoparticules ralentit le processus de charge en réduisant la convection naturelle. Les résultats montrent que les angles positifs des ailettes favorisent la fusion du MCP grâce aux vorticités locales, et qu'un angle de 35° permet un temps de charge minimal.

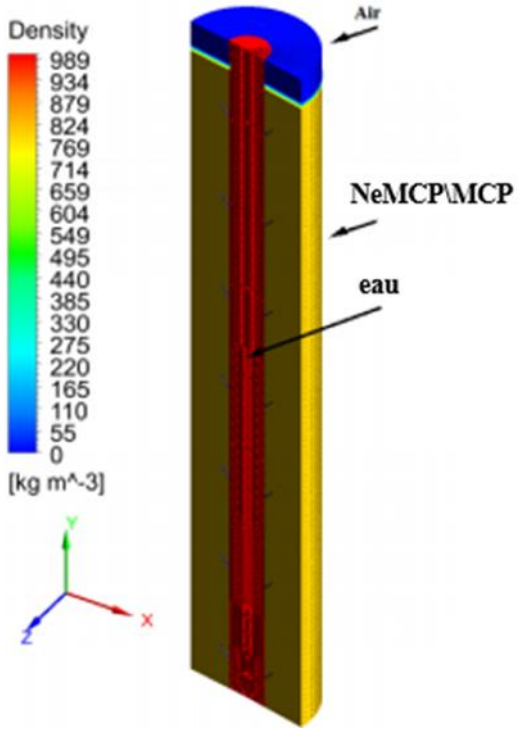


Fig. 2-6 Unité de stockage thermique à tube et calandre (Parsazadeh & Duan ,2018).

Deng et al. (2019), ont fait une étude vise à optimiser l'agencement des ailettes pour accélérer le taux de charge d'un système LHTES. Un modèle numérique basé sur la méthode des volumes finis a été développé et validé expérimentalement. Différentes configurations d'ailettes (absence, droites, inclinées, inférieures, supérieures) ont été analysées en fonction du nombre d'ailettes (N), de leur longueur (l), de la température du fluide et du matériau du tube extérieur. Il a été déterminé que l'agencement optimal dépend de N : pour $N \leq 6$, les ailettes inférieures sont les plus efficaces, tandis que pour $N > 6$, ce sont les ailettes inclinées. La capacité de stockage de chaleur des ailettes inférieures est cependant la plus faible.

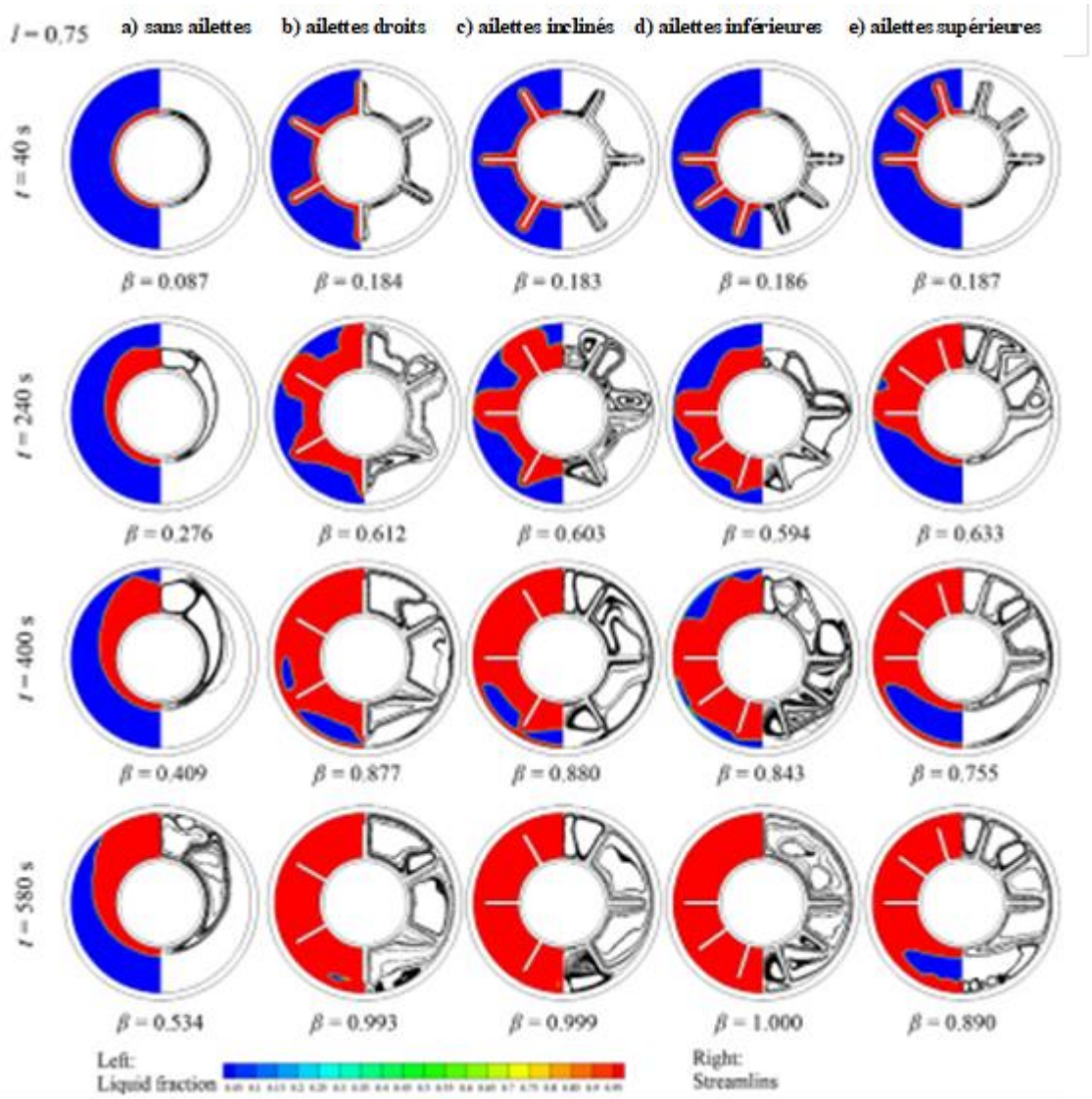


Fig. 2-7 Fraction liquide-solide (à gauche) et lignes de courant (à droite) pour chaque configuration d'ailettes à différents pas de tempes (Deng et al 2019).

Berrahil et Ahmed (2019), ont étudié la conception d'un système utilisant des matériaux à changement de phase (MCP) pour le stockage de l'énergie thermique. Plusieurs paramètres influençant le stockage sont étudiés, notamment la température d'entrée de l'eau chaude (TEC) et le débit du fluide caloporteur. De plus, l'effet de la masse de paraffine (120g et 500g) et du dosage de paraffine avec des sels (10% et 20%) est également analysé. Les résultats montrent qu'un dosage de sel à 10% améliore la conductivité thermique du mélange paraffine-sel, ce qui entraîne un gain de 37% en temps de charge à TEC = 70°C et de 43% en temps de décharge à TEC = 60°C. En revanche, un dosage de 20% de sel est

excessif, car une partie du sel ne peut pas se dissoudre complètement dans la paraffine, rendant cet ajout pratiquement inutile.

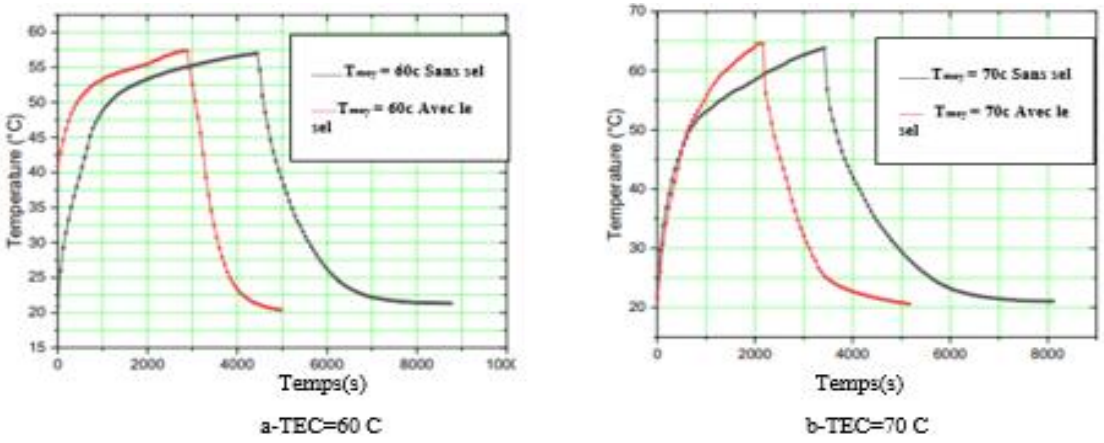


Fig. 2-8 Variation de la température pour un cas à 10 % de sel (Berrahil et Ahmed 2019).

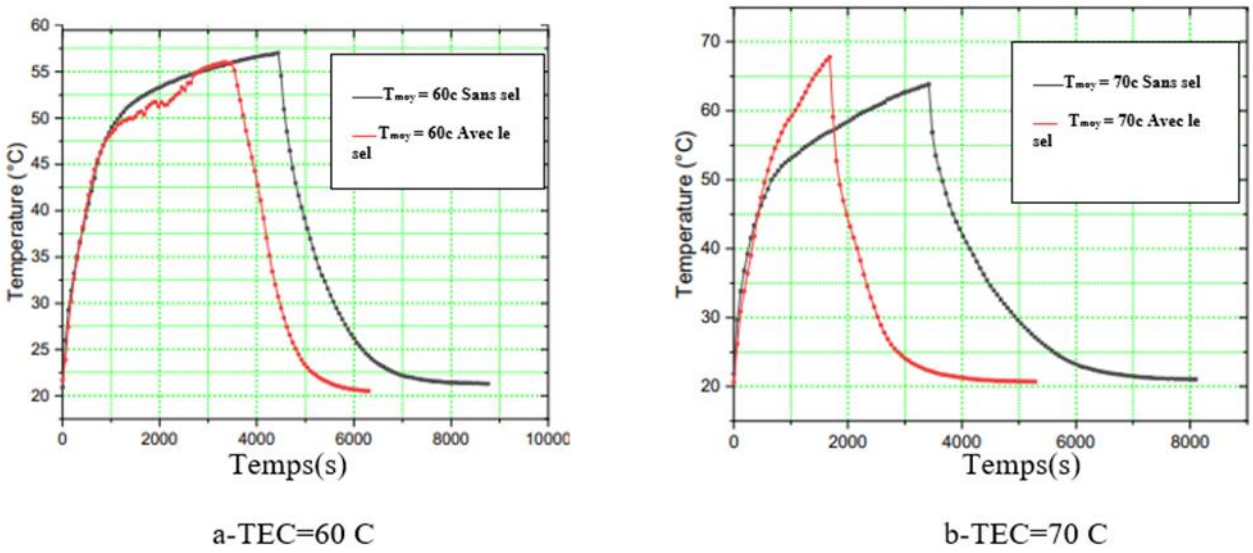


Fig. 2-9 Variation de la température pour un cas à 20 % de sel (Berrahil et Ahmed 2019).

Kok (2020), a fait une étude qui propose une nouvelle forme d'ailettes pour améliorer le taux de transfert thermique et la fusion dans les systèmes de stockage d'énergie thermique. L'étude examine d'abord le processus de fusion sans ailettes, puis introduit des ailettes conçues pour favoriser la fusion des zones non fondues. Ces ailettes sont comparées avec les types les plus utilisés dans la littérature. Les résultats montrent que le développement de ces ailettes améliore la fusion, réduit la période et les coûts du stockage d'énergie thermique. L'ajout de l'ailette 2 réduit considérablement le temps de fusion, mais l'ailette 1 est plus efficace sur le plan géométrique. L'insertion de l'ailette 1 accélère la fusion du

MCP, réduisant le temps de fusion de 63%. En d'autre part, sans l'ailette 1, le Nano-MCP fond partiellement, avec un taux de fusion de 98% pour le MCP et de 36% pour le Nano-MCP après 120 minutes.

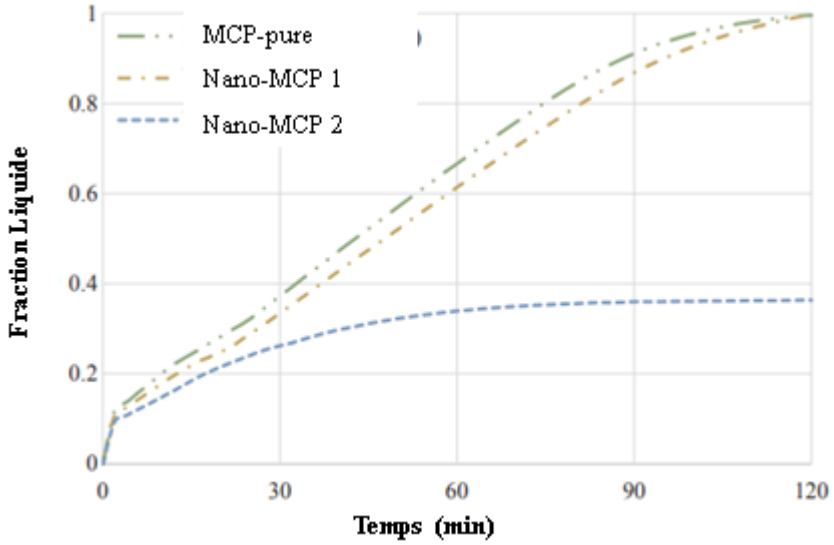


Fig. 2-10 Fraction liquide en fonction du temps. (Kok, 2020)

Desai et al (2021), ont réalisé une recherche porte sur l'unité de contrôle thermique (UCT) utilisant un matériau à changement de phase (MCP) pour réguler la température de pointe Tpk (température de risque) d'un appareil électronique. La recherche surmonte la faible conductivité thermique du MCP en intégrant des ailettes métalliques innovantes, simples à fabriquer. L'efficacité de différentes configurations d'ailettes est étudiée en fonction de leur nombre, forme, masse et section transversale. Huit configurations sont analysées, avec un focus sur les ailettes inversées novatrices, qui ont montré la meilleure performance avec une température de pointe de 331,41 K à 25 % de masse d'ailettes, soit une réduction de 9 % de la température de pointe.

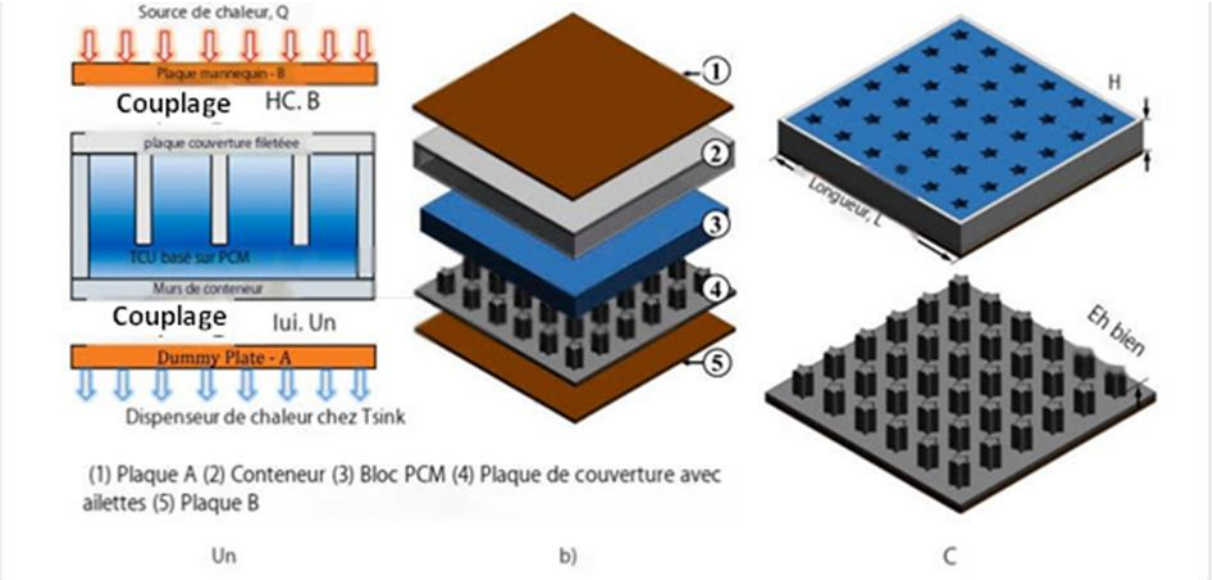


Fig. 2-11 (a) Représentation schématique du UCT avec source de chaleur, dissipateur et couplage thermique (b) vue éclatée du TCU (c) vue isométrique du conteneur avec MCP et plaque de recouvrement avec ailettes (Desai et al 2021).

Oliveski et al (2021), ont réalisé une étude numérique qui se concentre sur l'effet de l'ajout de fines pour améliorer le taux de fusion. Les résultats montrent que le temps de fusion diminue avec l'utilisation de fines.

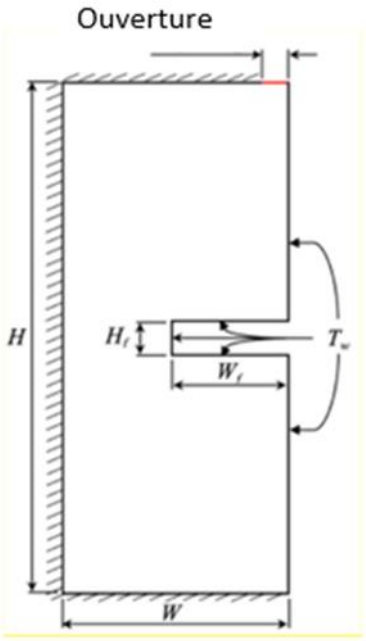


Fig. 2-12 Cavité ouverte contenant du MCP avec une ailette (Oliveski et al, 2021)

Talebizadehsardari et al (2021), ont fait une étude présente une amélioration de stockage d'un matériau à changement de phase (MCP) dans un échangeur de chaleur à plaques avec une configuration en zigzag. L'analyse focalise sur l'impact de l'angle du zigzag, débit de l'entrée et de la température moyenne du fluide caloporteur (FC). Les résultats montrent que l'augmentation de l'angle du zigzag influence peu le début de la transition de phase, mais cet effet devient plus observé avec le temps, accélérant le stockage thermique (taux de fusion). Un angle de 60° améliore le taux de stockage de 32,6 % par rapport à un angle de 30°. D'un autre point de vue, l'augmentation de la température de FC et le nombre de Reynolds accélèrent le taux de changement de phase cependant l'efficacité énergétique.

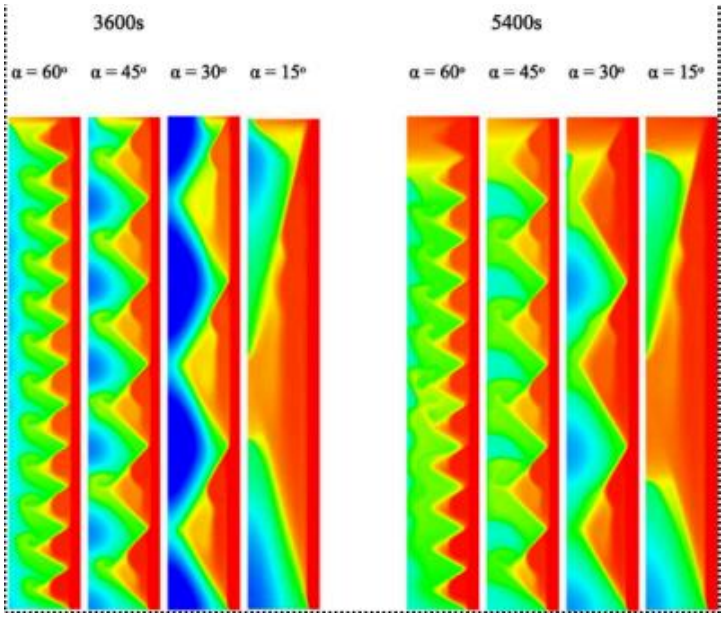


Fig. 2-13 Champs de température à différents pas de temps et des angles de configuration en zigzag lors la fusion de MCP à TFC = 50 °C (Talebizadehsardari et al 2021)

Oliveski et al (2021), ont étudié le processus de fusion de l'acide laurique (un matériau à changement de phase) à l'intérieur d'un rectangle creux contenant une ailette. La zone des ailerons a été conservée, seules les dimensions ont été modifiées et la masse du MCP a été maintenue. Afin de maintenir la capacité thermique, 9 rapports d'aspect ont été définis pour les ailettes (RAf) et 9 autres rapports de surface entre l'ailette et la cavité (ϕ). Il a été constaté qu'avec l'augmentation de la longueur des ailettes et la diminution résultante de RAf, le temps de fusion diminuait.

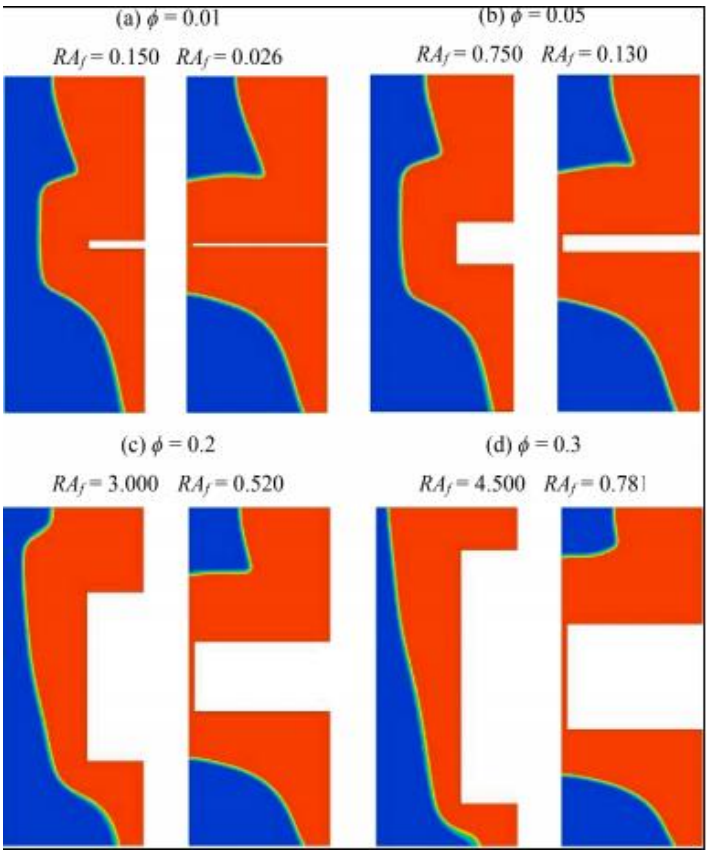


Fig. 2-14 Fraction liquide soumis à t = 50 min, Wf = 20 et 48 mm: (a) ϕ = 0.01; (b) ϕ = 0.05; (c) ϕ = 0.2 et (d) ϕ = 0.3 (Oliveski et al 2021).

Abed et al (2022), Ont fait une étude numérique examine comment l'ajout d'ailettes en arc améliore la fusion des matériaux à changement de phase (MCP) dans un système triplex. Les ailettes arquées, avec différentes orientations et angles, montrent une meilleure efficacité thermique que les ailettes rectangulaires ou l'absence d'ailettes. Une disposition décalée des ailettes optimise davantage la fusion, contrairement à l'ajout d'une ailette supplémentaire en bas, qui a un effet négatif. L'augmentation du nombre de Reynolds réduit le temps de charge et améliore la capacité de stockage thermique. En d'autre part, une température plus élevée du fluide ralentit le processus de chargement.

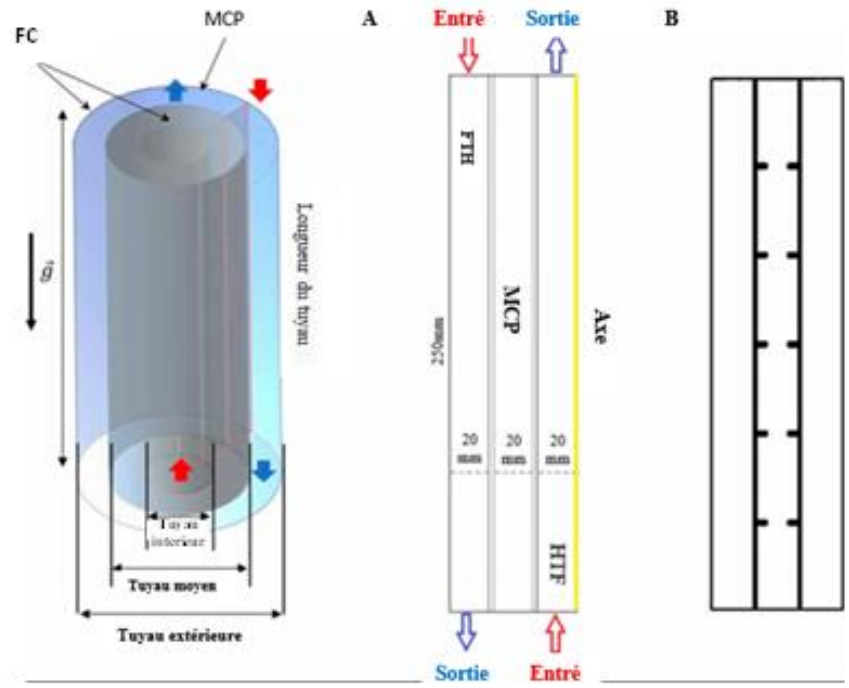


Fig. 2-15 Schéma d'un échangeur de chaleur à tubes triplex (A) sans ailette et (B) avec ailettes uniformes (Abed et al 2022).

Moein-Jahromi et al (2023), ont étudié de nouvelles conceptions de dissipateurs thermiques à matériaux à changement de phase dans le photovoltaïque central, présentant des géométries trapézoïdales (deux épaisseurs différentes) et en zigzag, ainsi que deux traitements. Un dissipateur thermique trapézoïdal avec deux petites ailettes triangulaires améliore notablement les performances d'un système photovoltaïque concentré par rapport à un dissipateur rectangulaire simple. Il réduit la température moyenne de 22 °C, divise par deux le temps de fusion du matériau à changement de phase, augmente la chaleur absorbée et le rendement énergétique. Ses performances sont comparables à celles d'un dissipateur rectangulaire à quatre longues ailettes, mais avec un coût en cuivre réduit de 74,3 %.

Asadi et al (2024), ont fait une étude examine quatre cas avec différents pourcentages de nanoparticules dans un MCP. Les résultats montrent que l'incorporation de 30% de nanoparticules augmente la conductivité thermique et l'efficacité du transfert de chaleur. L'utilisation de 20% de nanoparticules entraîne un taux de fusion de 7,41%, contre 3,85% avec 10%. Le recours aux nanoparticules dans le MCP peut conduire à une fusion accélérée et plus efficace, résultant en une amélioration du stockage d'énergie et des performances en matière de refroidissement.

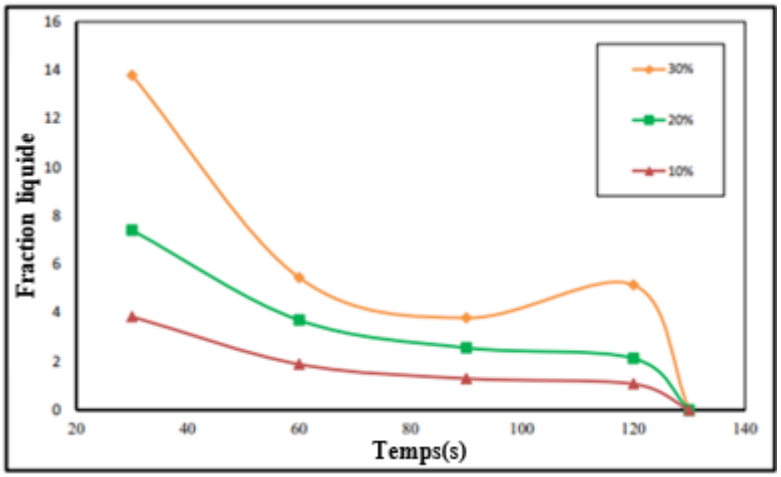


Fig. 2-16 variation de la fraction de fusion (Asadi et al 2024).

Mecieb & Laouedj 2024, ont étudié l'amélioration du transfert de chaleur dans les systèmes de stockage d'énergie thermique latente, dans un conteneur rectangulaire contenant des ailettes de différentes géométries (longueur et emplacement). Les résultats montrent que l'utilisation stratégique d'ailettes favorise grandement l'efficacité du transfert thermique, diminuant le temps de fusion total de plus de 50 % en comparaison à une disposition d'ailettes de longueur uniforme. Cette amélioration est due à l'accroissement du transfert thermique convectif facilité par une ailette plus longue dans la zone inférieure de l'appareil.

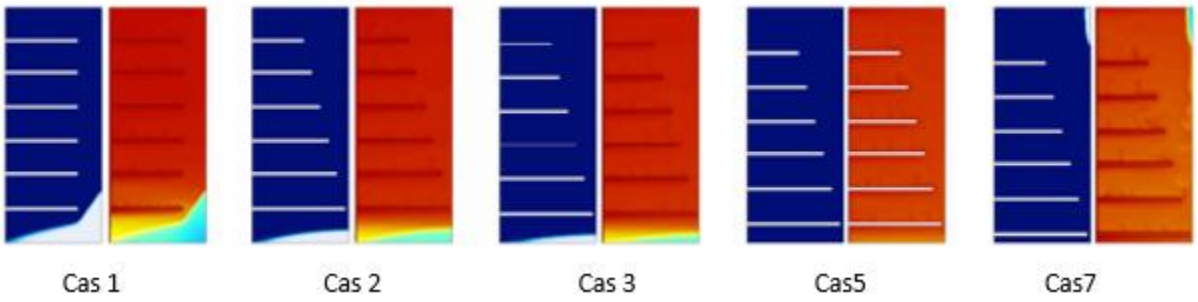


Fig. 2-17 Fraction liquide et de température des cas 1, 2, 3, 5 et 7(Mecieb & Laouedj 2024)

Ce chapitre vise à clarifier les études précédentes et comment utiliser MCP, dans le chapitre suivant nous parlons d'un modèle mathématique destiné aux problèmes associés aux phénomènes de transfert de chaleur lors changement de phase.

MODELE MATHEMATIZUE.

3.1 Introduction

Cette partie offre une modélisation mathématique s'appuyant sur diverses techniques, assurant ainsi que chaque technique est illustrée et décrite de manière précise

Il existe de nombreuses techniques, mais l'une en particulier est reconnue pour sa cohérence et sa précision simultanées, et elle est largement utilisée dans l'étude des phénomènes de transfert thermique lors de transitions de phase. C'est la technique de l'enthalpie-porosité.

En raison du coût et de la complexité, nous allons nous limiter à une version 2D du modèle. Le modèle mathématique s'appuie sur le schéma de Voller et Prakash, qui intègre et fusionne les équations de conservation de masse, de mouvement et d'énergie. De plus, il fait appel à la méthode « Enthalpie-Porosité » qui se base sur l'approche du maillage fixe pour déterminer les phases solide, pâteuse et liquide.

3.2 Considérations générales et modèle mathématique

Principe de la méthode d'enthalpie-porosité

Ce modèle s'inspire de celui proposé par Voller et Prakash (Voller et Prakash, 1987), qui fusionnent les équations de transfert thermique et de mouvement dans leur version générale, conformément aux recommandations de Patankar (Patankar, 2018). Ce modèle permet de traiter la solidification et la fusion des matériaux à changement de phase (MCP), en établissant les champs dynamique et thermique à l'intérieur de ces matériaux. En générale, le modèle de Voller et Prakash caractérise le domaine physique en tant que substance poreuse, où la porosité est symbolisée par f_l.

Observation 3.1 : Dans un milieu poreux, il faut considérer le même fractionnement pour la phase liquide (Laidaoui, 2017). Elle prend en compte les valeurs à l'état liquide (Si $T > T_l$), solide (Si $T < T_s$), et dans la zone pâteuse (Si $T_s < T \leq T_l$).

Dans le modèle actuelle, la résolution du problème de transfert thermique se fonde sur un outil numérique basé sur l'enthalpie, présenté comme suit :

$$H = h + \Delta H = c_p T + f(T) \tag{3-1}$$

Où H représente l'enthalpie totale (quantité spécifique). Dans l'équation (3-1), on suppose que la chaleur (enthalpie) sensible, h, varie durant le processus de solidification et/ou fusion est supposée être

$h = c_p T$ (où Cp représente la capacité thermique spécifique du milieu). De plus, l'étendue de la perturbation et du mélange qui se produisent dans la zone pâteuse lors des phases avancées du processus de transition de phase (solidification ou fusion) nécessite que l'on puisse déterminer l'énergie thermique latente ΔH puisse être déterminée en fonction de la température, T, telle que $\Delta H = f(T)$. On peut également définir la chaleur latente de changement d'état en référence à la proportion de liquide dans le milieu poreux, comme suit :$\Delta H = f(T) = f_l L_f = f_l(T) L_f$ où représente la chaleur latente de fusion du matériau.

$$f_l = f_l(T) = 1 - f_s(T) = \begin{cases} 1 & \text{Si} \quad T > T_l \\ f_l & \text{Si} \quad T_s < T \leq T_l \\ 0 & \text{Si} \quad T < T_s \end{cases} \tag{3-2a}$$

Qui peut s'écrire :

$$f_l(T) = 1 - f_s(T) = \begin{cases} 1 & \text{Si} \quad T > T_l \\ \frac{(T - T_s)}{(T_l - T_s)} & \text{Si} \quad T_s < T \leq T_l \\ 0 & \text{Si} \quad T < T_s \end{cases} \tag{3-2b}$$

Où T_l symbolise la température de la masse en fusion au début du processus de solidification, et T_s représente la température du solide à la fin du processus de solidification et f_s représente la fraction massique sous forme solide.

L'équation (3-2b) peut être formulée en fonction de la température de fusion, T_f, de la manière suivante :

$$f_l(T) = 1 - f_s(T) = \begin{cases} 1 & \text{Si} \quad T > T_f + dT \\ \frac{[T - T_f + dT]}{2dT} & \text{Si} \quad (T_f - dT) < T \leq (T_f + dT) \\ 0 & \text{Si} \quad T < T_f - dT \end{cases} \tag{3-3}$$

L'expression (3-3) est la forme *linéaire* de f_l.

Dans cette expression $T_s = T_f - dT$ et $T_l = T_f + dT$ où dT est la valeur moyenne de la température de transition (avec $dT = \frac{(T_l - T_s)}{2}$) et la T_f température de 5fusion.

La forme simplifiée, peut être écrite comme suit :

$$f_l(T) = 1 - f_s(T) = \begin{cases} 1 & \text{Si} \quad T > T_l \\ \frac{T - T_s}{2dT} & \text{Si} \quad T_s \leq T \leq T_l \\ 0 & \text{Si} \quad T < T_s \end{cases} \tag{3-4}$$

3.3 Les équations gouvernantes

En coordonnées cartésiennes (2D) :

Conservation de masse

$$\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{x}} + \frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{y}} = 0 \qquad (3\text{-}5)$$

Conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial \rho \mathrm{u}}{\partial \mathrm{t}} + \mathrm{u}\frac{\partial \rho \mathrm{u}}{\partial \mathrm{x}} + \mathrm{v}\frac{\partial \rho \mathrm{u}}{\partial \mathrm{y}} = -\frac{\partial \mathrm{p}}{\partial \mathrm{x}} + \mu\left[\frac{\partial^2 \mathrm{u}}{\partial \mathrm{x}^2} + \frac{\partial^2 \mathrm{u}}{\partial \mathrm{y}^2}\right] + \mathrm{F_a} \qquad (3\text{-}6a)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + u\frac{\partial \rho v}{\partial x} + v\frac{\partial \rho v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu\left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right] + F_b + F_g \qquad (3\text{-}6b)$$

Équation de conservation d'énergie

Pour le problème physique, l'équation de conservation de l'énergie peut être exprimée en termes d'enthalpie *sensible* telle que :

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + u\frac{\partial \rho h}{\partial x} + v\frac{\partial \rho h}{\partial y} = \frac{k}{c_p}\left[\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2}\right] - S_h \qquad (3\text{-}7a)$$

$$\text{Ou } \frac{\partial \rho T}{\partial t} + u\frac{\partial \rho T}{\partial x} + v\frac{\partial \rho T}{\partial y} = \frac{k}{c_p}\left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right] - S_h \qquad (3\text{-}7b)$$

Où ρ est la masse volumique, p représente la pression et μ est la viscosité dynamique du liquide, F_a, F_b et F_g représentent les termes sources qui pourraient être illustrés comme suit :

Expressions pour les termes sources F_a et F_b

$$F_a = Au, \text{ et } F_b = Av \qquad (3\text{-}8)$$

- Où A est une fonction associée à chaque zone du changement de phase (liquide, zone pâteuse ou solide). La fonction A est capable de faire des distinctions dans les scénarios suivants :
  • Si $0 < A < 1$ les équations de dynamique se rapprochent de la zone pâteuse « zone poreuse ».
  • Si $A = 0$, c'est le cas $F_a = 0$ et $F_b = 0$, cela signifie que les vitesses sont réelles, indiquant l'absence de toute forme de milieu poreux (zone liquide).
  • Si $A = 1$ cela signifie que tous les termes de l'équation tendent vers zéro (phase solide).
  La formulation de la fonction peut être déduite de l'équation de Carman-Kozeny (Carman, 1937) comme suit :

$$A = \frac{-C(1-f_l)^2}{(f_l^3+q)} \quad (3\text{-}9)$$

Dans ce travail, la valeur du paramètre C, qui est tributaire de la morphologie du milieu poreux, sera choisie dans l'intervalle $C = 10^5 \ \frac{\text{kg}}{m^3 s}$ et $C = 10^6 \ \frac{\text{kg}}{m^3 s}$ (Shmueli et al. 2010, Assis et al. 2009, Bondareva et al. 2018)(dans notre travail $C = 10^5 \ \frac{\text{kg}}{m^3 s}$). De plus, q est une constante employée pour prévenir l'erreur flottante ou la division par zéro (dans les calculs présentés, on a choisi de fixer à 0,001) (Al-Abidi et al. 2013).

Expressions pour le terme source F_g

Durant la phase liquide (où le matériau est fondu), le matériau en fusion se déplace à cause de la variation de sa densité due à la fusion. Ce mouvement, connu sous le nom de « convection naturelle », est provoqué par la force de flottabilité. Le terme source F_g est utilisé pour définir cette force comme suit.

$$F_g = \rho\beta g(T - T_f) \quad (3\text{-}10)$$

Où β est le coefficient de dilatation thermique du matériau liquide et g représente la gravité.

Expressions pour les termes sources S_h

Où S_h représente le terme source de l'équation de conservation de l'énergie. Ce terme est défini comme : $S_h = \frac{\partial(\rho\Delta H)}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho\,\mathbf{u}\,\Delta H) = \frac{\partial(\rho\Delta H)}{\partial t} + \mathbf{u}\cdot\nabla(\rho\Delta H)$ (3-11)

Cette expression découle de la formule d'enthalpie pour le problème de transition de phase de type convection-diffusion (Voller et al. 1987). Dans un système de coordonnées cartésiennes, l'équation (3-11) se traduit par :

$$S_h = \frac{\partial(\rho f_l L_f)}{\partial t} + u\frac{\partial(\rho f_l L_f)}{\partial x} + v\frac{\partial(\rho f_l L_f)}{\partial y} \quad \text{En 2D} \quad (3\text{-}12)$$

N'oublions pas que l'enthalpie totale, H, est définie comme $H = c_p T + f_l L_f$ (voir l'équation (3-1)), où

$$H = \Delta h_{ref} + h + f_l L_f \quad (3\text{-}13)$$

Ici L_f désigne la chaleur latente de fusion du matériau, Δh_{ref} est l'enthalpie de formation du matériau à la température standard ($T_{ref} = 25°C$), manifestement nulle, et l'enthalpie sensible (définie comme $h = \int_{T_{ref}}^{T} c_p\, dT$ est présumée être $h \approx c_p T$.

Expressions de la chaleur spécifique à pression constante « cp » :

Donnée par : $c_p(T) = c_{ps} + (c_{pl} - c_{ps})f_l(T) + L_f\eta(T)$ (3-14)

Où :

c_{ps} : la valeur de chaleur spécifique de phase solide

c_{pl} : la valeur de chaleur spécifique de phase liquide

Et η est une formule qui varie en fonction de la température, pouvant être dérivée de la courbe de Gauss et exprimée par :

$$\eta = \frac{e^{\left(\frac{-(T-T_f)^2}{dT^2}\right)}}{(dT\sqrt{\pi})}. \quad (3\text{-}15)$$

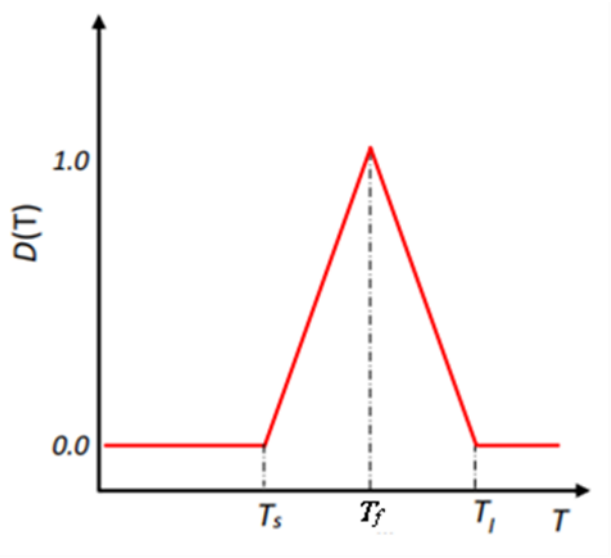


Fig. 3-1Variation de la courbe de Gauss (BOUZENNADA ,2021)

Expressions de la* masse volumique ρ *:

$\rho(T) = \rho_s + (\rho_l - \rho_s)f_l(T)$ (3-16)

ρ_s : la valeur de masse volumique de phase solide.

ρ_l : la valeur de masse volumique de phase liquide.

Expressions de la* conductivité thermique *k* *:

$$k(T) = k_s + (k_l - k_s)f_l(T) \quad (3\text{-}17)$$

k_s: la valeur de conductivité thermique de phase solide.

k_l: la valeur de conductivité thermique de phase liquide.

Expressions de nombre du Nusselt :

$$|Nu| = \frac{hL}{k} = \frac{\phi L}{(T - T_l)\,k} \tag{3-18}$$

$$\overline{|Nu|} = \frac{1}{L}\int_0^L Nu\, dy \tag{3-19}$$

ϕ : densité de flux [w/m2]

L : la langueur caractéristique (dans notre cas est la langueur du cavité) [m]

h : Coefficient de change convective : $\frac{\phi}{(T - T_l)}$

Energie thermique stockée *:*

$$Q = \begin{cases} \iiint_v f_l(\rho_l\, cp_l\,(T - T_f)dv + \rho_l L_f) & si(T \geq T_f) \\ \iiint_v (1 - f_l)(\rho_s\, cp_s\,(T - T_{in})dv) & si(T \leq T_f) \end{cases} \tag{3-20}$$

Les études dans ce travail sont basées sur la méthode enthalpie-porosité en utilisant les hypothèses suivantes :

- ✓ Le liquide est un fluide incompressible.
- ✓ Le liquide est un fluide newtonien.
- ✓ Les études sont des configurations 2D en régime laminaire.

Les équations présentées ci-dessus représentent le modèle physique du système étudié, qui peuvent être résolues numériquement à l'aide de logiciels spécialisés. Parmi ces outils, le logiciel COMSOL Multiphysics constitue une solution puissante permettant la simulation de systèmes multiphysiques. Il offre un environnement intégré pour la résolution de ce type d'équations en utilisant la méthode des éléments finis (MEF). Ainsi, les équations étudiées dans ce mémoire peuvent être résolues à l'aide de COMSOL afin d'obtenir des résultats numériques précis venant appuyer l'analyse théorique.

3.4 Introduction sur COMSOL Multiphysics :

COMSOL (COMputational SOLutions) Multiphysics est un logiciel avancé de simulation numérique utilisé pour résoudre des problèmes physiques complexes grâce à la méthode des éléments finis (MEF). Il se distingue par sa capacité à traiter des phénomènes multiphysiques, permettant ainsi d'analyser l'interaction entre plusieurs domaines physiques, tels que la mécanique, la thermique, l'électromagnétisme, le transfert de chaleur et la chimie appliquée.

Points forts de COMSOL Multiphysics

1. ***Une plateforme de simulation multiphysique intégrée***

- Permet la modélisation et l'analyse simultanées de plusieurs phénomènes physiques.
- Idéal pour simuler des interactions complexes telles que les contraintes thermiques dans COMputational SOLutions les matériaux, les effets des champs magnétiques sur les conducteurs ou les réactions chimiques en milieu fluide.

2. **Une interface graphique intuitive et flexible**

- Facilite la création de modèles sans nécessiter une expertise avancée en programmation.
- Propose des visualisations détaillées des résultats sous forme de graphiques 2D et 3D ainsi que des tableaux de données numériques.

3. **Large éventail d'applications**

- **Ingénierie électrique** : simulation de moteurs, transformateurs, champs électromagnétiques.
- **Ingénierie mécanique** : analyse des contraintes, mécanique des structures, dynamique des fluides.
- **Ingénierie thermique** : étude du transfert de chaleur, conception de systèmes de refroidissement et de chauffage.
- **Ingénierie chimique** : modélisation des réactions chimiques et du transport de matière.

Domaines d'application de COMSOL Multiphysics

Grâce à sa flexibilité et sa puissance, COMSOL est utilisé dans divers secteurs :

- **Recherche scientifique** : simulation de phénomènes physiques et validation expérimentale.
- **Industrie et ingénierie** : amélioration du design et optimisation des performances des produits.
- **Énergies renouvelables** : modélisation des cellules photovoltaïques, turbines éoliennes et autres technologies vertes.
- **Sciences biomédicales** : analyse des matériaux biologiques et des dispositifs médicaux.



Fig. 3-2 Interface du logiciel COMSOL

Au final, ces modèles mathématiques doivent être utilisés pour faciliter la compréhension et la maîtrise adéquate du phénomène en question. Constituent une base essentielle pour appréhender avec précision le comportement thermique du système étudié, en particulier dans le contexte complexe des changements de phase La méthode enthalpie-porosité est connue pour sa robustesse, ce qui explique son utilisation fréquente dans de nombreuses recherches, en tant qu'outil efficace impliqué dans les études concernant le phénomène de transfert thermique lors des changements d'état. Dans le chapitre suivant, nous illustrerons les résultats obtenus à partir du modèle mathématique et des simulations sous COMSOL.

Résultats et discussion

4.1 Introduction

Ce chapitre présente une analyse détaillée des résultats numériques obtenus à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics, dans le cadre de l'étude de la fusion d'un matériau à changement de phase (RT-27), remplissant une cavité rectangulaire comportant un mur chauffant en cuivre. L'objectif principal est de comprendre le comportement thermique et fluidique du système soumis à un chauffage par convection naturelle, et d'évaluer l'influence de différentes configurations géométriques, notamment l'ajout d'ailettes, sur l'efficacité du processus de fusion.

Les résultats sont illustrés à travers les champs de température, de vitesse et de fraction liquide, à différents instants caractéristiques du processus de fusion. Ces visualisations permettent de suivre l'évolution thermique et la dynamique du fluide au sein du domaine contenant le MCP.

Afin d'approfondir l'analyse et de quantifier les performances thermiques du système, ce chapitre inclut également l'étude :

Du nombre de Nusselt, en tant qu'indicateur de l'intensité du transfert thermique par convection par rapport à la conduction,

Ainsi que de l'énergie thermique échangée ou stockée dans le domaine au cours du temps.

Ces indicateurs permettront de comparer l'efficacité des différentes configurations, et de mettre en évidence le rôle des ailettes dans l'amélioration du transfert de chaleur et l'optimisation de la fusion du MCP.

4.2 Considérations générales

Nous allons étudier ici numériquement le processus de fusion d'un MCP dans un rectangle illustré à la figure 4-1. La capsule est régie par les conditions aux limites spécifiées sur la figure. Les propriétés thermophysiques du MCP et le cuivre sont adressés dans le tableau 4-1 :

La hauteur de l'ailette dans le cas B est égale à 6 cm, la valeur a été réduite par deux puis par quatre pour devenir pour le cas C : 3 cm, et pour le cas D : 1,5 cm.

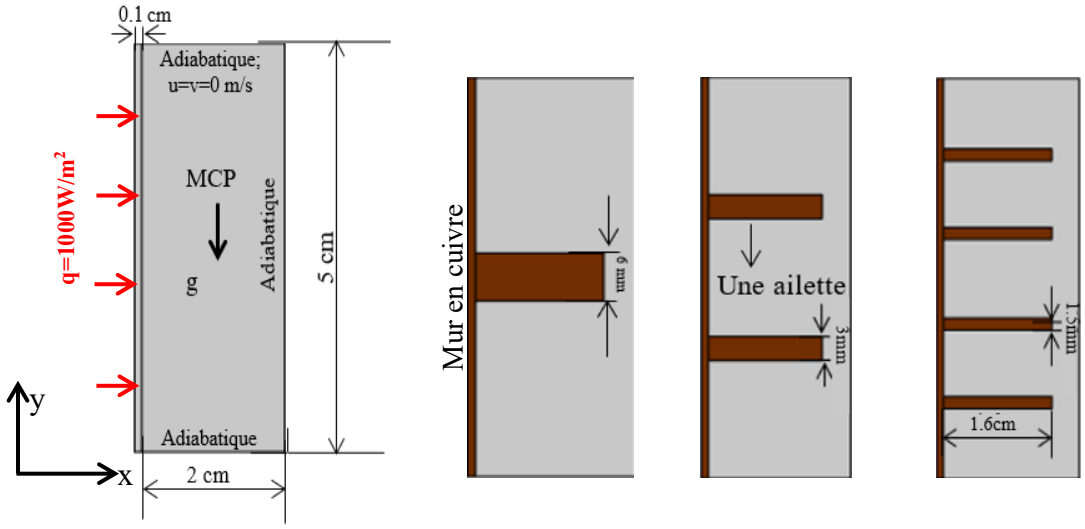


Fig. 4-1 Schéma du domaine de calcul et des conditions aux limites.

Tableau 4- 1 Propriétés thermophysiques de MCP utilisé et du cuivre (solide).

Propriété	**RT-27 (MCP)**	**Cuivre**
Température de fusion, T_f, (K)	301,2	
Masse volumique (Solide), ρ_s (kg/m^3)	814	8960
Masse volumique (Liquide), ρ_l (kg/m^3)	770	
Chaleur spécifique (Solide), Cp_s (J/kg K)	1900	385
Chaleur spécifique (Liquide), Cp_l (J/kg K)	2200	
Conductivité thermique (Solide), k_s (W/m K)	0.39	401
Conductivité thermique (Liquide), k_l (W/m K)	0.157	
Viscosité dynamique, μ, (Pa. s)	3,8 10^{-3}	
Coefficient dilatation thermique, β, (1/K)	8,5 10^{-4}	
Chaleur latente, ΔH = 241 kJ/kg, Température de transition, dT = 2 K et Température Initiale T_{in} = 300,2 K		

4.3 Résultats et discussion

Maillage

Le changement de phase lors de la convection dépend des équations de transport de quantité de mouvement et d'énergie, Le choix du maillage de calcul est important pour trouver une solution numérique adaptée.

La présente étude est réalisée à l'aide du programme de calcule COMSOL-MULTYPHYSICS, quatre maillages computationnels ont été créés, comme illustré à la **Fig 4-2**, avec un nombre croissant d'éléments. Les maillages **Normale**, **Fin**, **Plus fin**, et **Extra fin** contenaient respectivement **3263**, **5602**, **14249** et **35909** éléments.

D'après la courbe de la fraction liquide (voir Fig 4-3a), le maillage « Extra fin » montre la meilleure précision. Cependant, le maillage « Plus Fin » donne les mêmes résultats, il est donc choisi pour réduire le temps de calcul.

Procédure de solution

COMSOL MULTIPHYSICS utilise essentiellement des méthodes basées sur les éléments finis pour résoudre les équations gouvernantes. L'outil principalement utilisé est un solveur non linéaire dépendant du temps, fonctionnant sous un schéma d'itération newtonienne constante (6 itérations par pas de temps, avec un facteur d'amortissement fixé à 0,9).

La méthode d'Euler implicite (schéma de formule de différenciation rétrograde) est utilisée comme méthode d'intégration temporelle (l'ordre rétrograde est compris entre 1 et 2).

Dans COMSOL, le pas de temps est choisi automatiquement afin de respecter la tolérance d'erreur définie. De plus, la valeur « 0,001 » est utilisée comme tolérance.

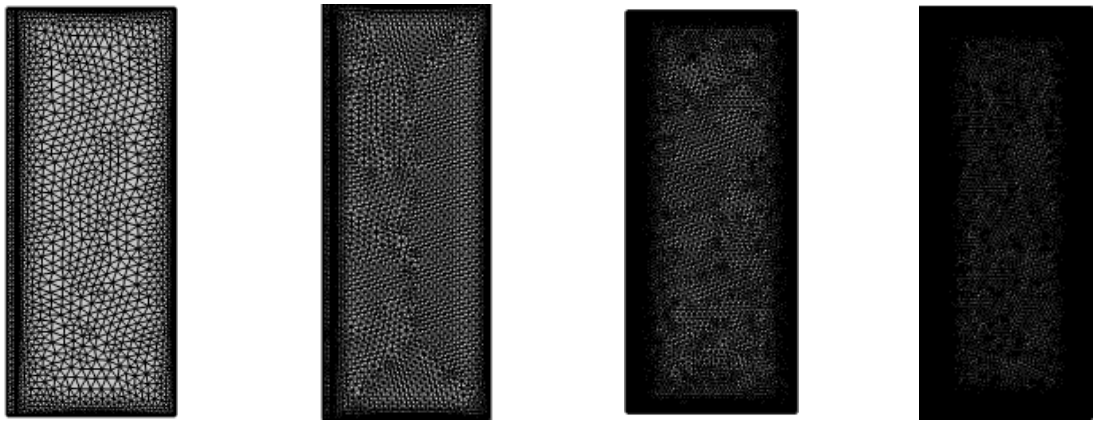


Fig. 4-2 Schéma du maillage.

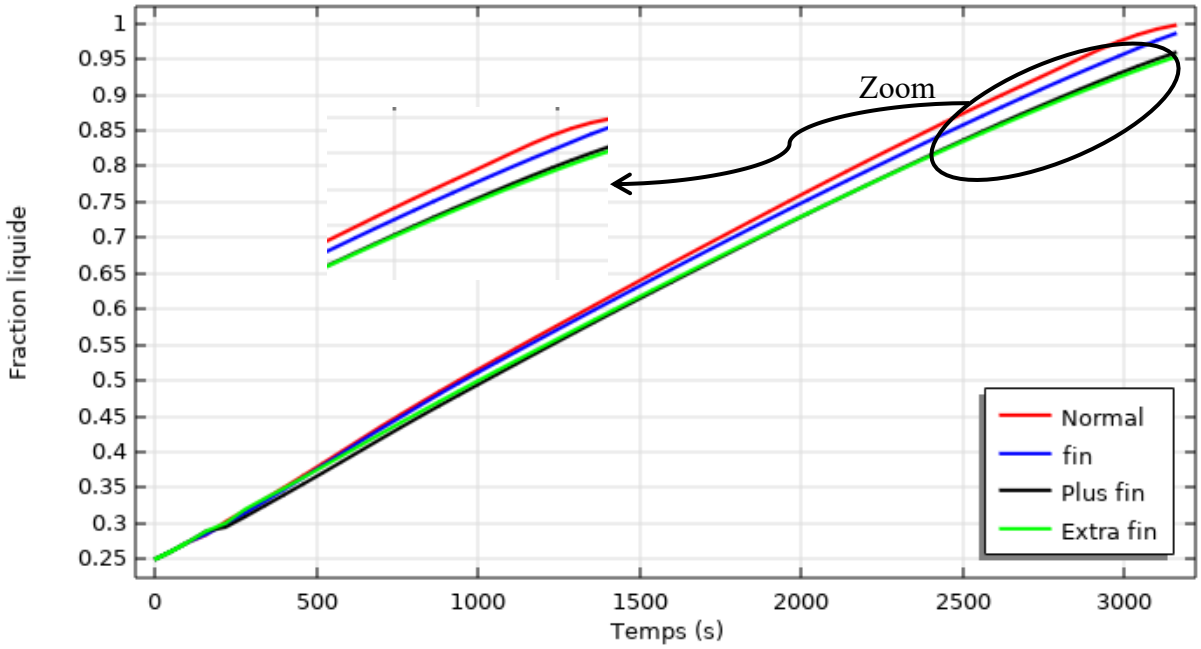


Fig. 4-3 la fraction liquide en différents maillages.

Vérification du modèle

La figure **4-3b** présente une comparaison entre l'évolution de la fraction liquide en fonction du temps pour le modèle de calcul actuel et les résultats de Darzi et al. (2012). Les auteurs ont utilisé le logiciel FLUENT pour simuler le processus de fusion dans une enceinte composée de deux cylindres coaxiaux remplie d'un matériau à changement de phase, où le cylindre extérieur était adiabatique et le cylindre intérieur maintenu à une température de T = 329,15 K. De plus, la température initiale du MCP était sous-refroidie d'un degré par rapport à sa température de fusion, soit à 308,15 K. Les diamètres des cylindres extérieur et intérieur étaient respectivement de 40 mm et 20 mm. En général, la comparaison montre une homogénéité entre les deux courbes, ce qui prouve l'efficacité du modèle utilisé.

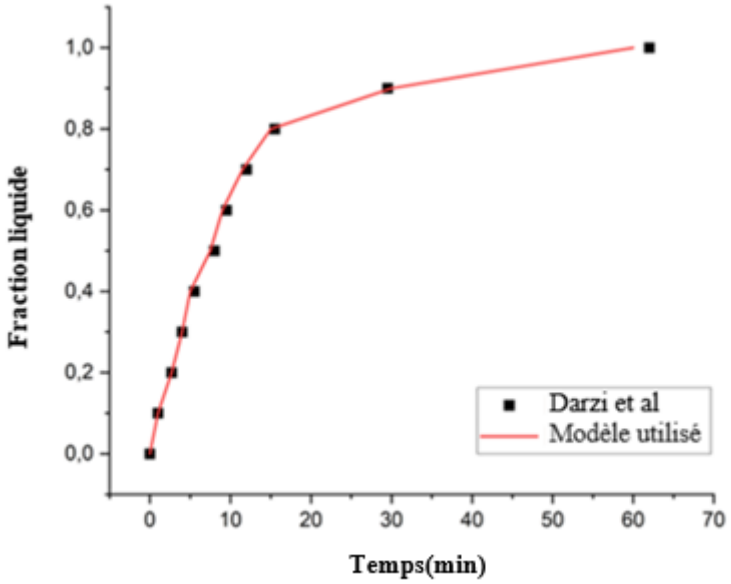


Fig. 4-4 Évolution de la fraction liquide du modèle utilisé par rapport au travail de Darzi et al. (2012)

Dans cette section la figure de la fraction liquide, de température et de vitesse seront expliqués pour A) un simple rectangle + mure de cuivre et le cas A avec : B) une ailette C) deux ailettes D) quatre ailettes. Comme le montre les figures 4-4,6,7 les ratios sont affichés à des intervalles de temps spécifiques.

Champ de fraction liquide

La figure de fraction liquide pour le cas A) à l'instant t=400 s montre une courbure entre le solide et le liquide avec une augmentation du pourcentage de solidification.

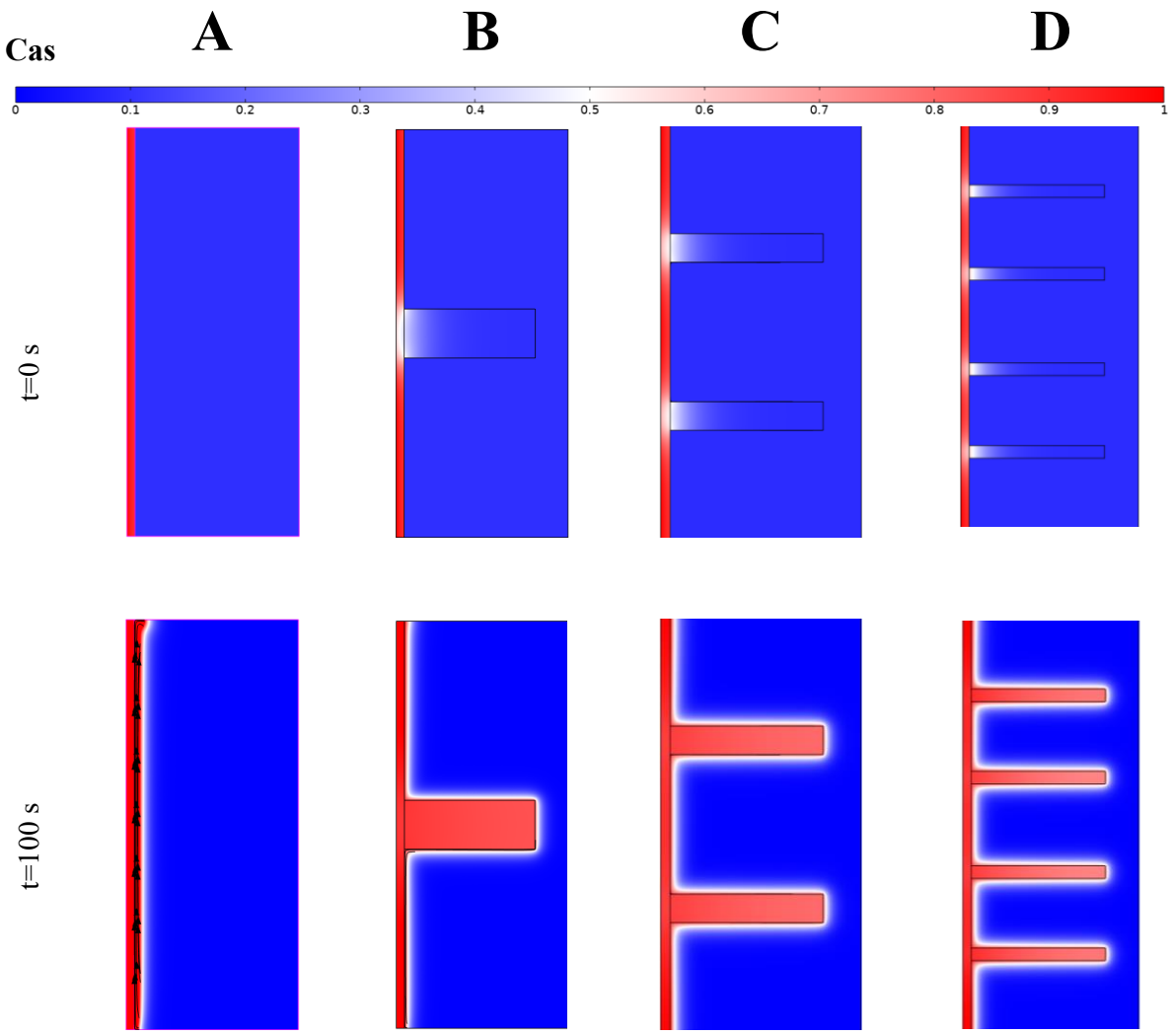
C'est dû à l'amplification de la convection naturelle. Effectivement, le processus de convection naturelle libre opère sur la base d'un gradient de densité : le MCP liquéfié (liquide) à proximité de l'absorbeur en cuivre capte la chaleur, se réchauffe au fur et à mesure que sa densité se réduit, a tendance à monter et cède sa chaleur au MCP sous forme solide.

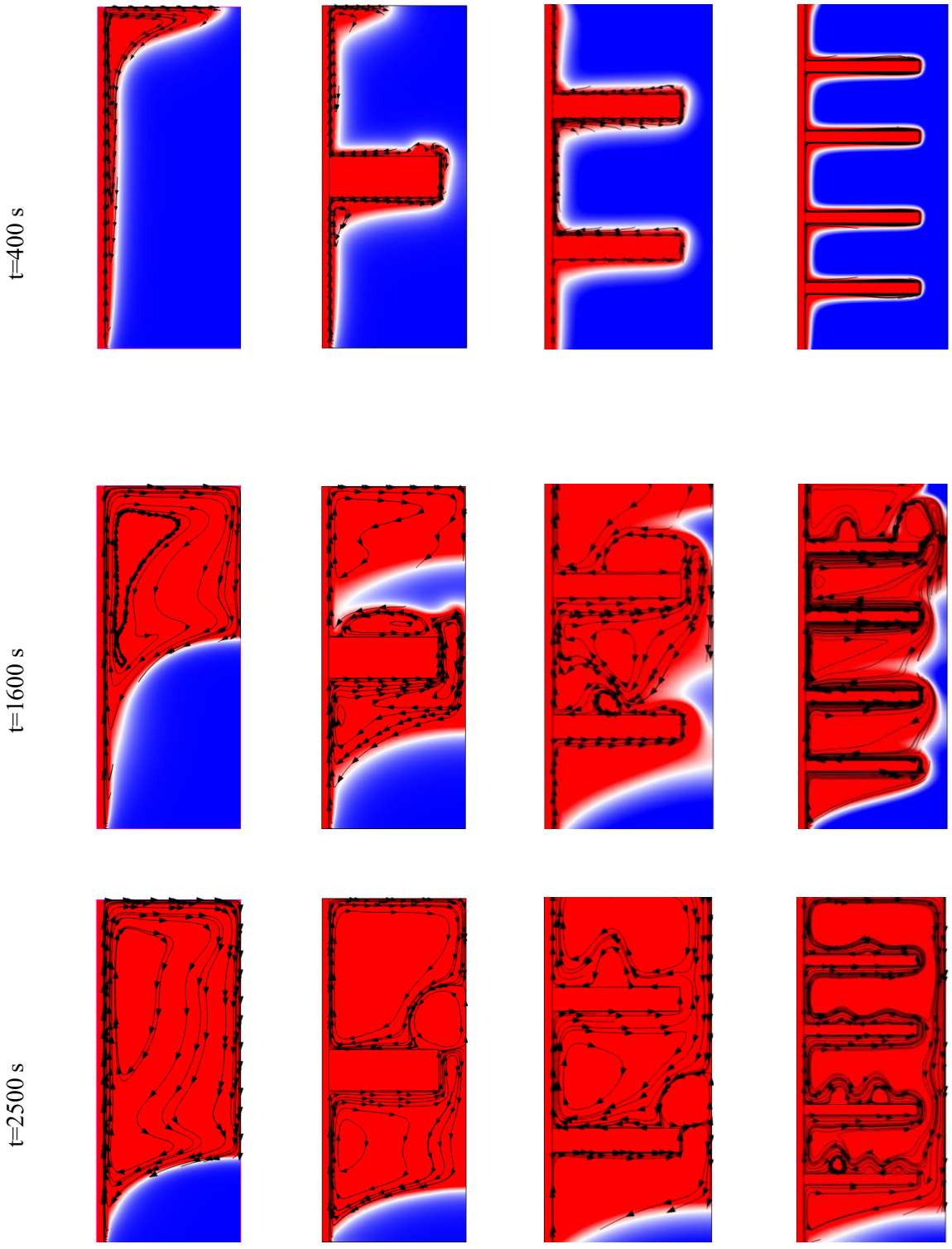
Figure 4-3 présente le développement la fraction liquide en fonction du temps en présence de différentes configurations les ailettes (nombre et dimension).

En remarque que le MCP commence en fusion et continuant avec le temps (la zone liquide s'étend avec le temps). Après un certain temps, le mouvement du fluide devient clair, comme l'indiquent les lignes de courant, contrairement à ce qu'il était dans les instants initiaux (conduction), où le transfert de chaleur par conduction était dominant. Au fil du temps, la convection naturelle est devenue dominante et contrôlante, comme mentionné précédemment.

Dans le cas (D), il a été constaté que la distribution de la chaleur était lente durant les premières périodes, ce qui est attribué à la présence d'ailettes dans la partie supérieure de la zone de capsule, entravant ainsi le mouvement de la convection naturelle. Cependant, il a été observé que la fusion est la meilleure dans ce cas à t = 3000 secondes.

L'augmentation du nombre d'ailettes contribue au processus de fusion, ce qui est dû à l'amélioration du transfert de chaleur qu'elles permettent. En effet, les ailettes favorisent une meilleure distribution.




t=400 s
t=1600 s
t=2500 s

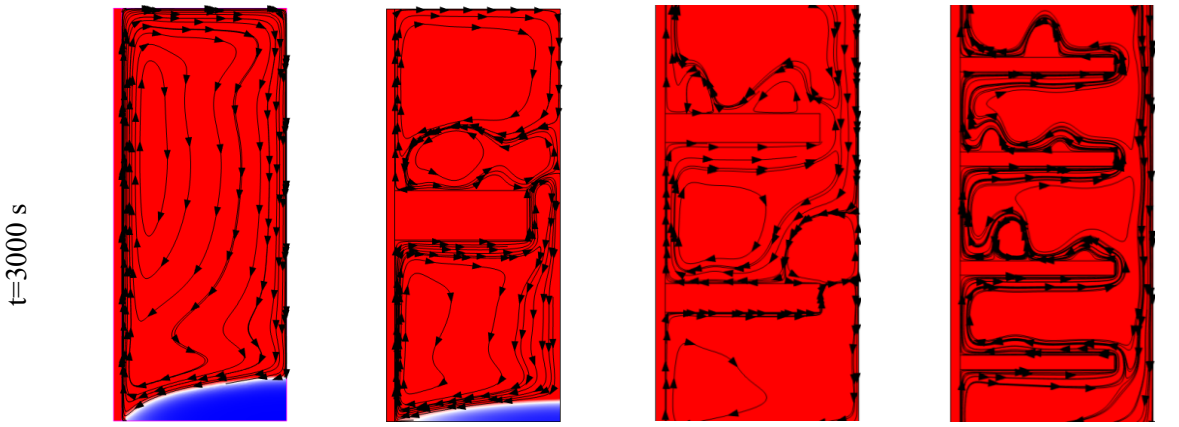


Fig. 4-5 Fraction liquide et structure d'écoulement à différents pas de temps.

Les courbes de la figure 4-5 offrent une comparaison plus claire : l'état 'A' a montré une fusion plus lente, tandis que l'état B a présenté une légère amélioration de la vitesse de fusion par rapport à l'état A, ce qui indique que la présence d'ailettes a contribué à améliorer le transfert de chaleur de manière limitée.

Dans les états C et D, une accélération notable du processus de fusion a été observée après 2000 secondes. Toutefois, dans le cas de 4 ailettes, l'accélération est beaucoup plus importante, atteignant un taux de liquide proche de 1 avant 3000 secondes.

Cela prouve que la multiplication des ailettes améliore considérablement l'efficacité du transfert de chaleur.

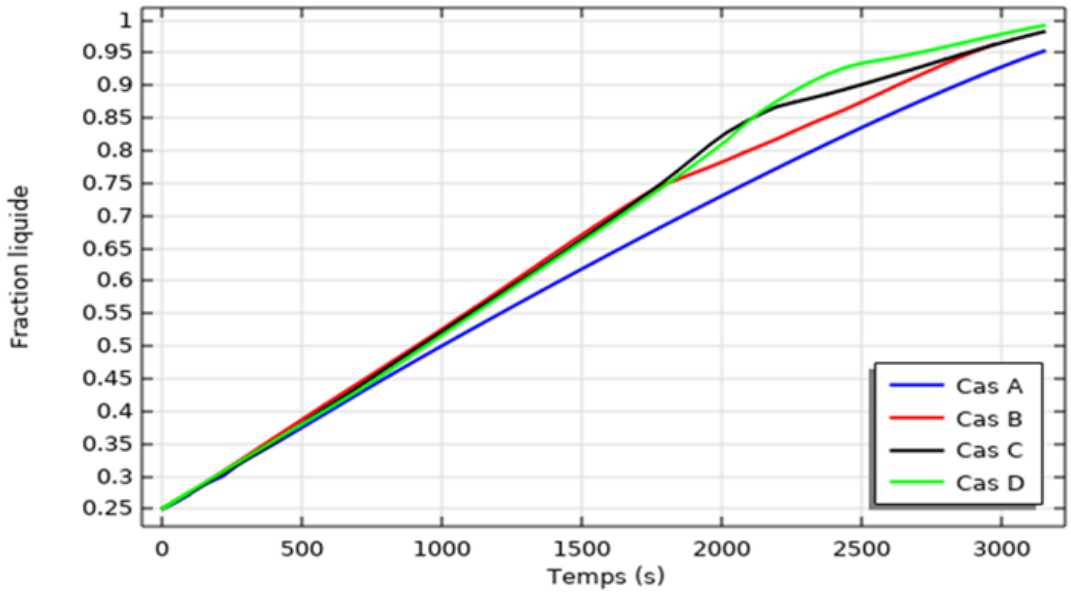


Fig. 4-6 courbe fraction liquide de différente état (A, B, C et D).

Champ de Température

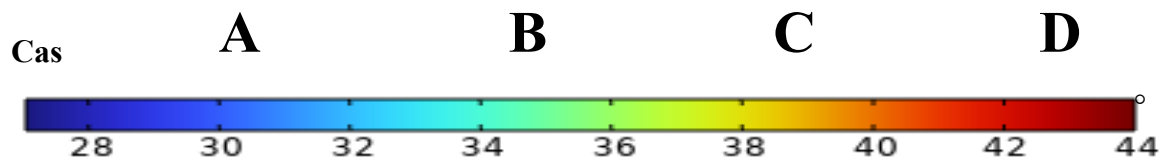
Les distributions de température obtenues à différents instants montrent une progression thermique allant du bleu (froid) au rouge (chaud), traduisant l'élévation graduelle de la température dans le matériau.

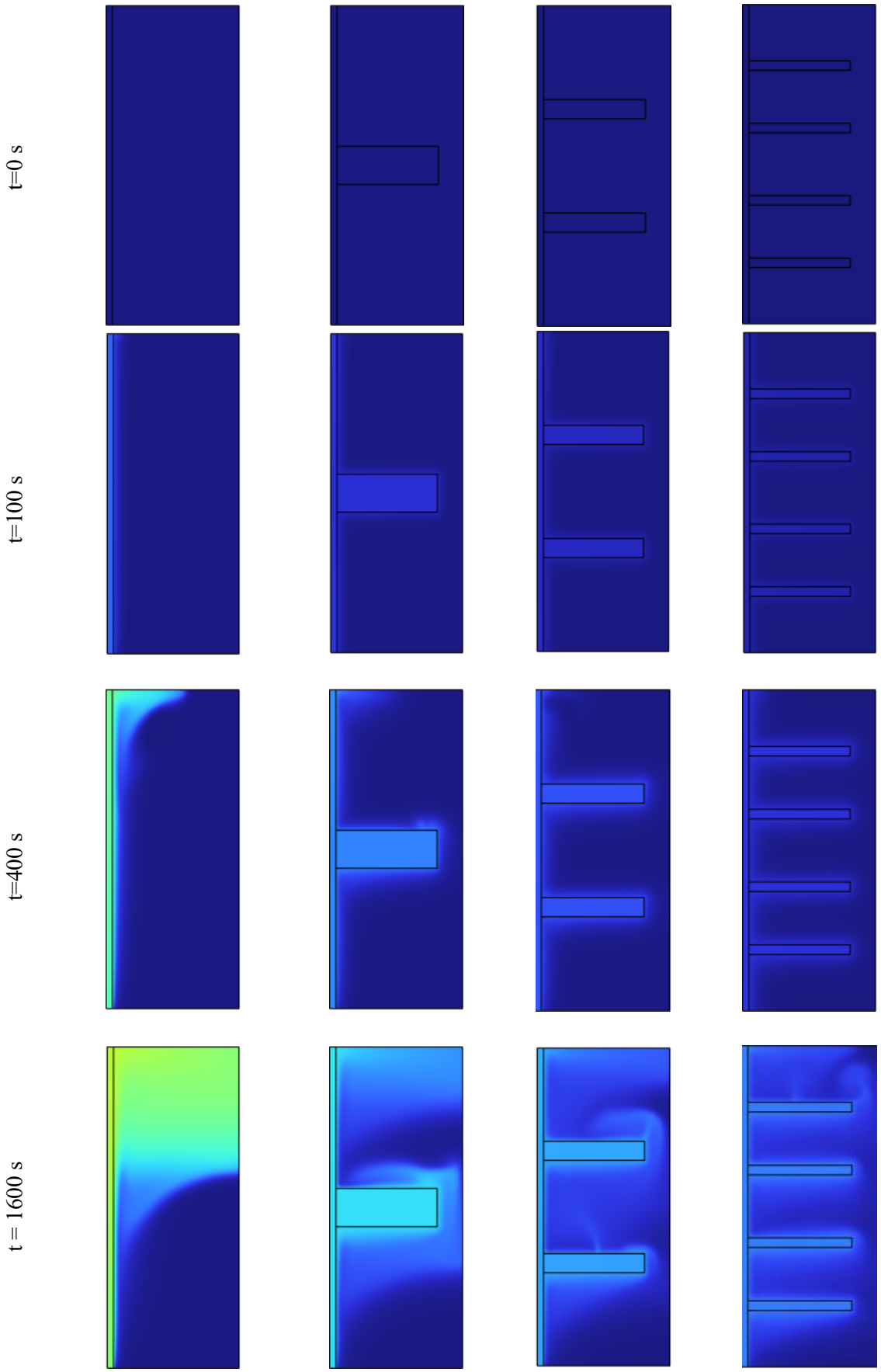
Au début du développement la température est globalement basse dans tout le domaine, et le MCP est essentiellement à l'état solide. Le transfert thermique s'effectue principalement par conduction depuis le mur chaud vers l'intérieur du matériau.

À un instant intermédiaire, les régions proches du mur thermique commencent à se chauffer. On observe l'apparition de zones à température modérée (vert, bleu clair), surtout dans les cas comportant des ailettes. Ces dernières augmentent la surface d'échange thermique, favorisant ainsi un échauffement plus rapide du matériau et la fusion.

À un stade avancé du processus, les cas avec plusieurs ailettes présentent des zones étendues à haute température (orange, rouge), indiquant une fusion plus importante du matériau en contrepartie. Dans le cas sans ailette, la propagation thermique reste limitée et la fusion est plus lente. Ce comportement met en évidence l'effet bénéfique de la convection naturelle qui s'installe dans la phase liquide, particulièrement efficace dans les configurations améliorées avec ailettes.

En conclusion, l'ajout d'ailettes améliore significativement le transfert de chaleur et accélère la fusion du MCP. Plus le nombre d'ailettes augmente, meilleure est l'uniformité de la distribution thermique et plus rapide est la transition de la phase solide à la phase liquide. Ainsi, la configuration avec ailettes multiples s'avère optimale pour les applications de stockage thermique.




t=0 s
t=100 s
t=400 s
t = 1600 s

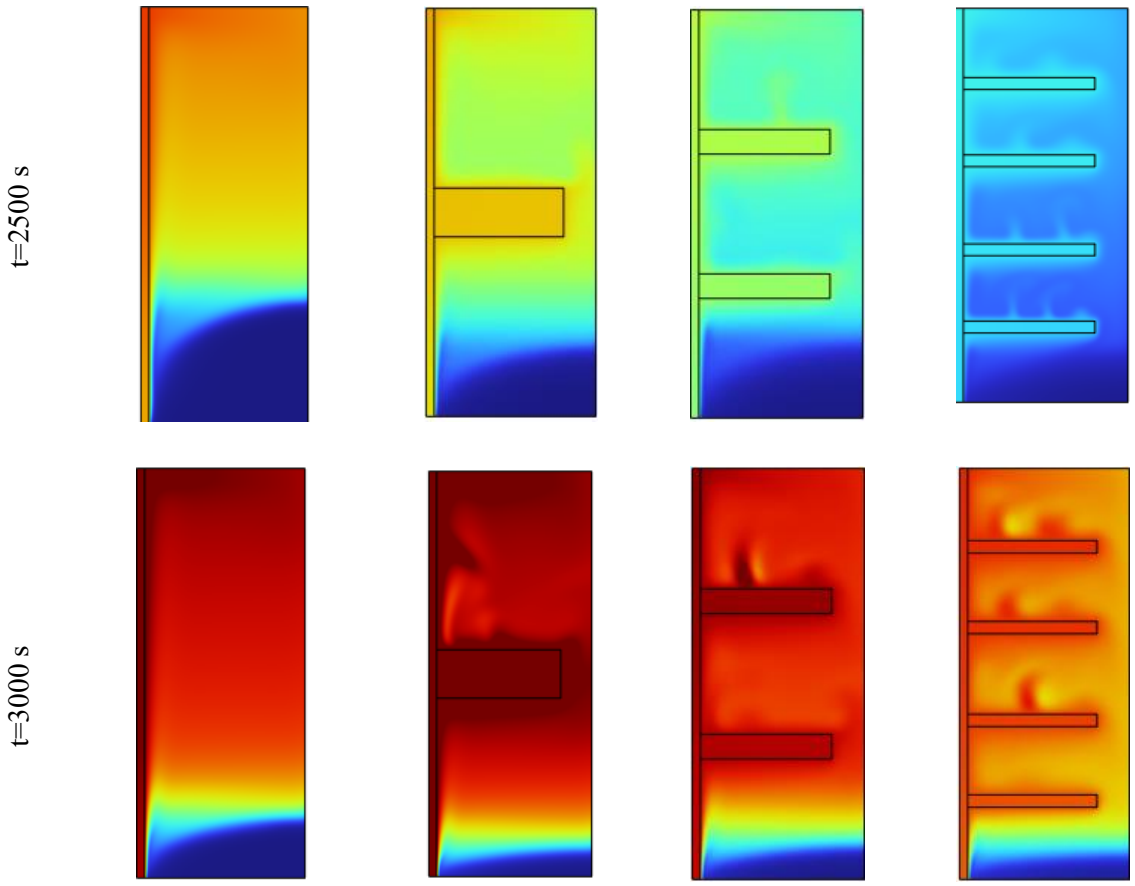


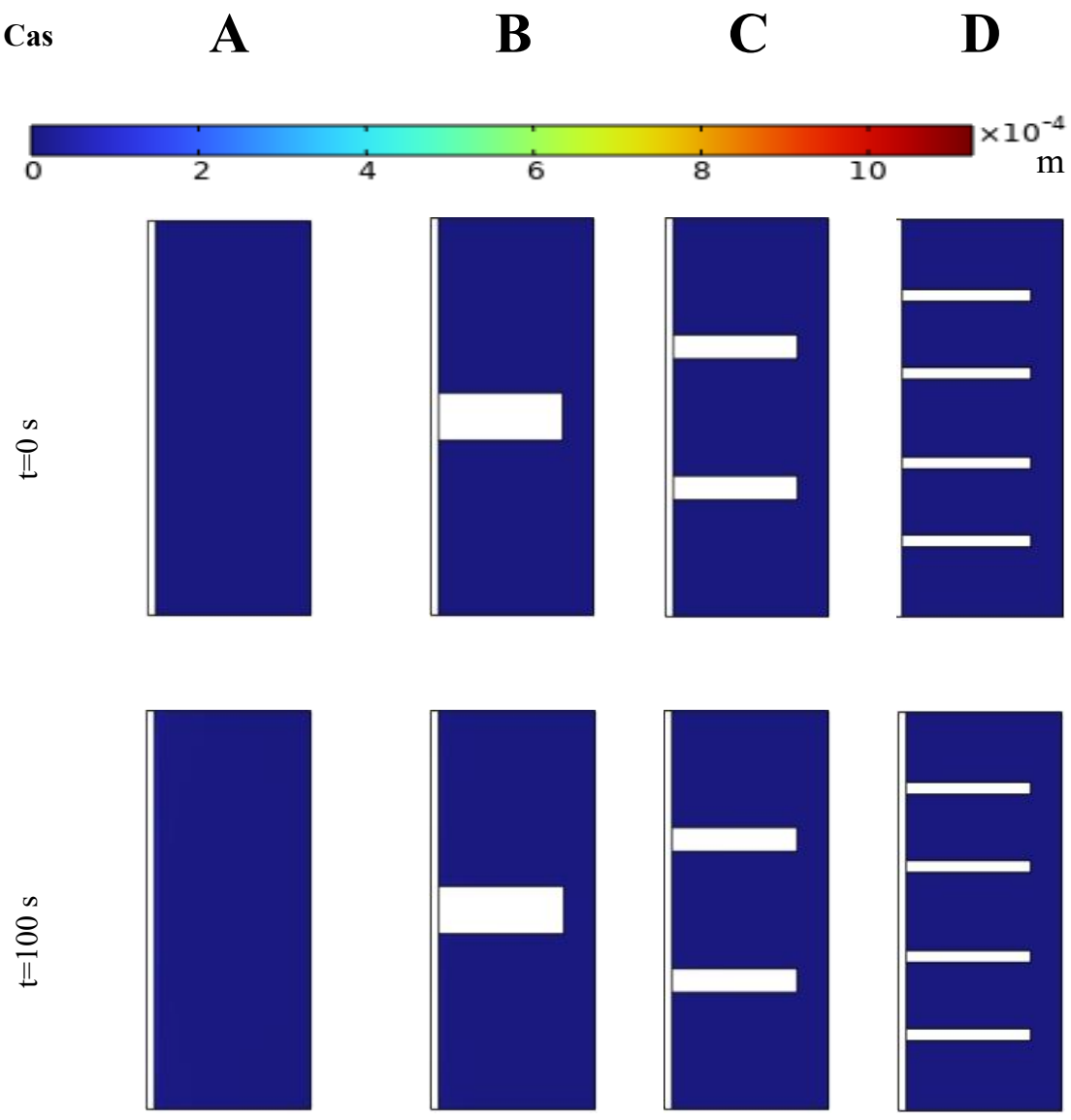
Fig. 4-7 Distribution du champ de température dans (MCP) à différents pas de temps.

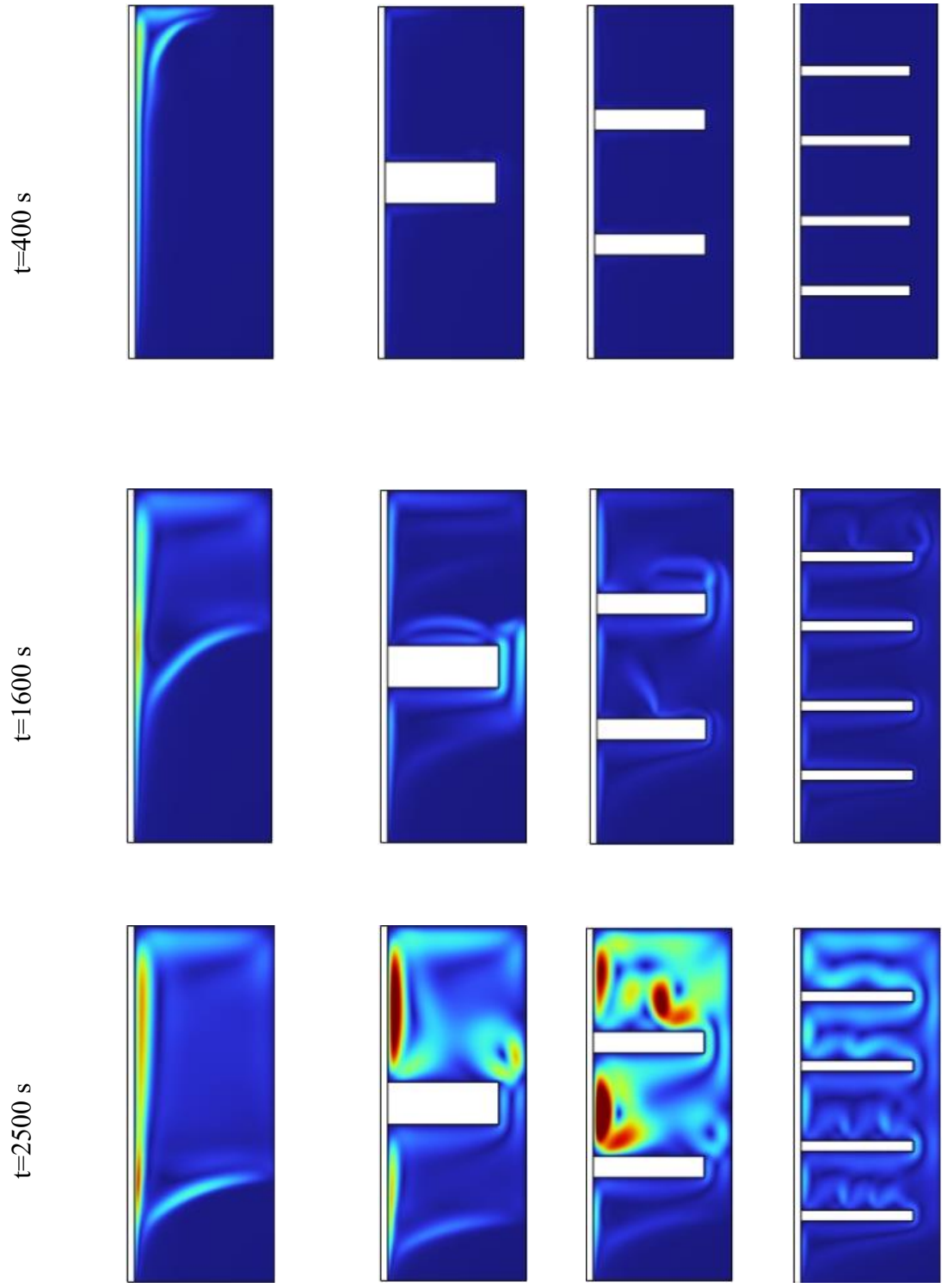
***Champ de vitesse :* Analyse et évolution**

Les résultats numériques de la distribution de la vitesse à l'intérieur du canal étudié ont montré une évolution progressive du mouvement du fluide résultant du processus de fusion. Aux premiers instants du temps (t = 0 s), le matériau est entièrement à l'état solide, et la vitesse est donc nulle dans tout le domaine. Avec le début du chauffage depuis la paroi chaude, une partie du matériau à changement de phase (MCP) commence à se transformer en phase liquide, ce qui engendre des différences de densité à l'intérieur du fluide. Ces différences génèrent des courants de convection naturelle, où le fluide chaud, moins dense, monte vers le haut, tandis qu'un fluide plus froid descend pour le remplacer, créant ainsi un mouvement circulaire continu.

Avec l'écoulement du temps (de t = 100 s à 3000 s), la zone liquide s'élargit et le mouvement de l'écoulement se développe, la vitesse commence à augmenter et des tourbillons clairs apparaissent dans la zone de fusion. Les flèches dans les diagrammes issus de COMSOL indiquent la direction et la vitesse de ce mouvement.

Il a été démontré que la présence d'ailettes dans le domaine thermique a un impact important sur le renforcement du champ de vitesse. Le cas A (sans ailettes) a montré un mouvement relativement faible, tandis que le cas D (quatre ailettes) a enregistré les valeurs de vitesse les plus élevées en raison de l'augmentation de la surface d'échange thermique et de l'accélération du processus de fusion. De manière générale, plus le nombre d'ailettes augmente, plus l'intensité du courant de convection augmente, ce qui montre l'efficacité des ailettes à améliorer la répartition de la chaleur et à intensifier le mouvement du fluide.




t=400 s
t=1600 s
t=2500 s

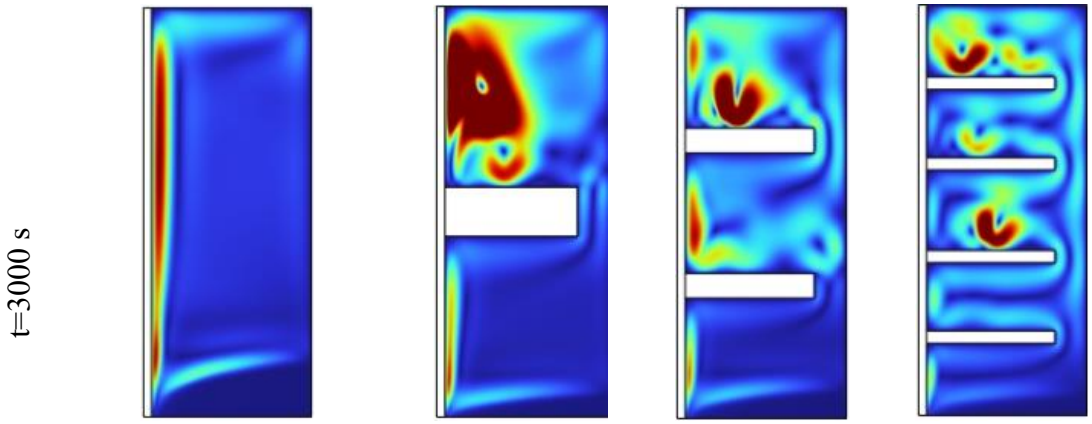


Fig. 4-8 Distribution du champ de vitesse dans (MCP) à différents pas de temps.

4.4 Evaluation de la température

Analyse comparative de l'évolution de la température en trois points, dans la figure 4-8 :

Le cas A sans ailettes : montre clairement que la **température augmente de manière différente selon la position verticale des points.**

P1 (18,5) point le plus bas : C'est le point le plus lent à chauffer, la température reste pratiquement constante jusqu'à environ t = 2900 s. avant de connaître une montée rapide. Cette stagnation thermique s'explique par sa **position en bas du domaine.** Car le transfert de chaleur y est principalement dû à la conduction lente dans les premières étapes, avant que la convection ne se développe de manière significative.

P2 (18 ,25) point médian : La température commence à augmenter plus tardivement, vers t = 1700 s. Cela indique que **la zone centrale du domaine reste relativement froide pendant une longue période, où** la convection naturelle est moins efficace au début du processus.

P3 (18,45) point le plus haut *:* Il présente une élévation rapide de température dès t ≈ 600 s. Cela s'explique par le fait que, dans une configuration sans ailettes, la chaleur transmise par le mur chauffant diffuse d'abord vers le haut, où la convection naturelle (ascendante) commence à s'installer. Ce point profite donc plus tôt de l'élévation thermique.

En résumé, la partie supérieure chauffe plus vite que la partie inférieure, à cause de nature de la convection naturelle.

Le cas B avec une ailette :

Dans ce cas, on observe une évolution plus régulière des températures par rapport au cas A :

P3 (en haut) demeure le point qui chauffe le plus rapidement, avec une montée progressive à partir de t =1000 s.

P2 (au centre) montre une augmentation graduelle, ce qui indique une meilleure propagation de la chaleur dans la zone centrale grâce à la présence de l'ailette.

P1 (en bas) reste cependant le point le plus lent à chauffer, soulignant que l'effet d'une seule ailette reste limité pour diffuser efficacement la chaleur vers le bas.

Cas C – Avec deux ailettes :

Ce cas montre une nette amélioration dans la distribution thermique :

Les courbes de P3 et P2 deviennent plus proches et montent toutes deux progressivement avant t = 2000 s, ce qui témoigne d'un transfert de chaleur plus actif et mieux réparti.

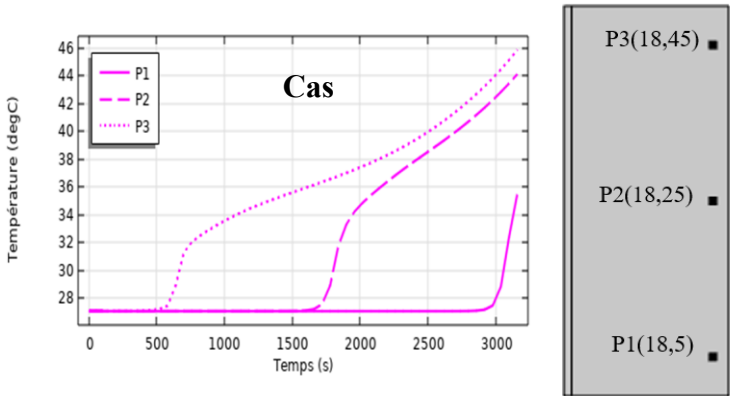
P1 commence à chauffer plus tôt que dans les cas précédents, bien que sa température reste inférieure aux deux autres points.

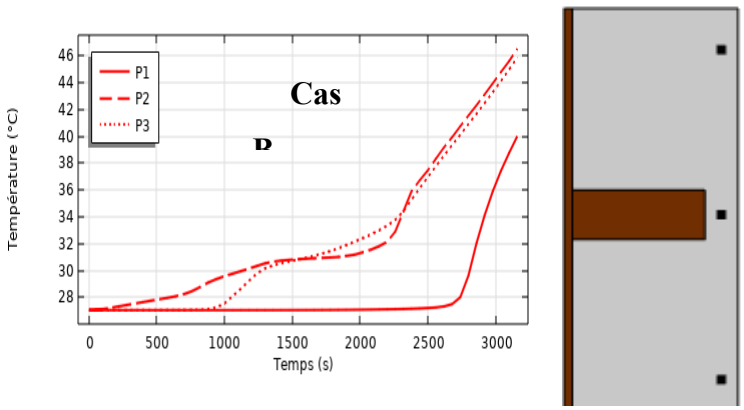
Cas D – Avec quatre ailettes

Ce cas est le plus performant en termes de répartition uniforme de la température :

Les courbes des trois points (P1, P2, P3) deviennent presque parallèles et convergentes à partir de t = 2000 s, avec des températures proches les unes des autres.

P1, qui était auparavant le plus lent à chauffer, montre une montée thermique rapide, proche de celle de P2 et P3.





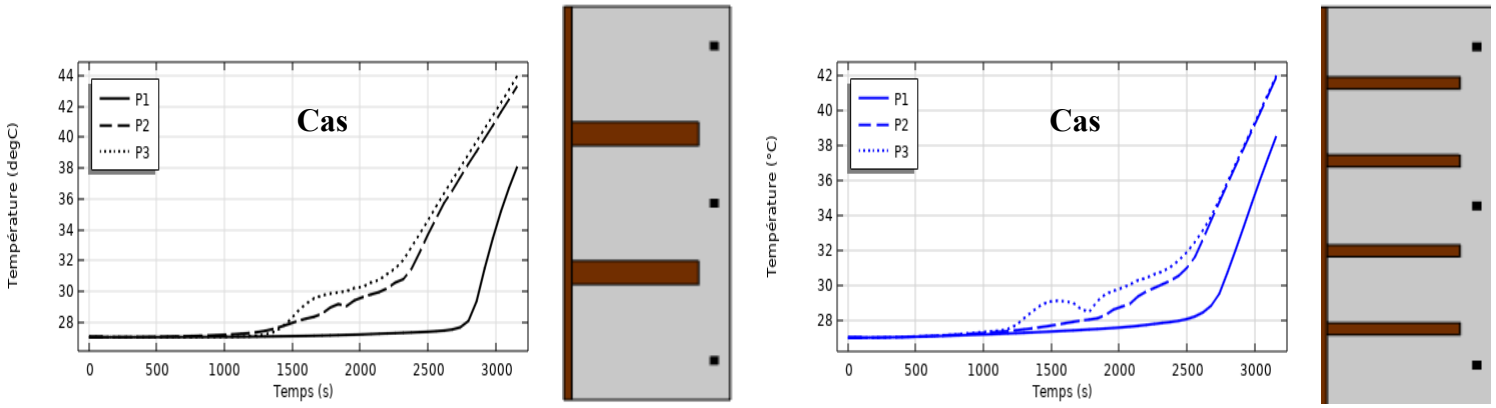


Fig. 4-9 Evaluation de la température en 3 points P1(18,5), P2(18,25), P3(18,45).

4.5 Nombre du Nusselt

Le Figure 4-10 présente l'évolution du nombre de Nusselt en fonction du temps pour quatre configurations différentes (cas A à D), qui représentent différentes dispositions avec ou sans ailettes à l'intérieur de la cavité contenant un matériau à changement de phase (MCP).

Dans le cas A, sans aucune ailette, le transfert de chaleur est d'abord très intense (valeur élevée du nombre de Nusselt), car il y a un grand écart de température au début. Mais rapidement, cette valeur chute fortement : la chaleur ne se propage presque que par conduction, ce qui ralentit la fusion du matériau.

Dans le cas B, l'ajout d'une seule ailette améliore un peu le transfert thermique, en permettant à la chaleur d'atteindre une plus grande surface, mais l'effet reste limité, surtout dans les zones plus éloignées de la source chaude.

Avec deux ailettes (cas C), la chaleur est mieux répartie : on voit apparaître de pic de Nusselt, ce qui montre que la convection naturelle devient plus active. Cela signifie que le fluide chaud monte, le froid descend, et le transfert de chaleur est plus dynamique.

Enfin, dans le cas D, avec quatre ailettes, le transfert de chaleur devient le plus efficace. Même si le démarrage est un peu plus lent (car les ailettes bloquent un peu la circulation au début). Le nombre de Nusselt reste élevé plus longtemps, ce qui prouve que la fusion est plus rapide, plus homogène et plus performante.

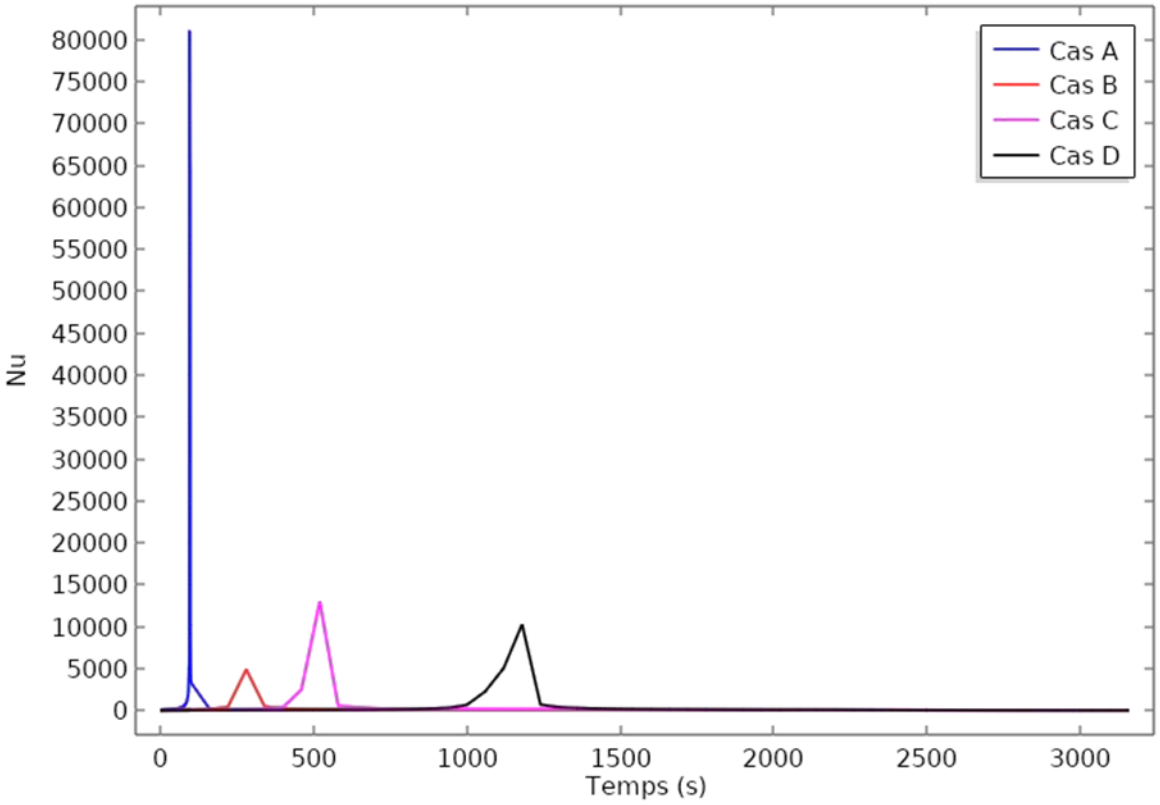


Fig. 4-10 La variation de Nusselt moyen en fonction du temps

4.6 Energie thermique stockée

Ce Figure 4-11 illustre la quantité d'énergie thermique accumulée dans le matériau à changement de phase (MCP) au fil du temps.

Tous les cas montrent une augmentation progressive de l'énergie thermique stockée au fil du temps, ce qui est normal en raison d'un chauffage continu.

Le cas A présente la plus faible quantité d'énergie stockée par rapport aux autres cas, ce qui indique que le transfert de chaleur est lent en raison de sa dépendance à la conduction thermique.

En contrepartie, les cas B, C et D présentent un stockage d'énergie plus rapide, notamment après 500 secondes. Cela indique que l'ajout d'ailettes améliore la convection naturelle au sein du matériau et accélère l'absorption de chaleur.

Le cas D (quatre ailettes) est le plus performant pendant la majeure partie du temps de chauffage (jusqu'à environ 2 200 secondes), assurant une distribution thermique plus efficace au sein du matériau.

À la fin de ce temps (à 3 000 secondes), les courbes des cas B, C et D convergent et dépassent celles du cas A, démontrant que les ailettes contribuent à une augmentation de la quantité d'énergie thermique stockée sur une période plus courte.

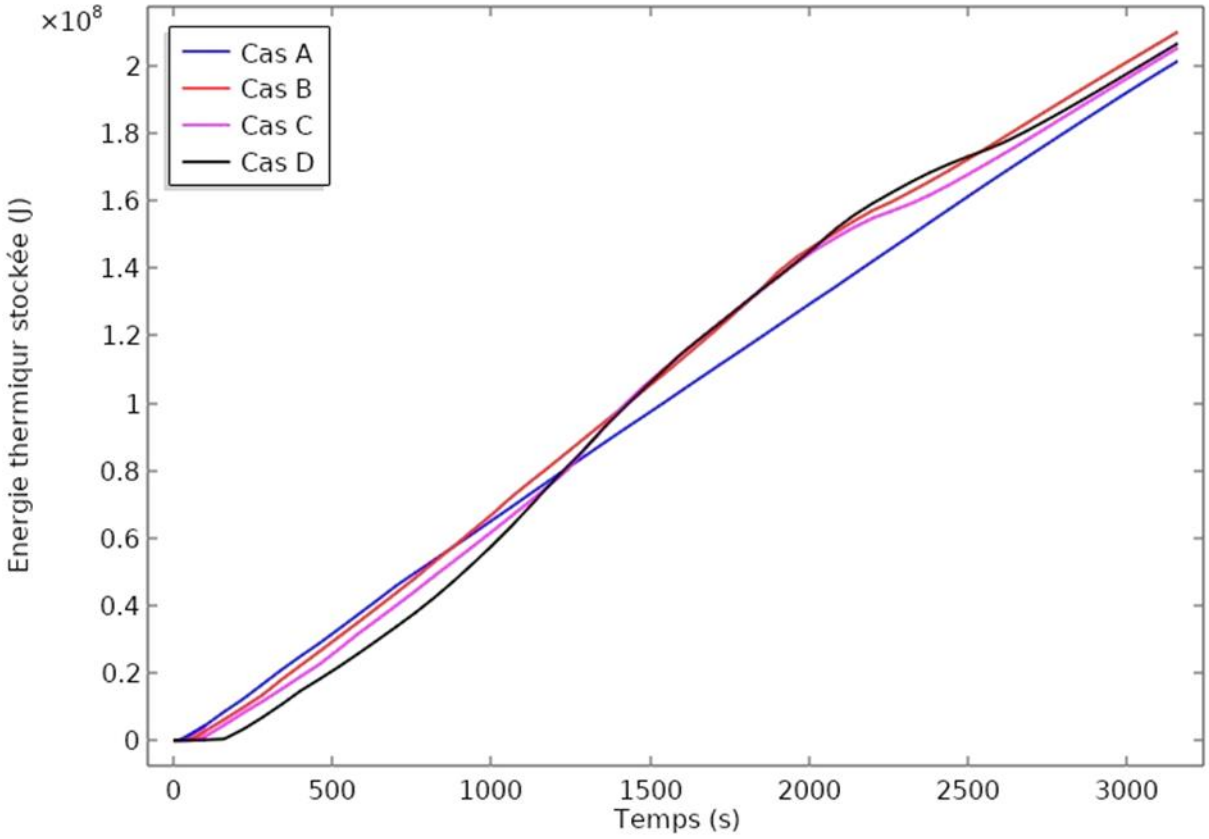


Fig. 4-11 Evaluation de l'énergie thermique stockée en fonction du temps.

5. CONCLUSION GENERALE

Ce travail a porté sur l'amélioration des performances thermiques d'un système de stockage utilisant un matériau à changement de phase (MCP), à travers une approche numérique basée sur la méthode de l'enthalpie-porosité et mise en œuvre dans le logiciel COMSOL Multiphysics. Après avoir étudié les principes fondamentaux du transfert de chaleur et les différentes techniques de stockage thermique, l'accent a été mis sur les matériaux à changement de phase pour leur capacité à stocker de grandes quantités de chaleur à température quasi constante.

L'état de l'art a permis de mettre en évidence les nombreuses recherches récentes consacrées à l'optimisation des dispositifs de stockage thermique, notamment par l'ajout d'ailettes pour améliorer le transfert de chaleur. Une modélisation mathématique rigoureuse a ensuite été élaborée pour simuler le processus de fusion du MCP dans une cavité rectangulaire chauffée, en testant différentes configurations géométriques d'ailettes.

Les résultats numériques ont montré que :

- l'ajout d'ailettes a un effet significatif sur l'efficacité du système. En particulier, la configuration comportant quatre ailettes a permis d'obtenir un transfert thermique plus homogène, une convection naturelle plus active, une fusion plus rapide et un meilleur taux de stockage d'énergie thermique. Ces observations ont été confirmées par les analyses des champs de température, de vitesse, de fraction liquide, du nombre de Nusselt et de l'énergie accumulée.

En conclusion, l'étude a démontré que : conduction par l'intégration d'ailettes constitue une solution efficace pour optimiser le fonctionnement des systèmes de stockage thermique à base de MCP.

•Les ailettes améliorent le taux de distribution de la chaleur à l'intérieur du MCP en augmentant la conductivité thermique.

•Les ailettes permettent de diriger la chaleur vers les zones où la conduction est faible, notamment dans la partie inférieure du système.

•La convection naturelle a contribué à faire remonter le matériau fondu vers le haut, ce qui a renforcé l'équilibre thermique dans la cavité.

•La multiplication des ailettes réduit le mouvement libre du fluide, ce qui diminue l'efficacité de la convection naturelle.

Recommandations :

-Étudier l'effet de différentes formes d'ailettes, notamment les ailettes courbées ou ondulées, sur l'amélioration du transfert de chaleur et l'efficacité du système thermique.

-Tester d'autres matériaux à changement de phase (PCM) présentant de meilleures propriétés thermiques afin d'optimiser les performances et la capacité de stockage énergétique.

-Appliquer les résultats obtenus dans des systèmes d'énergie renouvelable، tels que les dispositifs de chauffage solaire ou les collecteurs thermiques, pour évaluer l'efficacité des améliorations proposées dans des conditions réelles.

6. BIBLIOGRAPHIE

Abed, A. M., Mouziraji, H. R., Bakhshi, J., Dulaimi, A., Mohammed, H. I., Ibrahem, R. K., ... & Mahdi, J. M. (2022). Numerical analysis of the energy-storage performance of a PCM-based triplex-tube containment system equipped with arc-shaped fins. Frontiers in Chemistry, 10, 1057196.

Al-Abidi, A.A., Mat, S., Sopian, K., Sulaiman, M.Y. and Mohammad, A.T., 2013. Internal and external fin heat transfer enhancement technique for latent heat thermal energy storage in triplex tube heat exchangers. Applied thermal engineering, 53(1), pp.147-156

Al-Asadi, H. A., Basem, A., Jasim, D. J., & Al. Bahadli, Y. A. (2024). A computational analysis of the impact of nanofluids (Al2O3) on the PCM melting process in a rectangular container. Discover Sustainability, 5(1), 218.

Assis, E., Ziskind, G. and Letan, R., 2009. Numerical and experimental study of solidification in a spherical shell. Journal of Heat Transfer, 131(2), p.024502.

BERRAHIL, M., & AHMED AMMAR, A. (2019). Etude expérimentale du stockage thermique à base des Matériaux à Changement de Phase (MCP).

BERRAHIL, M., & AHMED AMMAR, A. (2019). Etude expérimentale du stockage thermique à base des Matériaux à Changement de Phase (MCP).

Bondareva, N.S., Buonomo, B., Manca, O. and Sheremet, M.A., 2018. Heat transfer inside cooling system based on phase change material with alumina nanoparticles. Applied Thermal Engineering, 144, pp.972-981.

BOUZENNADA, T. Modélisation mathématique et simulation numérique de phénomènes de transfert de chaleur lors d'un processus de changement de phase (Doctoral dissertation, Université de Annaba-Badji Mokhtar).

BOUZENNADA, T. Modélisation mathématique et simulation numérique de phénomènes de transfert de chaleur lors d'un processus de changement de phase (Doctoral dissertation, Université de Annaba-Badji Mokhtar).

Carman P C., 1937. Fluid flow through granular beds. Trans. Inst. Chem. Engs. 15:150-156.

Chili, N., & Bourmel, M. (2021). Étude d'un système de stockage thermique par chaleur latente a changement de phase: application à un système solaire de production d'eau chaude sanitaire (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou).

Darzi, A. R., Farhadi, M., & Sedighi, K. (2012). Numerical study of melting inside concentric and eccentric horizontal annulus. Applied Mathematical Modelling, 36(9), 4080-4086.

Deng, S., Nie, C., Jiang, H., & Ye, W. B. (2019). Evaluation and optimization of thermal performance for a finned double tube latent heat thermal energy storage. International Journal of Heat and Mass Transfer, 130, 532-544.

Desai, A. N., Shah, H., & Singh, V. K. (2021). Novel inverted fin configurations for enhancing the thermal performance of PCM based thermal control unit : A numerical study. Applied Thermal Engineering, 195, 117155.

DR. BOUAFENE.A.2023.cours de transferts de chaleurs 2. Université LARBI TEBESSI Tébessa.

https://www.researchgate.net/figure/Differents-types-decoulement-a-Turbulent-Re2000-b-Laminaire-Re1-Les-fleches_fig6_337151128

Kabbara, M., Kheirabadi, A. C., & Groulx, D. (2016, July). Numerical modelling of natural convection driven melting for an inclined/finned rectangular enclosure. In Heat Transfer Summer Conference (Vol. 50336, p. V002T08A007). American Society of Mechanical Engineers.

Kayansayan, N., & Acar, M. A. (2006). Ice formation around a finned-tube heat exchanger for cold thermal energy storage. International Journal of Thermal Sciences, 45(4), 405-418.

Kok, B. (2020). Examining effects of special heat transfer fins designed for the melting process of PCM and Nano-PCM. Applied Thermal Engineering, 170, 114989.

Kraiem, M. (2021). Contribution à la caractérisation thermophysique des composites mousses métalliques/matériaux à changement de phase solide-liquide (Doctoral dissertation, Université Paris-Est).

Mecieb, F. Z., & Laouedj, S. (2024). Improving PCM Melting Performance using Asymmetric Fin Designs in Rectangular Enclosures. Engineering, Technology & Applied Science Research, 14(5), 16290-16295.

Moein-Jahromi, M., Rahmanian, S., & Rahmanian-Koushkaki, H. (2024). Novel designs for PCM passive heat sink of concentrated photovoltaic cells to enhance the heat transfer rate: presenting 4E analyses. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 149(4), 1667-1695.

Oliveski, R. D. C., Becker, F., Rocha, L. A. O., Biserni, C., & Eberhardt, G. E. S. (2021). Design of fin structures for phase change material (PCM) melting process in rectangular cavities. Journal of Energy Storage, 35, 102337.

Parsazadeh, M., & Duan, X. (2018). Numerical study on the effects of fins and nanoparticles in a shell and tube phase change thermal energy storage unit. Applied energy, 216, 142-156.

Patankar, S., 2018. Numerical heat transfer and fluid flow. CRC press.

Shi, X., Memon, S. A., Tang, W., Cui, H., & Xing, F. (2014). Experimental assessment of position of macro encapsulated phase change material in concrete walls on indoor temperatures and humidity levels. Energy and buildings, 71, 80-87.

Shmueli, H., Ziskind, G. and Letan, R., 2010. Melting in a vertical cylindrical tube: Numerical investigation and comparison with experiments. International Journal of Heat and Mass Transfer, 53(19-20), pp.4082-4091.

Solomon, L., Elmozughi, A. F., Oztekin, A., & Neti, S. (2015). Effect of internal void placement on the heat transfer performance–Encapsulated phase change material for energy storage. Renewable Energy, 78, 438-447.

Soupart-Caron, A. S. (2015). Stockage de chaleur dans les Matériaux à Changement de Phase (Doctoral dissertation, Université Grenoble Alpes).

Soupart-Caron, A. S. (2015). Stockage de chaleur dans les Matériaux à Changement de Phase (Doctoral dissertation, Université Grenoble Alpes).

Talebizadehsardari, P., Mahdi, J. M., Mohammed, H. I., Moghimi, M. A., Eisapour, A. H., & Ghalambaz, M. (2021). Consecutive charging and discharging of a PCM-based plate heat exchanger with zigzag configuration. Applied Thermal Engineering, 193, 116970.

Voller, V.R. and Prakash, C., 1987. A fixed grid numerical modelling methodology for convection diffusion mushy region phase-change problems. International Journal of Heat and Mass Transfer, 30(8), pp.1709-1719.

Voller, V.R., Cross, M. and Markatos, N.C., 1987. An enthalpy method for convection/diffusion phase change. International journal for numerical methods in engineering, 24(1), pp.271-284.