

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou



Faculté du Génie de la construction

Département de génie Mécanique

Mémoire de fin d'études de master académique

Domaine : **Sciences et Technologie**

Filière : **Mécanique**

Spécialité : **Energétique**

Présenté par

**CHILI Nassim
BOURMEL Mustapha**

Mémoire proposé et dirigé par Mme. DJEFEL Dihia

Thème

***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***

Remerciements

Nous tenons à remercier Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage, la force et la volonté pour réaliser ce travail.

*Nous remercions vivement et chaleureusement Madame **DJEFEL Dilia** notre promotrice, D'avoir proposé un sujet de recherche d'actualité, pour sa patience, pour son soutien et pour nous avoir guidés tout au long de ce mémoire.*

Nos remerciements vont aux membres de jury qui ont pris soin d'examiner le travail présenté dans ce mémoire.

*Nous exprimons aussi nos remerciements pour Mr **AMAROUCHE Samir**, Mr **MOKHTARI Mehdi** et **TOUADI M^{ed} Amine** pour leurs disponibilités, leurs conseils, leurs aides précieuses et surtout leurs judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion.*

Sans oublier ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail, et ceux qui ont fait l'honneur de jurer ce mémoire.

*Nous ne laisserons pas cette occasion passer sans remercier tous les professeurs et personnels de l'Université Mouloud **MAMMERI** de Tizi-Ouzou qui travaillent dur pour faire de cette Université ce qu'elle est aujourd'hui.*

Merci à vous tous.

Je dédie cet humble travail à

Ma mère Sadia

La plus chère et précieuse personne dans ma vie, la femme la plus courageuse au monde, la femme que je ne saurais récompenser pour toutes les sacrifices que tu as faits et ne cesses de faire pour moi et mes frères, pour ton grand amour et pour l'éducation que tu nous as donnée. Ce que je suis aujourd'hui est grâce à toi maman, j'espère que tu sois fière de moi.

Je t'aime plus que tout.

Mon cher père Aoudia pour ton soutien, ton encouragement et surtout ton amour. Aucun mot ne serait assez pour témoigner de l'étendue des sentiments que j'approuve à ton égard.

Mes très chers frères, Ahmed, Djillali, Hakim, mes chères sœurs, Malha et Djamila. Vous êtes mon épaupe la plus solide. Puissent nos liens fraternels se consolider et se pérenniser encore plus.

Toute la famille BOURMEL et AIT-MOHAMED.

Mes amis et camarades de promotion spécialement Amine, Ramdan, Samir, Mehdi, Hakim, Assalas, Ali, Yacine et Lyes.

Mon binôme et mon chère ami Nassim ainsi qu'à toute sa famille.

Merci à vous.

MUSTAPHA

Je dédie cet humble travail

A mon père CHILI SAÏD et ma mère FATMA AKLIOUAT pour leur amour inestimable, leurs sacrifices, leur confiance, leur soutien et toutes les valeurs qu'ils ont su m'inculquer.

*Ma chère sœur Cherifa. Vous êtes mon épaule la plus solide
Puissent nos liens fraternels se consolider et se pérenniser encore plus.*

Toute la famille CHILI et AKLIOUAT.

Une spécial dédicace pour ma chère Lydia pour tout l'encouragement, le respect, le soutien et optimisme que tu m'a offert.

Mes amis et camarades de promotion spécialement Amine, Mohand, Ramdan, Samir, Mehdi, Hakim, Assalas, Ali, Yacine et Lyes.

Mon binôme et mon chère ami Mustapha ainsi qu'à toute sa famille.

Merci à vous.

NASSIM

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire concerne une étude sur un système de stockage d'énergie par chaleur latente pour une application d'eau chaude sanitaire grâce à un logiciels de simulation numérique COMSOL Multiphysics.

En premier plan un état de l'art des technologies de stockage thermique ainsi que quelques généralités sur les MCP ont été présentés, cela nous a permis de nous prononcer sur les matériaux adéquats à utiliser. Dans un second plan on a procédé à la conception d'une géométrie et à une interprétation des phénomènes physiques qui régissent sur le procédé pour les intégrer dans le logiciel. En derniers plan on à réaliser quatre simulations où on a fait varier le nombre d'ailette pour faire une comparaison sur le temps de fusion complète.

D'après notre expérience on a constaté que l'intégration de cette tel technologie est prometteuse pour optimiser la consommation d'énergie.

Abstract

The work presented in this thesis concerns a study of a latent heat energy storage system for a domestic hot water application using a numerical simulation software COMSOL Multiphysics.

In the first place, a state of the art of thermal storage technologies and some generalities on PCMs were presented, which allowed us to decide on the appropriate materials to use. In a second step, a geometry design and an interpretation of the physical phenomena governing the process were carried out and integrated into the software. Finally, four simulations were carried out in which the number of fins was varied in order to make a comparison of the complete melting time.

In our experience, the integration of this technology is promising for optimizing energy consumption.

Table des matières

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Nomenclature

Introduction générale 1

CHAPITRE 1 : STOCKAGE DE L'ENERGIE THERMIQUE ET LES MCP

Introduction..... 3

1.1 Application du SSECL :..... 3

1.2 Stockage de l'énergie thermique :..... 4

1.2.1 Stockage de l'énergie thermique par chaleur sensible :..... 5

1.2.2 Stockage thermochimique :..... 6

1.2.3 Stockage de l'énergie thermique par chaleur latente :..... 6

1.3 Les matériaux à changement de phase :..... 8

1.3.1 Classification des matériaux à changement de phase :..... 8

1.3.1.1 Les matériaux organiques 9

1.3.1.2 Les matériaux inorganiques 10

1.3.1.3 Les matériaux eutectiques..... 10

1.3.2 Transfert de chaleur par changement de phase lors de la fusion : 11

1.4 Enoncé du mémoire : 15

CHAPITRE 2 : GEOMETRIE DU MODELE ET FORMULATION MATHEMATIQUE

2.1 Introduction..... 16

2.2 La géométrie et les matériaux :..... 16

2.2.1 La sélection des ailettes : 18

2.3 Physique et interprétation mathématique :..... 18

2.3.1 Ecoulement d'un fluide laminaire :..... 19

2.3.2 Transfert de chaleur : 19

2.3.3 Transfert de chaleur par changement de phase :..... 21

2.4 Méthode numérique :	21
2.4.1 Modélisation numérique :	21
2.5 Le maillage :	25

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Introduction :	27
3.2 Analyse des résultats :	27
3.2.1 Progression du processus de fusion pour le cas sans ailette :	27
3.2.2 Modèle avec une seule ailette :	30
3.2.3 Modèle avec deux ailettes :	33
3.2.4 Modèle avec trois ailettes :	36
3.3 La comparaisant des résultats des quatre configurations :	39
3.4 Conclusion :	40
Conclusion générale	41
Références bibliographiques	

Liste des Figures

Figure 1.1 : Représentation schématique du SSECL utilisé pour le stockage de l'eau chaude..	4
Figure 1.2 : Différents types de stockage d'énergie thermique	5
Figure 1.3 : Graphe de la température-enthalpie présentant l'énergie stockée dans un système de stockage latent en comparaison avec un système de stockage sensible.....	7
Figure 1.4 : Classification des MCP proposée par Abhat.....	9
Figure 2.1 : (a) Géométrie du système ; (b) exemples de configuration des ailettes (de 0 à 3 ailettes).....	17
Figures 2.2 : schéma explicatif de transition de phase solide-liquide.....	24
Figure 3.1 : représentation des points en coordonnées r et z.	27
Figure 3.2 : l'évolution transitoire de la fraction liquide pour le cas sans ailette.	28
Figure 3.3 : points de référence.....	29
Figure 3.4 : évolution de la température configuration sans ailettes pour les points (A1, A2, A3, A4, A5).	29
Figure 3.5 : évolution de la température configuration sans ailettes pour les points (B1, B2, B3, B4, B5).....	29
Figure 3.6 : évolution de la température configuration sans ailettes pour les points (C1, C2, C3, C4, C5).....	29
Figure 3.7 : l'évolution transitoire de la fraction liquide pour le cas avec une seule ailette....	31
Figure 3.8 : points de référence.....	32
Figure 3.9 : évolution de la température configuration a 1 ailette pour les points (A1, A2, A3, A4, A5).	32
Figure 3.10 : évolution de la température configuration a 1 ailette pour les points (B1, B2, B3, B4, B5).....	32
Figure 3.11 : évolution de la température configuration a 1 ailette pour les points (C1, C2, C3, C4, C5).....	32
Figure 3.12 : l'évolution transitoire de la fraction liquide pour le cas avec deux ailettes.	34
Figure 3.13 : points de référence.....	35

Figure 3.14 : évolution de la température configuration a 2 ailettes pour les points (A1, A2, A3, A4, A5).	35
Figure 3.15 : évolution de la température configuration a 2 ailettes pour les points (B1, B2, B3, B4, B5).....	35
Figure 3.16 : évolution de la température configuration a 2 ailettes pour les points (C1, C2, C3, C4, C5).....	35
Figure 3.17 : l'évolution transitoire de la fraction liquide pour le cas avec trois ailettes.....	37
Figure 3.18 : points de référence.....	38
Figure 3.19 : évolution de la température configuration a 3 ailettes pour les points (A1, A2, A3, A4, A5).	38
Figure 3.20 : évolution de la température configuration a 3 ailettes pour les points (B1, B2, B3, B4, B5).....	38
Figure 3.21 : évolution de la température configuration a 3 ailettes pour les points (C1, C2, C3, C4, C5).....	38
Figure 3.22 : Graphe de comparaison de l'évolution de la température au point C5 pour les différentes géométries	39

Liste des Tableaux

Tableau 2.1 : géométrie et dimension des configurations étudiées.	17
Tableau 2.2 : propriétés thermo physique de l'Acide stéarique.....	18
Tableau 2.3 : propriétés thermo physique de PMMA et cuivre.	18
Tableau 3.1 : comparaison de l'évolution de la température au point C5 pour les différentes géométries.	39

Nomenclature

C_p	Capacité calorifique	(J/kg.K)
L_s	Chaleur massique	(J/kg)
k	Conductivité thermique	(W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
A_{mush}	Constante des zones pâteuse	-
r	Coordonnée	(m)
z	Coordonnée	(m)
ρ	Densité	(kg.m ⁻³)
E	Energie	(J)
ΔH_r	Enthalpie de réaction	(J.mol ⁻¹)
g	Gravité	(m.s ⁻²)
m	Masse	(kg)
n	Nombre de moles	(mol)
P	Pression	(Pa)
Q	Quantité d'énergie	(W)
T	Température	(°C ou K)
t	Temps	(s)
Δ	Variation	-
ν	Viscosité cinématique	(m ² .s ⁻¹)
μ	Viscosité dynamique	(N.s.m ⁻²)
v_{cast}	Vitesse de coulée	mm/s
u	Vitesse suivant r	(m/s)
v	Vitesse suivant z	(m/s)

Abréviations

SSECS	système de stockage d'eau chaude sanitaire.
MCP	matériau a changement de phase.
PMMA	Poly Méthacrylate de Méthyle.
MEF	La méthode des éléments finis.
AEF	Analyse par éléments finis

INTRODUCTION GENERALE

Depuis le commencement des âges l'énergie a été le moteur de l'activité humaine, et c'est un élément qui intervient dans tous les actes quotidiens de l'homme. Les énergies jouent un rôle de catalyseur principal dans la génération du confort pour une nation et a un rôle significatif dans le développement des secteurs technologiques, industriels, économiques et sociaux. [1]

Les énergies renouvelables apparaissent comme une solution, bien entendu partielle, à cette urgence. Parmi les énergies renouvelables, l'énergie solaire montre une attractivité spécifique : elle est abondante sur Terre, inépuisable et gratuite. En effet, l'énergie solaire reçue au niveau de la terre est de l'ordre de 1300 W/m^2 . L'atmosphère réfléchit et absorbe une partie de ce flux d'énergie, en moyenne la terre reçoit au niveau de sol 1000 W/m^2 au vertical à midi.[2]

En attendant la mise au point de techniques permettant la production d'énergie écologique et renouvelable, en grande quantité et à moindre cout, l'intérêt se porte sur le contrôle des dépenses énergétiques et la régulation de la consommation. Le stockage d'énergie peut aller dans ce sens, car il permet une utilisation de l'énergie différée de la production, évitant ainsi les pics de surproduction en heures de pointe, onéreux en cout des installations.

La production d'eau chaude sanitaire est une des applications les plus intéressantes de l'énergie solaire, notamment dans les installations solaires collectives des bâtiments résidentiels et certains tertiaires caractérisés par des besoins d'eau chaude importants et réguliers tout au long de l'année. C'est le cas en particulier des bâtiments de l'habitat collectif, des hôtels et des établissements de santé. Il est donc indispensable de proposer de nouvelles solutions afin d'améliorer leurs performances énergétiques. Notre choix s'est donc orienté vers l'utilisation des matériaux à changement de phase. [3]

Il est bien sur possible de stocker de l'énergie par la simple augmentation de température d'un matériau. L'énergie est alors accumulée sous forme de chaleur sensible. Toutefois, afin de parvenir à stocker une quantité appréciable d'énergie, cette méthode doit faire intervenir des températures élevées. Ceci provient du fait que les chaleurs spécifiques de la plupart des matériaux sont relativement faibles.

Une autre façon de stockage de l'énergie calorifique consiste à utiliser des matériaux à changement de phase (MCP). L'énergie est alors emmagasinée sous forme de chaleur latente grâce à la fusion de ces matériaux, puis restituée au milieu ambiant grâce à leur solidification.

Le choix d'un MCP dont la chaleur latente est élevée et dont la température de changement de phase est proche de la température de travail (souhaitable) permet à la fois de réduire considérablement l'encombrement de l'appareil et les pertes thermiques pendant la période de stockage.

L'objectif de notre travail consiste à apporter une contribution à l'analyse des phénomènes de transfert de chaleur qui se déroulent dans le processus de stockage de chaleur dans les MCP (convection, conduction ...), et ce en étudiant un système qui consiste en deux tubes cylindriques concentrique, dont le cylindre extérieur contient le MCP (acide stéarique) et celui à l'intérieur représente une conduite d'eau dont on va récupérer la chaleur permettant la fusion du MCP.

Pour atteindre les objectifs fixés à cette étude, on a subdivisé le travail en trois chapitres.

Le premier chapitre porte sur une présentation du système étudié ainsi que sur des généralités sur les différentes techniques de stockage thermique et les matériaux à changement de phase.

Le second chapitre porte sur la géométrie et les matériaux utilisé lors de la simulation ainsi que les équations et les conditions initiales et aux limites.

Le troisième chapitre porte sur la présentation des résultats de la simulation sur COMSOL multiphysique et ceci avec une comparaison entre les différents cas.

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

CHAPITRE 1
STOCKAGE DE L'ENERGIE
THERMIQUE ET LES MCP.

INTRODUCTION

Avec une demande croissante de l'énergie, la dépendance aux énergies fossiles conduira à une crise énergétique mondiale selon le World Energy Outlook de 2010, publié par l'Agence internationale de l'énergie (AIE), 80 % des champs pétrolifères qui sont actifs seront tarifiés d'ici 2035. Dans ce contexte l'enjeu est de basculer vers d'autres énergies qui seront durables et moins polluantes, plusieurs solutions sont envisageables (éoliennes, panneaux photovoltaïques...).

Dans ce chapitre on va s'intéresser à l'une d'entre elles à savoir le stockage thermique, une technologie prometteuse en termes d'économie d'énergie, les études dans ce domaine sont assez récentes malgré que des approches ont été envisagées lors de la crise pétrolière dans les années 80, il fallait attendre l'an 2000 pour voir des recherches scientifiques approfondies dans ce sens.

1.1 Application système de stockage d'eau chaude sanitaire SSECS :

L'application qu'on envisage de modéliser et d'étudier dans ce travail est le stockage thermique dans un système d'eau chaude solaire présenté dans la Figure 1.1. Dans le but d'éliminer le décalage entre l'offre et la demande de l'énergie dans les systèmes d'énergie solaire, il est nécessaire d'inclure un stockage thermique.

Assurant des performances et une fiabilité élevée avec les avantages d'une densité de stockage élevée et d'une fourniture d'énergie à température presque constante.

Pendant la journée l'eau est pompée du réservoir, la vanne 1 permet à l'eau froide de circuler dans la conduite vers le panneau thermique ou un échange thermique se produit, ainsi une partie de l'énergie récupérée va être cédée dans SSECS et va être récupérée par le MCP qui va la stocker c'est la phase de charge, puis l'eau chaude revient dans le réservoir, pendant la nuit la vanne 1 se ferme et la vanne 2 s'ouvre et l'eau froide va récupérer l'énergie stockée dans le SSECS c'est la phase de la décharge .

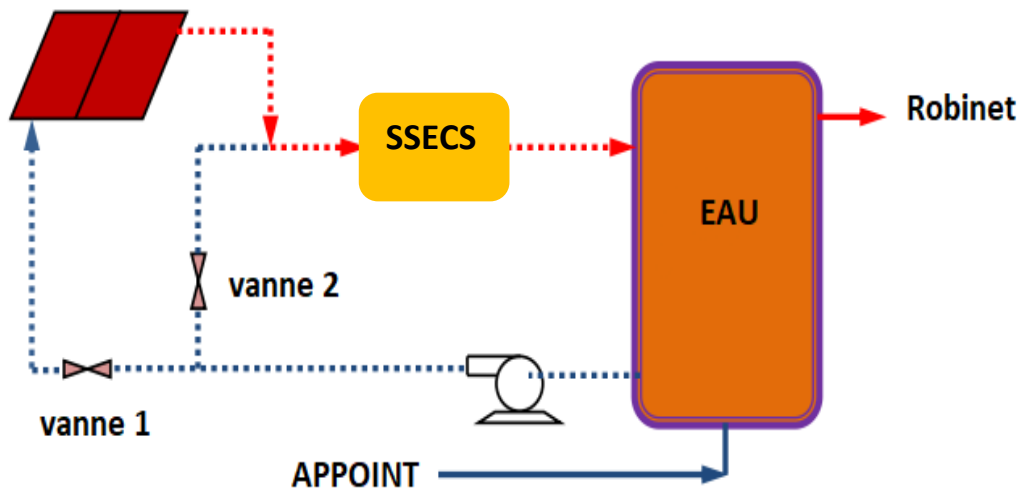


Figure 1.1 : Représentation schématique du SSECS utilisé pour le stockage de l'eau chaude.

1.2 Stockage de l'énergie thermique :

Les systèmes de stockage d'énergie comprennent différentes méthodes pour maintenir l'équilibre dans l'alimentation en énergie et son utilisation. Les différents systèmes de stockage d'énergie comprennent les systèmes mécaniques, électrochimiques, chimiques, électriques et thermiques. Parmi toutes les méthodes d'application, le stockage d'énergie thermique est l'un des moyens efficace et économique de stockage d'énergie car il évite de convertir l'énergie d'une forme à l'autre et donc de réduire les pertes de conversion.

L'énergie thermique peut être stocké sous forme de changement d'énergie interne d'un matériau en tant que chaleur sensible, chaleur latente et thermochimique ou une combinaison de ces éléments. [4]

La Figure 1.2 donne un aperçu des principales techniques de stockage de l'énergie.

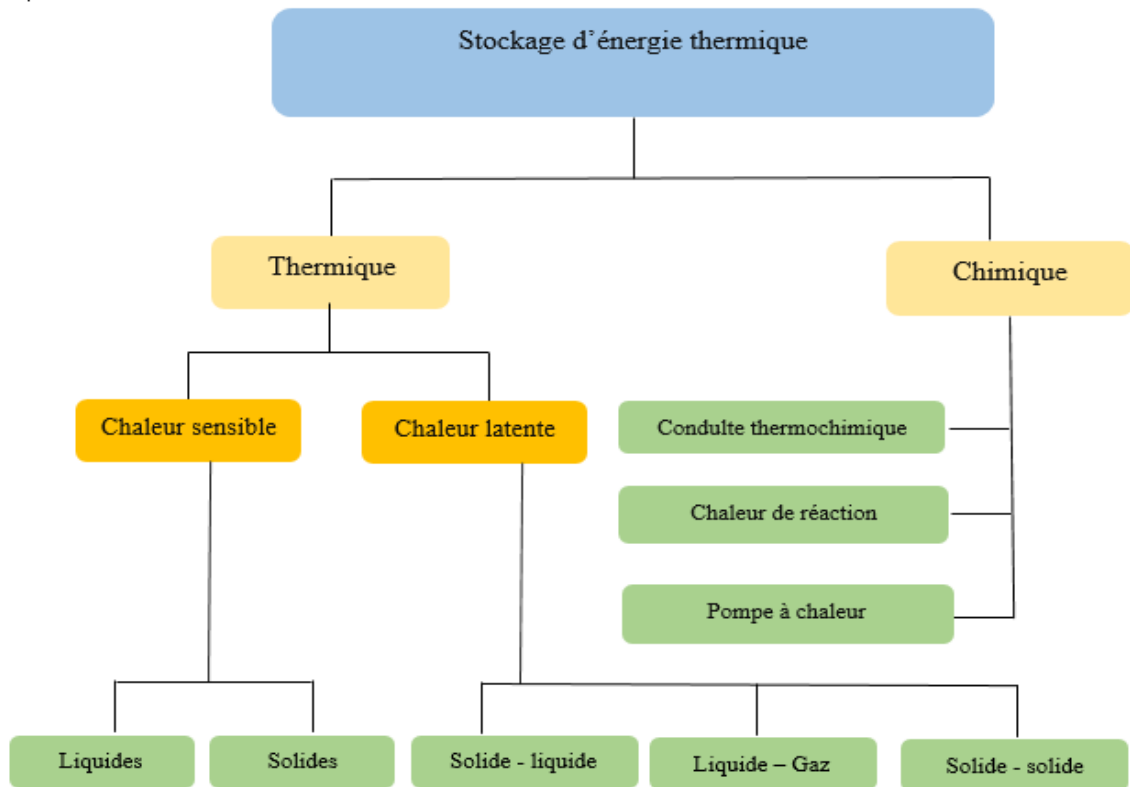


Figure 1.2 : Différents types de stockage d'énergie thermique [5].

1.2.1 Stockage de l'énergie thermique par chaleur sensible :

Dans le cas du stockage par chaleur sensible, l'énergie est emmagasinée sous forme d'augmentation de température du matériau. La quantité d'énergie stockée est alors directement proportionnelle au volume, à l'élévation de température, et à la capacité calorifique du matériau de stockage. Dans ce cas, le matériau cède ou stocke de l'énergie dans une gamme de températures excluant le changement d'état. La variation de la quantité d'énergie Q stockée ou récupérée par le matériau est quantifiée par l'équation suivante :

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m \cdot c_p \cdot dT \quad (1.1)$$

Avec :

Q : est la quantité d'énergie stockée (J).

m : est la masse du matériau de stockage (kg).

c_p : la chaleur spécifique du matériau de stockage ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$).

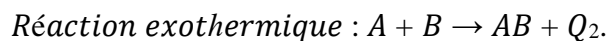
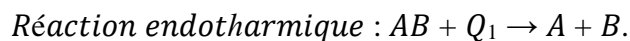
dT : est la variation infinitésimale de la température durant l'étape de charge (K). [6]

Ce mode de stockage est le moyen le plus ancien, le plus simple et le moins onéreux d'emmagasiner de l'énergie. Cependant, la faible densité de stockage de ce type de système est un inconvénient majeur. Le stockage par chaleur sensible s'accompagne d'une élévation de la température mais la structure moléculaire du matériau de stockage ne change pas. Selon l'état physique du matériau de stockage. [7]

1.2.2 Stockage thermochimique :

Certaines réactions chimiques réversibles peuvent être utilisés comme solution pour le stockage thermique de l'énergie. Ce type de stockage est dit : stockage thermochimique. L'énergie thermochimique est la chaleur absorbée ou libérée au cours d'une réaction chimique endothermique ou exothermique. Le stockage de cette énergie est basé sur l'énergie des liaisons des composés chimiques mise en jeu au cours des réactions chimiques réversibles.

Le principe de base du stockage thermochimique est décrit par les équations :



La quantité d'énergie qui peut être stockée dans une réaction chimique (1.2) est la somme des énergies sensibles des matériaux et de la chaleur de réaction. La quantité d'énergie stockée est exprimée selon la relation :

$$E = \sum_{i=1}^N \int_{T_i}^{T_f} m_i \cdot c_p \cdot dT + n_A \times \Delta H_r \quad (1.2)$$

Avec :

E : est la quantité d'énergie stockée (J).

n_A : est le nombre de moles du produit A (mol).

ΔH_r : est l'enthalpie de la réaction ($J \cdot mol^{-1}$). [8]

1.2.3 Stockage de l'énergie thermique par chaleur latente :

Le stockage de la chaleur latente implique de chauffer un matériau jusqu'à ce qu'il change de phase, c'est-à-dire soit de la phase solide à la phase liquide, soit de la phase liquide à la phase gaz ou encore lors de sa transition solide-solide. Lorsque le matériau atteint sa température de changement de phase, il absorbe une quantité de chaleur pour réaliser la transformation, connue sous le nom de chaleur latente de fusion ou de vaporisation selon le

cas. A l'inverse, lorsque le matériau liquide ou gaz est refroidi, il retourne à la phase solide ou liquide en restituant sa chaleur latente. La quantité de chaleur stockée et restituée dépend de la masse du matériau et selon l'équation (1.3) :

$$Q_{latente} = m \cdot L_s \quad (1.3)$$

Avec :

m : la masse du matériau de stockage (kg).

L_s : la chaleur massique de changement d'état du matériau (J/kg).

La quantité de chaleur stockée dans un système latent est présentée sur le graphe température énergie de la Figure 1.3.

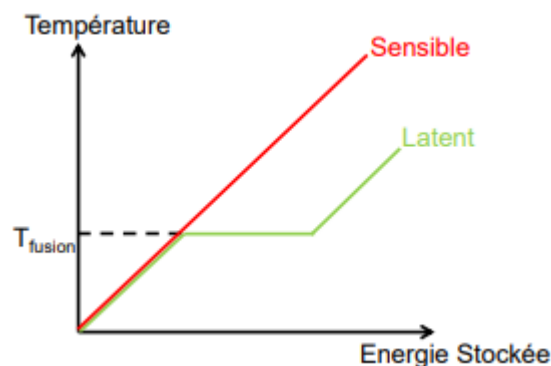


Figure 1.3 : Graphe de la température-enthalpie présentant l'énergie stockée dans un système de stockage latent en comparaison avec un système de stockage sensible. [9]

Lorsque le matériau est chauffé, il accumule d'abord une quantité d'énergie sensible lui permettant d'atteindre la température de changement de phase. A ce stade, l'énergie apportée au matériau cesse de le chauffer et est utilisée à la place pour accomplir le changement de phase. La chaleur est stockée de façon isotherme à condition que le corps soit pur sous forme de chaleur latente. Une fois que la transformation est complète, la température augmente de nouveau proportionnellement à l'énergie apportée jusqu'à atteindre la température de la source de chaleur. Il est donc impossible de ne stocker que la chaleur latente puisque pour arriver au point de changement de phase, le matériau doit subir une montée en température, stockant inévitablement une part d'énergie sensible. La quantité d'énergie stockée peut être exprimée pour le cas de la transition solide-liquide selon l'équation (1.4) :

$$E = \int_{T_1}^{T_2} m \cdot c_{p,s} \cdot dT + m \cdot \Delta L + \int_{T_1}^{T_2} m \cdot c_{p,i} \cdot dT \quad (1.4)$$

Avec :

E : est la quantité d'énergie stockée (J).

m : est la masse du matériau de stockage (kg).

$C_{p,s}$ et $C_{p,i}$: sont respectivement les chaleurs spécifiques des matériaux solide et liquide (J.kg-1.K-1).

ΔL : est l'enthalpie de changement de phase (J.kg-1).

dT : est la variation de la température durant l'étape de charge (K).

Les matériaux utilisés pour le stockage thermique latent sont connus sous le nom de Matériaux à Changement de Phase (MCP). Les MCP peuvent être employés pour leur transition solide-solide, solide-liquide ou liquide-gaz. [10]

1.3 Les matériaux à changement de phase :

1.3.1 Classification des matériaux à changement de phase :

La première classification des substances utilisables pour le stockage thermique par chaleur latente à états établie par Abhat [11]. Une revue spéciale sur les matériaux à changement de phase utilisés dans les bâtiments a été publiée par Cabeza [12] figure 1.4. Comme dit précédemment on peut les trier sous trois grandes familles, Chaque groupe se caractérise par une plage de température de fusion et une plage d'enthalpie de fusion.

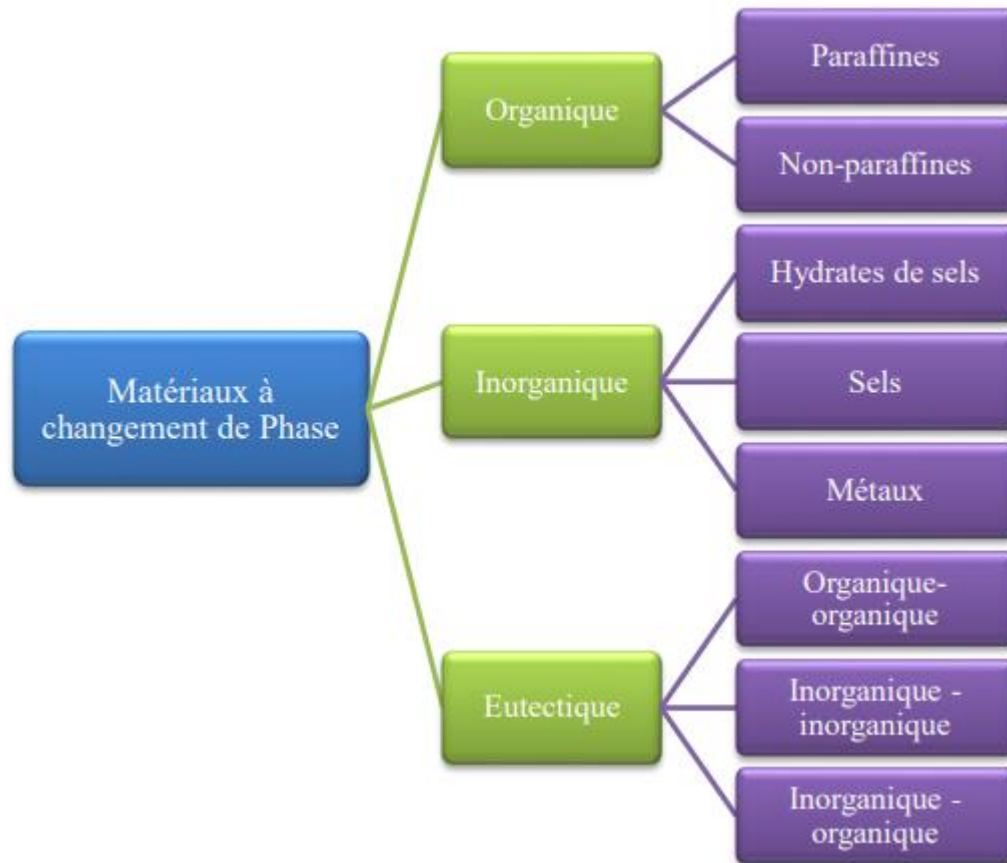


Figure 1.4 : Classification des MCP proposée par Abhat [11]

1.3.1.1 Les matériaux organiques

Dans cette famille, on peut trouver les paraffines, les acides gras, les alcools gras, les esters et les polyols. Les plus connus et utilisés sont les paraffines. Ce sont des alcanes avec une formule générale de C_nH_{2n+2} . Plus la longueur de la chaîne hydrocarbonée est élevée, plus la température de fusion et la chaleur latente sont grandes.

Ces matériaux présentent des enthalpies de changement de phase comprises entre 150 et 260 $J.g^{-1}$, et une capacité thermique variant de 2 à 2.3 $J.g^{-1}.K^{-1}$. Leur retrait volumique varie de 7% à 15% lors de la solidification. La densité énergétique des paraffines est de l'ordre de 2.10^5 $kJ.m^3$. Ces matériaux sont aussi non toxiques et proposent une large gamme de température de changement de phase allant jusqu'à 120°C. Ces produits sont largement disponibles dans le commerce. Cependant, leur majeur inconvénient, est leur faible conductivité thermique qui est de l'ordre de $0.2 W.m^{-1}.K^{-1}$, ce qui limite les transferts thermiques dans le milieu du stockage.

Les acides gras sont également largement étudiés. Ils proposent aussi une large gamme de température de changement de phase. Leur chaleur latente est du même ordre de grandeur que

celle des paraffines. Cependant, ils présentent un problème de stabilité thermique au-dessus du point de fusion. Ce problème est dû à la vaporisation du matériau quand il est liquide. Ceci est également observé pour les paraffines, mais moins significatif que les acides gras.

Les polyols, ou sucre alcools, peuvent présenter des densités énergétiques plus importantes par rapport aux paraffines et aux acides gras. Ils sont non toxiques et disponibles. Leur majeur inconvénient est un degré de surfusion élevé. Ceci signifie que lors de la cristallisation, le MCP peut rester liquide même en dessous de leur température de fusion. [13]

1.3.1.2 Les matériaux inorganiques

Les matériaux inorganiques sont regroupés en deux groupes : les métaux et les sels hydratés.

Les métaux sont utilisés pour des températures de fonctionnement pouvant atteindre 1000°C. Ils présentent l'avantage d'être de bons conducteurs thermiques, et d'avoir une chaleur latente élevée pouvant aller jusqu'à 750 J.g⁻¹. Néanmoins leur coût et les problèmes de corrosion freinent leur usage.

Les sels hydratés sont utilisables dans une large gamme de température, de 250 à 1700°C. Ces MCP présentent l'avantage d'une meilleure conductivité thermique (0.8 W.m⁻¹.K⁻¹) par rapport aux paraffines (0.2 W.m⁻¹.K⁻¹). Leur chaleur latente peut atteindre les 300 Jg⁻¹.. L'expansion thermique est plus faible en comparée aux matériaux organiques qui est de l'ordre de 7%. L'inconvénient majeur de ce type de MCP est leur surfusion, qui peut atteindre une centaine de degrés sur certains composés. Un autre point non négligeable est la corrosion avec les métaux, rendant la conception des réservoirs plus compliquée. [14]

1.3.1.3 Les matériaux eutectiques

L'eutectique est un mélange de deux ou plusieurs composants qui n'interagissent généralement pas pour former un nouveau composé chimique. Mais ces composés, à certaines proportions, inhibent le processus de cristallisation des composants, ce qui donne un système ayant une température de fusion inférieure à celle de ses composants.

- **Principaux avantages :**

- Ils ont un point de fusion net similaire à une substance pure
- Leurs chaleurs latentes volumétriques sont légèrement supérieures à celle des composés organiques purs.

- **Principaux inconvénients :**

- On a peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux.
- Ils sont peu utilisés au niveau des systèmes industriels. [4]

1.3.2 Transfert de chaleur par changement de phase lors de la fusion :

Le transfert de chaleur par fusion se produit dans différentes géométries et dans de nombreux domaines de l'ingénierie [15]. Pendant de nombreuses années, le transfert de chaleur par fusion a fait l'objet d'études expérimentales, analytiques et numériques, par conséquent la littérature qui concerne les phénomènes de fusion est volumineuse [16].

Les problèmes de changement de phase sont aussi souvent appelés problèmes de frontières mobiles ou problème de Stefan [11]. Et leur étude constitue l'un des domaines les plus passionnants et les plus difficiles de la recherche mathématique appliquée actuelle [17].

L'existence d'une frontière mobile signifie généralement que le problème n'admet pas de solution analytique simple à forme fermée. En effet, de nombreuses recherches se sont concentrées sur des techniques de solution approximative [15]. En général, les problèmes de changement de phase impliquent un phénomène transitoire et non linéaire avec une frontière liquide-solide en mouvement dont la position est inconnue a priori, ainsi que des problèmes d'écoulement associés à un fluide thermique.

En outre, les deux phases de MCP peuvent avoir des propriétés différentes et la configuration de l'unité SSECS peut varier avec les applications [18].

La conduction et la convection naturelle sont les mécanismes de transfert de chaleur dominants pendant le processus de changement de phase [19]. bien que la fusion par contact étroit joue un rôle important dans certaines configurations [20].

Classiquement, le problème de Stefan a d'abord été abordé comme une conduction pure dans un milieu semi-infini [21]. Et plus tard, la convection naturelle a été prise en compte lors de la fusion et la solidification des MCP. Les différentes classes de solutions disponibles pour le problème de Stefan sont analytiques et numériques. De nombreuses techniques analytiques approximatives telles que l'intégrale du bilan thermique, la technique de variation [22], la migration isotherme, la méthode de la source et du puits, et la solution périodique [23], ont été employées. Un inconvénient commun de ces techniques d'approximation est la limitation

à l'analyse unidimensionnelle, puisqu'elles ne peuvent pas être utilisées qu'en cas d'urgence, car elles deviennent très complexes lorsqu'elles sont appliquées à des problèmes multidimensionnels.

Les méthodes numériques, tant par différences finies [23] que par éléments finis [24] semblent plus performantes pour résoudre le problème des frontières mobiles. En général, une approche de maillage variant dans le temps [25] offre de la précision mais est limitée à des problèmes et des géométries simples.

L'approche de maillage fixe [26] dans laquelle la chaleur latente de fusion est généralement absorbée dans la chaleur spécifique, ou l'enthalpie du matériau beaucoup plus simple et pratique à utiliser.

Par conséquent, les formulations numériques largement utilisées jusqu'à présent sont les méthodes de l'enthalpie et de la capacité thermique effective. [17]

Dans la méthode enthalpique, l'enthalpie, qui est une fonction de la température, est considérée comme une variable dépendante avec la température. Ainsi, l'équation de conduction basée sur l'enthalpie est valable pour les phases solide et liquide. Il n'est donc pas nécessaire de suivre l'interface, ce qui rend cette formulation attrayante. [27]

Dans la méthode de la capacité thermique effective, la capacité thermique du MCP pendant le processus de changement de phase est introduite. La capacité thermique effective est directement proportionnelle à l'énergie stockée/libérée pendant le changement de phase et à la chaleur spécifique. Par conséquent, avec la capacité thermique effective, il est possible de décrire un changement de phase non isotherme dans le MCP.

Il est important de comprendre que les mécanismes régissant le transfert de chaleur peuvent être différents pour différents processus de changement de phase (fusion et solidification) et pour différentes configurations et orientations du système et des ailettes. La sous-section suivante présente une revue des travaux de recherche effectués sur ces différentes géométries.

Géométrie rectangulaire et géométrie sphérique

Les études numériques du SSECS rectangulaire peuvent être divisées en deux catégories : chaleur transférée par le bas et celle qui est transférée par le côté du système. [28], [29], [30]

La convection libre et la convection forcée ont attiré l'attention des chercheurs dans les études numériques SSECS. Hamdan a rapporté une étude numérique du transfert de chaleur

dans une enceinte rectangulaire chauffée d'un côté [31]. Dans la région fondue, le mode dominant de transfert de chaleur s'est avéré être la convection. Cependant, dans la zone très proche de la surface solide, la convection peut être négligée car la conduction est le mode dominant.

Une méthode par éléments finis combinée à une méthode primitive à grille fixe a été utilisée pour explorer la fusion dominée par la convection dans une cavité rectangulaire chauffée par le bas [29]. Il a été conclu que le taux de transfert de chaleur peut être amélioré de manière significative en inversant le récipient de MCP à un stade approprié du processus de fusion. Le nombre de Rayleigh et le nombre de Stefan ont eu des effets sur l'amélioration du transfert de chaleur dans l'étude de Gong. Dans l'étude de Sarris, un réservoir de stockage d'énergie avec MCP chauffé par une bande par le bas a été étudié numériquement. Il a été rapporté que le nombre de Rayleigh avait un effet significatif sur le transfert de chaleur et que le nombre de Nusselt était exprimé en fonction du nombre de Rayleigh, du rapport entre la largeur de la bande chauffée et la longueur du réservoir, et le nombre de Nusselt a été exprimé en fonction du nombre de Rayleigh du rapport entre la largeur de la bande chauffée et la longueur du réservoir, et du rapport d'aspect du réservoir [30].

De plus, la méthode des différences finies a également été appliquée pour l'étude numérique du SSECS. Il s'est avéré que la géométrie d'une cellule composite rectangulaire peu profonde convenait à des applications efficaces de protection thermique.

Plusieurs chercheurs ont étudié numériquement le SSECS en géométrie sphérique. Benmansour a développé une formulation bidimensionnelle de phases séparées dans une analyse numérique d'un SSECS à lit tassé cylindrique [32]. Veerappan a étudié le comportement de changement de phase d'un mélange MCP à l'intérieur d'enceintes sphériques afin d'identifier un matériau de stockage thermique approprié [33]. Ismail et Henriquez ont présenté une étude numérique de la solidification du MCP enfermé dans une enveloppe sphérique [34]. Il a été constaté que l'augmentation du diamètre de l'enveloppe sphérique entraînait un temps de solidification plus long.

Géométrie cylindrique

Par rapport à une géométrie rectangulaire, un conteneur MCP cylindrique peut être moins efficace dans certaines circonstances. Un modèle mathématique basé sur une formulation enthalpique a été développé par Zivkovic [28]. Il a été constaté que le récipient cylindrique nécessitait presque le double du temps de fusion par rapport à un récipient rectangulaire, qui avait le même volume et la même surface de transfert de chaleur. Il a été suggéré que des techniques d'amélioration du transfert de chaleur devraient être introduites dans le SSECS cylindrique en raison de la faible conductivité thermique du MCP.

Le mécanisme de transfert de chaleur a été étudié dans un échangeur de chaleur à tubes cylindriques avec MCP. Les résultats numériques ont montré qu'au début du processus, la chaleur était transférée par conduction de la paroi du tube au MCP en phase solide à travers une couche liquide relativement mince. Au fur et à mesure que la fusion progresse, la convection naturelle dans le liquide devient le mode de transfert de chaleur dominant [35].

Des modèles basés sur la première loi de la thermodynamique ont été développés dans des SSECS cylindriques. Un modèle numérique avec une formulation enthalpie-porosité étudiant la fusion du MCP dans un tube cylindrique a été réalisé par Shmueli [35]. Une méthode basée sur l'enthalpie a été employée par Esen et ses collègues [36] dans un réservoir cylindrique de stockage de chaleur latente faisant partie d'un système de chauffage domestique. Il a été signalé que le temps de fusion total du MCP dépendait non seulement des paramètres thermiques et géométriques, mais aussi des propriétés thermo physiques du MCP (la température et l'humidité).

L'unité de stockage de la chaleur latente à coquille et à tube a été discutée numériquement en détail par de nombreux chercheurs. Lacroix a développé un modèle théorique pour prédire le comportement transitoire d'une unité de stockage de chaleur à calandre et tube [37]. Ce problème de changement de phase a été résolu avec une méthode basée sur l'enthalpie. Gong [29] a présenté un modèle physique d'un SSECS à tube contenant du MCP. Les résultats numériques ont indiqué que l'introduction des fluides chauds et froids à partir de la même extrémité du système de stockage pouvait permettre d'obtenir un changement de phase. El-Dessouky, a développé une analyse de seconde loi pour divers MCP dans le SSECS [38], et le mélange eau-cire a été rapporté comme ayant la plus grande efficacité de seconde loi

1.4 Enoncé du mémoire :

Le premier chapitre était dédié pour, les définitions qui englobe l'application qu'on a réalisé, à citer la schématisation du système, les différents modes de stockage ainsi que les types des matériaux à changement de phase et en dernier lieu une brève présentation sur les études menées sur différentes géométries.

Le chapitre deux sera quant à lui dédié à la modélisation de l'étude, une présentation de la géométrie choisie et son dimensionnement ainsi que les matériaux utilisés, une description des procédés physique utilisé et montrer comment les équations qui régissent sur le phénomène de changement de phase et les conditions initiales et aux limites seront numériquement traiter en utilisant la méthode des éléments fini avec COMSOL multiphysiques.

Le troisième chapitre sera consacré en premier lieu à la définition du logiciel COMSOLmultiphysique puis en deuxième lieu aux traitements des résultats obtenu lors de la simulation et une interprétation des données obtenus, pour conclure avec des remarques pour les prochaines études.

CHAPITRE 2

GEOMETRIE DU MODELE ET

FORMULATION MATHEMATIQUE.

2.1 Introduction

Ce chapitre est dédié à la présentation détaillée de notre étude. Il mettra en évidence la géométrie et les matériaux choisis ainsi que les physiques utilisées et les formules mathématique résolus.

Les conditions initiales, aux limites et les équations seront aussi présentées. Finalement, le fonctionnement et le traitement numérique des fonctions mathématiques sur COMSOL multiphysics est montré.

2.2 La géométrie et les matériaux :

La géométrie utilisée est de forme cylindrique présentée dans la figure 2.1. Le système étudié dans ce travail est représenté par deux cylindres coaxiaux. Le premier cylindre, dont lequel l'eau circule, est en cuivre. Ses caractéristiques sont présentées dans le tableau 2.1. Le deuxième cylindre destiné à contenir le MCP (Acide stéarique) est en PMMA (Poly Méthacrylate de Méthyle).

Les tableaux 2.2 et 2.3 représente respectivement les caractéristiques et les propriétés des matériaux.

Dans le but d'avoir une fusion uniforme du MCP et augmenter le flux thermique dans l'enceinte, nous avons ajouté des ailettes en cuivre. La procédure effectuer est représentée dans la figure 2.1. Les ailettes sont placées dans le cylindre MCP d'une manière à créer des compartiments égaux.

❖ Géométrie

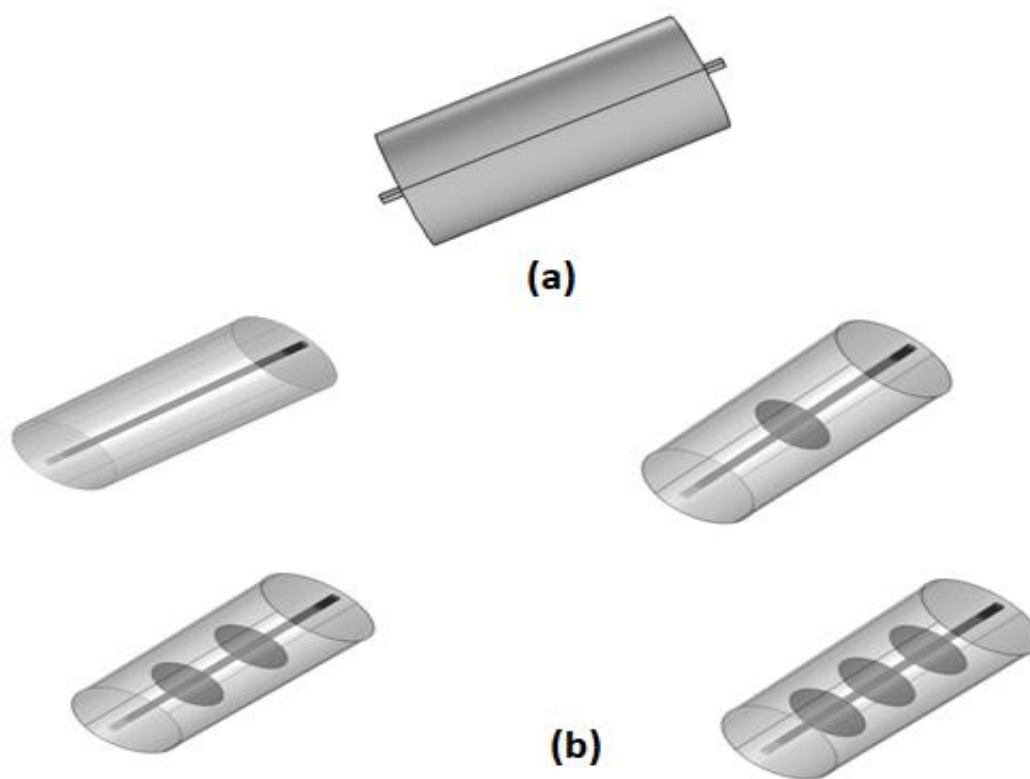


Figure 2.1 : (a) Géométrie du système ; (b) exemples de configuration des ailettes (de 0 à 3 ailettes)

	Matériels	Longueur (mm)	Rayon interne (mm)	Rayon externe(mm)	Epaisseur (mm)
Coque	Isolation	1000	220	223	3
Tube	Cuivre	1000	17	20	3
Ailette	Cuivre	-	160	-	3

Tableau 2.1 : géométrie et dimension des configurations étudiées.

❖ **Matériaux :**

➤ **Acide stéarique :**

Propriétés	Acide stéarique	
	Solide	Liquide
Densité (kg/m ³)	940.8	284.483
Conductivité thermique (W/m.K)	0.2	0.172
Chaleur latente (kJ/kg)	189.36(solidification)	190.47(fusion)
Chaleur spécifique (J/kg.K)	1250.1	2300
Viscosité dynamique (Pa.s)	-	0.009 à 72 C°
Expansion volumique (C ⁻¹)	-	0.00029
Température (C°)	50.42)	56

Tableau 2.2 : propriétés thermo physique de l'Acide stéarique.

➤ **PMMA et cuivre**

Propriétés	PMMA	Cuivre
Densité (kg/m ³)	940.8	8960 (20 C°)
Conductivité thermique (W/m.K)	0.17 (23 C°)	401
Chaleur spécifique (J/kg.K)	1320	380

Tableau 2.3 : propriétés thermo physique de PMMA et cuivre.

2.2.1 La sélection des ailettes :

L'épaisseur choisi pour les ailettes est de 3 mm pour assurer une certaine résistance à supporter le poids du MCP. Les ailettes traversent presque en entier le cylindre qui contient le MCP. L'étude sur les efforts exercer sur les ailettes ne rentre pas dans notre travail, l'accent est mis sur l'effet des ailettes sur l'amélioration du transfert de chaleur qui est l'objectif de notre travail.

2.3 Physique et interprétation mathématique :

Cette section présentera les quatre physique utilisée, écoulement d'un fluide laminaire, transfert de chaleur par conduction et par convection, changement de phase, écoulement non

isotherme ainsi que leurs équations mathématiques et les conditions initiales et aux limites dont on a besoin de résoudre pour chaque physique.

2.3.1 Ecoulement d'un fluide laminaire :

En considérant que le fluide est incompressible, les équations qui régissent le phénomène (dynamique des fluides) sont l'équation de Navier-Stokes et l'équation de continuité, deux équations qui doivent être résolues de manière simultanée afin de tenir compte de l'évolution de l'écoulement du fluide traité dans ce travail.

L'équation de continuité axisymétrique pour un écoulement incompressible est donnée par Deborah [39] :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) + \frac{\partial}{\partial z} (v_z) = 0 \quad (2.1)$$

Alors que les équations incompressibles axisymétriques de Navier-Stokes sont :

$$\rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} - \frac{v_r}{r^2} \right] + \rho g_r \quad (2.2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] + \rho g_z \quad (2.3)$$

2.3.2 Transfert de chaleur :

➤ Transfert de chaleur par conduction :

Dans un premier temps le transfert de chaleur dans le MCP se fait uniquement par conduction, puisque l'effet de la convection dans le MCP fondu est supposé être négligeable, en raison du faible volume du MCP dans les différents prototypes étudiés. Mais aussi du non déplacement du MCP d'un compartiment à un autre.

L'équation axisymétrique général de l'énergie dans les coordonnées cylindriques est :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (2.4)$$

Pour être résolu on introduit la condition initiale suivante :

$$T(r, z, t = 0) = T_0 \quad (2.5)$$

Quant aux conditions aux limites, chaque surface extérieure du système est isolée et doit respecter la condition suivante : $\frac{\partial T}{\partial \vec{n}} = 0$ où \vec{n} représente un flux normal à toute surface extérieure. Et le flux de chaleur à travers la surface intérieure (tuyau de cuivre) est déterminé par continuité à partir de la température du fluide qui est l'eau et qui est constante le long de la conduite.

➤ **Transfert de chaleur par convection dans le MCP :**

Pendant le processus de fusion, la chaleur est transférée de la paroi au matériau à changement de phase par conduction, puis par convection naturelle. En effet, lorsque la région solide s'éloigne de la surface de transfert de chaleur et que l'épaisseur de la région liquide augmente, les effets de la convection naturelle deviennent plus prononcés. L'influence de la convection naturelle sur l'emplacement du front de fusion est étudiée par Lamberg [17]. La fusion dans un stockage MCP semi-infini, avec une ailette interne, est étudiée analytiquement. Le modèle analytique a utilisé la solution bien connue de Newmann, qui suppose que la chaleur est transférée uniquement par conduction, en négligeant la convection naturelle [40]. Il a été constaté que, bien que la solution de Newmann soit exacte, elle sous-estime l'emplacement du front de fusion. De nouveau, Lamberg ont mené une étude numérique sur la fusion d'un MCP à l'intérieur d'une enceinte rectangulaire avec et sans l'effet de la convection naturelle [41], la dimension du stockage rectangulaire était de 96 mm de haut et de 20 mm de large. Les résultats ont été comparés aux résultats expérimentaux. Il a été observé à partir des résultats que lorsque l'effet de convection naturelle a été ignoré, le MCP a pris plus de temps pour atteindre la température maximale, ce qui montre la limitation de négliger la convection naturelle dans des compartiment MCP plus grands.

La convection est le processus de transfert de chaleur prédominant dans le fluide. L'équation énergétique qui doit être résolue dans ce cas est donnée par Deborah :

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \mu \Phi \quad (2.6)$$

Où $\mu \Phi$ représente la chaleur générée par la dissipation visqueuse, qui a un effet insignifiant dans le présent problème. Cette équation, couplée aux équations de Navier-Stokes et de continuité, doit être résolue en utilisant les conditions initiales et aux limites suivantes :

$$T(r, z, t = 0) = T_0 \quad (2.7)$$

$$T(r, z = 0, t) = T_{in} \quad (2.8)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \text{ (axial symmetry)} \quad (2.9)$$

2.3.3 Transfert de chaleur par changement de phase :

Lors de la fusion du MCP, l'énergie est stockée dans ce dernier. Il est donc important de tenir compte du processus de changement de phase qui a lieu au sein du MCP. L'équation générale pour le processus de transfert de chaleur par changement de phase à l'interface de fusion est donnée par Naterer [42] :

$$\rho L \frac{dX}{dt} = k_s \vec{\nabla} T_s - k_l \vec{\nabla} T_l \quad (2.10)$$

Où X désigne la position de l'interface solide-liquide. Pendant la fusion, à cette interface solide-liquide, le bilan énergétique exige que la différence entre le flux de chaleur dans les phases solide et liquide soit équilibrée par la chaleur latente absorbée pendant le changement de phase. Dans le système étudié, l'ensemble du MCP est initialement solide, et devient liquide lorsque sa température de fusion est atteinte.

2.4 Méthode numérique :

La méthode des éléments finis (MEF), ou analyse par éléments finis (AEF), est l'une des techniques de calcul numérique les plus populaires utilisées dans le domaine de l'ingénierie. Cette section décrit comment un logiciel d'éléments finis, COMSOL multiphysiques, est utilisé pour simuler les systèmes d'équations différentielles partielles linéaires et non linéaires dépendantes du temps (EDP) rencontrées dans la description physique du processus de fluide thermique trouvé dans le système étudié.

2.4.1 Modélisation numérique :

Après avoir créé la géométrie, dans ce cas un modèle axisymétrique 2D, des conditions initiales et aux limites sont appliquées aux différentes physiques, puis un maillage est créé en discrétisant le domaine de calcul en éléments de mailles contrôlé par la physique, c'est-à-dire en partitionnant la géométrie en petites unités de formes simples appelées éléments de mailles. Afin de simuler correctement le modèle d'éléments finis, on prend soin de sélectionner le pas de temps. Enfin, la simulation numérique est réalisée à l'aide de COMSOL Multiphysiques. Les équations de l'écoulement des fluides et du transfert de chaleur (conduction et convection) sont intégrées directement dans COMSOL multiphysiques, le logiciel résout donc ces systèmes

d'EDP non linéaires simultanément en appliquant les conditions initiales et aux limites dans chaque cas.

Dans les sous-sections suivantes on présentera les étapes suivies dans COMSOL multiphysiques, les paramètres et les fonctions ajoutés ainsi que celles qui sont intégrées dans le logiciel, les conditions initiales et les conditions aux limites.

➤ **Ecoulement laminaire :**

Est utilisé afin de calculer le champ de vitesse et de pression, comme mentionnée les équations résolues par l'interface sont les équations de Navier-Stokes définit comme suit sur COMSOL multiphysique :

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} &= \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mathbf{K}] + \mathbf{F} + (\rho - \rho_{ref})\mathbf{g} \\ \rho \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0 \\ \mathbf{K} &= \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \end{aligned} \tag{2.11}$$

Avec :

\mathbf{K} le tenseur de vitesse de déformation ou des taux de déformation

- Conditions initiales :

$$\text{Champs des vitesses : } \left\{ \begin{array}{l} u = 0 \\ v = 0 \end{array} \right\}$$

La pression : $P = 0$ avec une pression de référence $P_{ref} = 1 \text{ atm}$

$$\text{La gravité : } \left\{ \begin{array}{l} g_r = 0 \\ g_z = -9.81 \text{ m}^2/s \end{array} \right\}$$

- Conditions aux limites :

C.A.L à la paroi : avec la condition du non glissement de la paroi on a :

$$\mathbf{u} = 0$$

Contrainte ponctuelle de pression :

$$P = P_0$$

Avec $P_0 = 0$

Force volumique : est la force liée à la dilatation volumique d'un domaine fluide.

$$f_r = -f \cdot A_{mush} \cdot u \quad (2.12)$$

$$f_z = -f \cdot A_{mush} \cdot (-v_{-cast}) \quad (2.13)$$

Avec :

A_{mush} : est la constante de la zone molle qui qualifie la perte de vitesse dans la zone où a lieu le changement de phase

f : est le facteur de la force volumique (sans dimension) :

$$f = \frac{(1 - \alpha)^2}{\alpha^3 + \varepsilon} \quad (2.14)$$

Où

ε : est un nombre réel de faible valeur permettant d'éviter la division par zéro.

α : est la fraction de la phase liquide et son équation est :

$$\alpha = ht \cdot \alpha_{12} \quad (2.15)$$

u et v Représente respectivement la vitesse selon r et z :

$$u = 0 ; v_{-cast} = -1,6 \text{ mm/s} \quad (2.16)$$

Avec:

v_{cast} : la vitesse de coulée

➤ **Transfert de chaleur dans des fluides :**

Dans le transfert thermique l'équation générale qui régit sur le phénomène est :

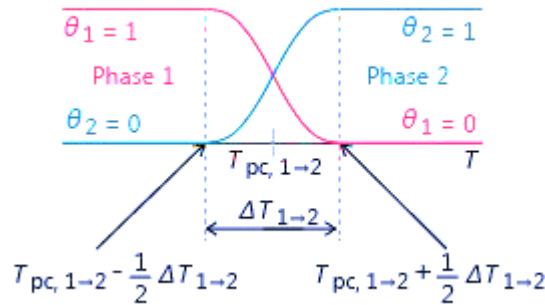
$$\begin{aligned} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} &= Q + Q_p + Q_{vd} \\ \mathbf{q} &= -k \nabla T \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\rho = \frac{p_A}{R_s T} \quad \text{Dans les domaines de gaz idéals} \quad (2.18)$$

On a ajouté le nœud fluide où on a sélectionné le sous nœud matériaux à changement de phase, l'équation intégrée dans COMSOLmultiphysique est :

$$\begin{aligned}
 \rho &= \theta_1 \rho_1 + \theta_2 \rho_2 \\
 C_p &= \frac{1}{\rho} (\theta_1 \rho_1 C_{p,1} + \theta_2 \rho_2 C_{p,2}) + L_1 \rightarrow 2 \frac{\partial \alpha_m}{\partial T} \\
 \alpha_m &= \frac{1}{2} \frac{\theta_2 \rho_2 - \theta_1 \rho_1}{\theta_1 \rho_1 + \theta_2 \rho_2} \\
 k &= \theta_1 k_1 + \theta_2 k_2 \\
 \theta_1 + \theta_2 &= 1
 \end{aligned}
 \tag{2.19}$$

Et voici l'esquisse qui interprète le phénomène de changement de phase via la fraction solide-liquide :



Figures 2.2 : schéma explicatif de transition de phase solide-liquide

On a ajouté deux sous nœud solide pour modéliser le transfert par conduction dans le cuivre et le PMMA et voici l'équation intégrée dans COMSOLmultiphysique :

$$\begin{aligned}
 \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} &= Q + Q_{ted} \\
 \mathbf{q} &= -k \nabla T
 \end{aligned}
 \tag{2.20}$$

- Les conditions initiales :

La valeur initiale de la température dans tout le système :

$$T = 293.15 \text{ K}$$

- Conditions aux limites :

Isolation thermique : est une condition à la limite pour tous transfert thermique isolé et cela veut dire que y'a pas de transfert thermique avec le milieu externe

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = 0$$

Température : la condition à la limite de la température se définit par :

$$T = T_0$$

$$T_0 = 339 \text{ K}$$

➤ **Interface Multiphysique :**

Cette interface est utilisée pour le couplage de deux physiques.

- Ecoulement non-isotherme :

Pour simuler des écoulements de fluides où les propriétés du fluide dépendent de la température l'usage de ce couplage résout la conservation de l'énergie, de la masse et de la quantité de mouvement dans les fluides et les milieux poreux et la conservation de l'énergie dans les solides.

$$Q_{vd} = \tau : \nabla \mathbf{u} \tag{2.21}$$

- Approximation de Boussinesq :

Dans le cas de notre configuration, la résultante des forces externes est limitée aux forces gravitationnelles de sorte que l'influence de la convection naturelle provoquée par des gradients de température soit évidente. Quand les forces de flottabilité se produisent dans l'écoulement, la conception des propriétés physiques fixes n'associe plus le comportement de l'écoulement du fluide. L'effet de la convection naturelle est pris en considération dans l'équation de quantité de mouvement par la variation de la masse volumique.

2.5 Le maillage :

Est contrôlé par la physique utilisée dans notre étude et on a défini la taille des éléments sur normal, la figure 2.3 illustre le maillage sur le modèle sans ailette construit avec COMSOL multiphysics :

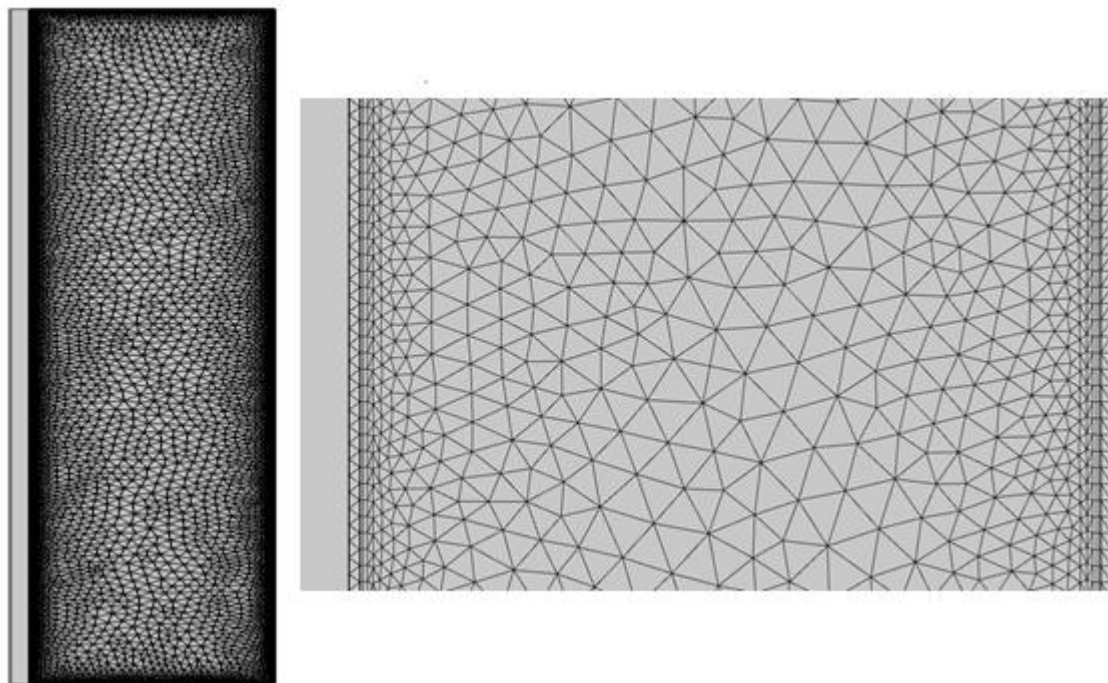


Figure 2.3 : *le maillage.*

CHAPITRE 3
RESULTATS ET DISCUSSION.

3.1 Introduction :

Dans ce chapitre, une solution numérique est développée par le logiciel COMSOLmultiphysics pour étudier le stockage d'énergie thermique par chaleur latente avec matériau à changement de phase, encapsulé dans une enceinte cylindrique. Cette étude est réalisée avec l'acide stéarique comme matériau à changement de phase.

Nous avons sélectionné plusieurs points répartis d'une manière uniforme dans le but de prélever les données de la température, la figure suivantes présente les coordonnées de chaque point.

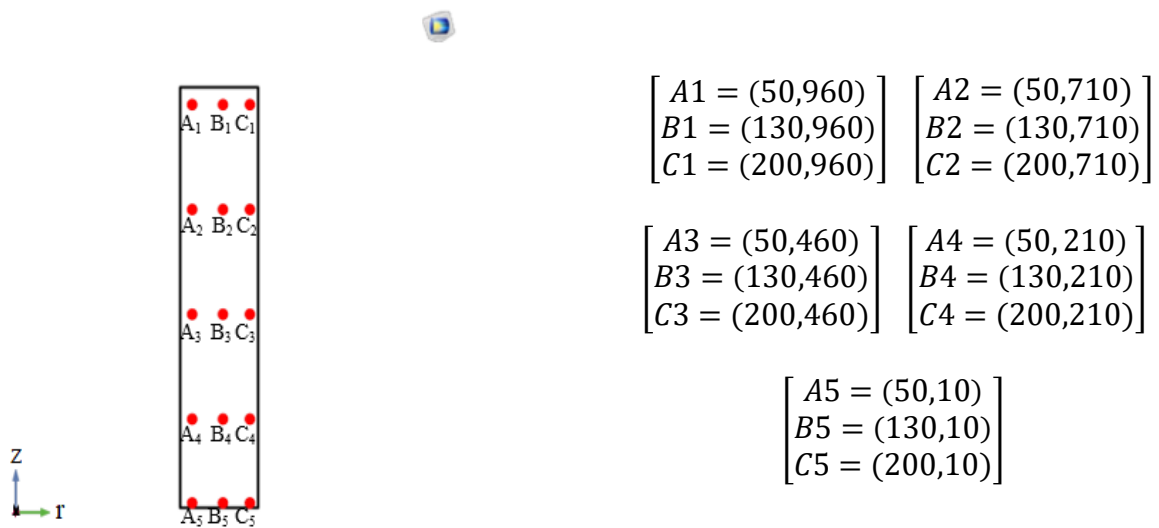


Figure 3.1 : représentation des points en coordonnées r et z.

Quatre configurations sont analysées dans la présente étude. Pour simplifier nous avons divisé l'étude en quatre parties suivantes :

- Le premier cas le cylindre avec MCP sans ailettes.
- Le deuxième cas le cylindre avec une ailette au milieu du canal.
- Le troisième cas le cylindre avec deux ailettes.
- Le quatrième cas le cylindre avec trois ailettes.

3.2 Analyse des résultats :

3.2.1 Progression du processus de fusion pour le cas sans ailette :

La figure 3-2 représente l'évolution de la fusion du MCP dans l'espace annulaire ainsi que la propagation de la température.

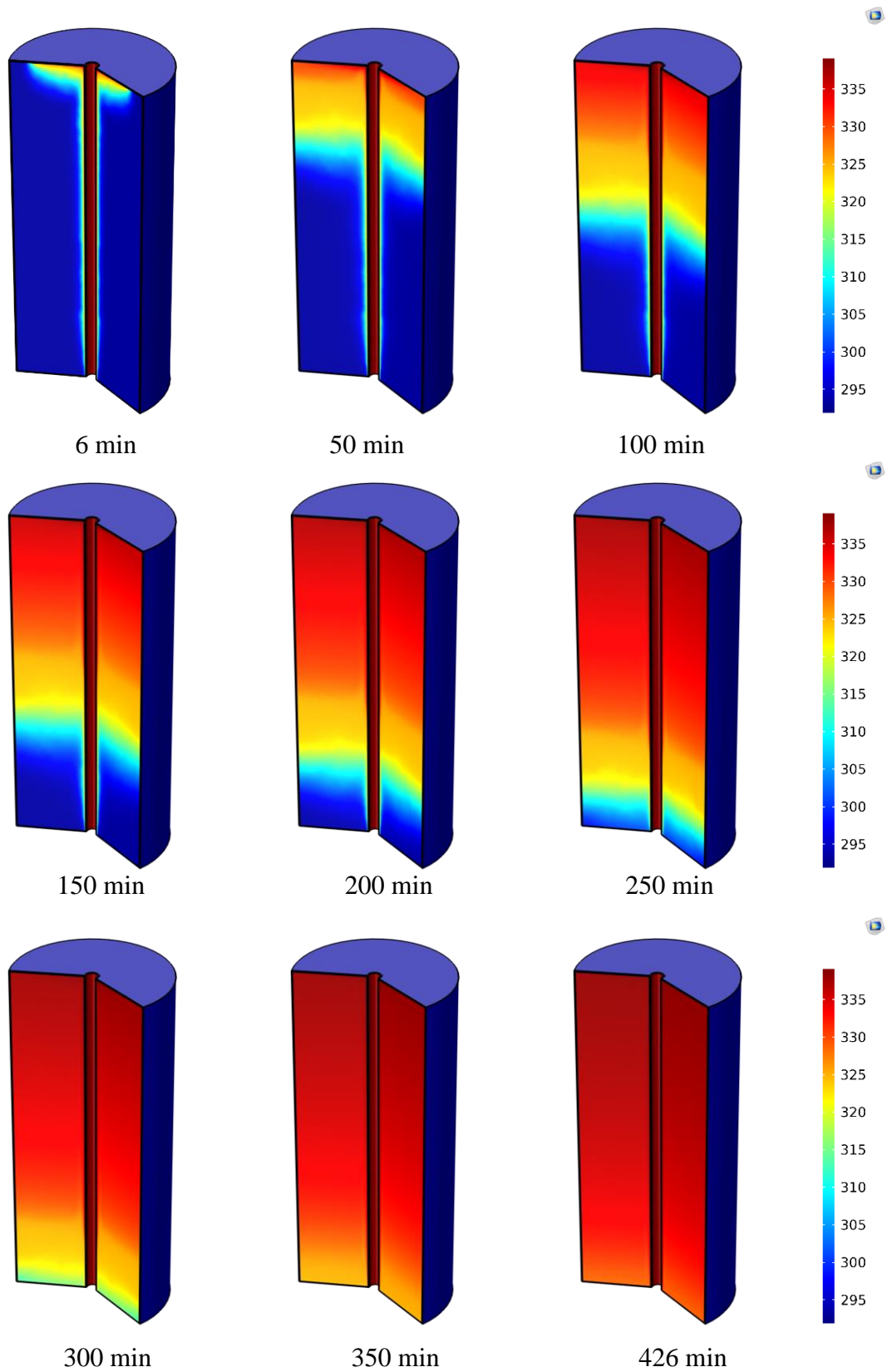


Figure 3.2 : *l'évolution transitoire de la fraction liquide pour le cas sans ailette.*

Dans cette première configuration sans ailettes, on remarque que la fusion est non uniforme dans toute l'enceinte. On constate que :

- La fusion se propage de manière verticale du haut vers le bas. Cela est due à la densité du MCP lors de la transition solide-liquide. En effet, la fraction liquide est plus légère monte vers le haut. Tandis que la fraction solide a tendance à descendre vers le bas sous l'effet de la gravité.
- En parallèle, on observe les deux modes de transfert thermique. A savoir, la conduction aux alentours de la parois interne ensuite la convection domine le long du processus jusqu'à la fusion complète à 426 minutes.

❖ **Graphique d'évolution de la température dans le modèle sans ailettes :**

Les graphes suivants présentent l'évolution de la température dans l'ensemble de la géométrie :

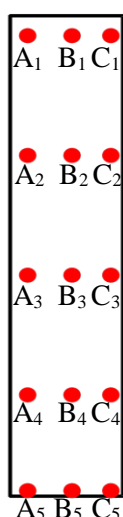


Figure 3.3 : points de référence

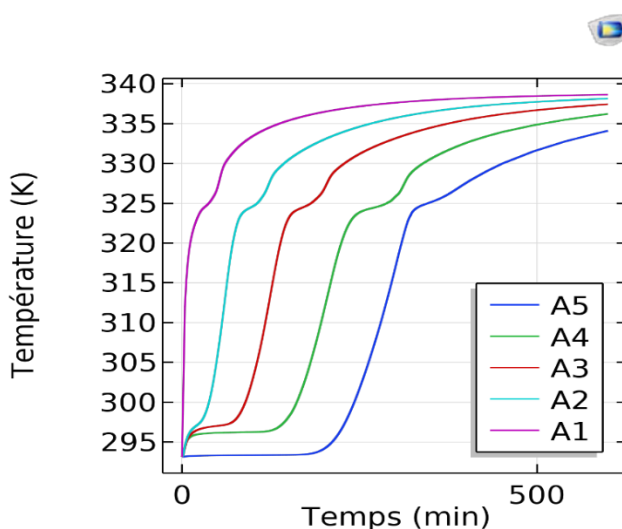


Figure 3.4 : évolution de la température configuration sans ailettes pour les points (A1, A2, A3, A4, A5).

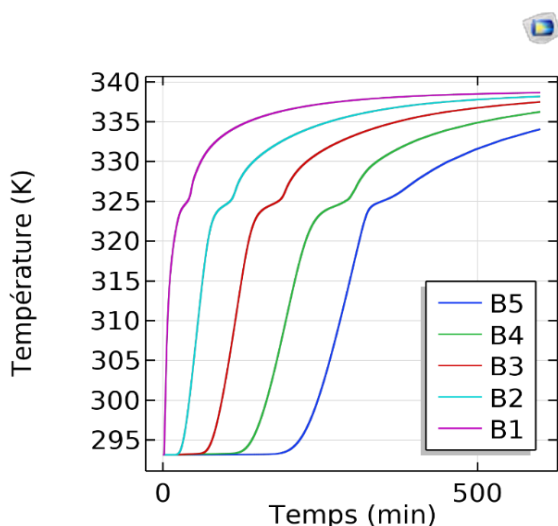


Figure 3.5 : évolution de la température configuration sans ailettes pour les points (B1, B2, B3, B4, B5).

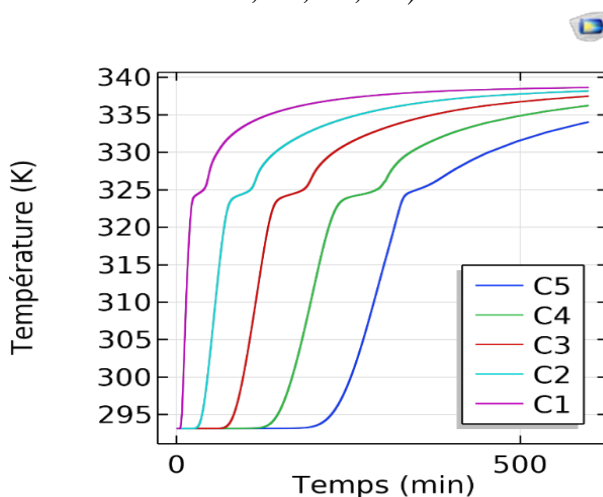


Figure 3.6 : évolution de la température configuration sans ailettes pour les points (C1, C2, C3, C4, C5).

- Les points A_1 B_1 C_1 : on remarque que la température augmente au début de la simulation plus rapidement par rapport aux autres points. Cela est due au comportement du processus de fusion expliquer précédemment. On déduit que le stockage thermique par chaleur sensible s'en cloche instantanément jusqu'à la température de fusion aux alentours de 323 K et puis reprend après la phase du stockage thermique par chaleur latente qui s'opère jusqu'à 326 K.
- Les points A_2 A_3 A_4 : on remarque une légère augmentation de la température lors des premières minutes cela s'explique par l'influence du flux de chaleur venant de la paroi interne. Puis, une certaine stabilité est observée à 296 K. ensuite, la température augmente pour atteindre le palier de changement de phase.
- Les autres points : l'évolution de la température dans les autres points s'opère presque de la même manière, à savoir une augmentation de la température jusqu'à 323 K (ce qui correspond au stockage par chaleurs sensible). Puis, la plage de température où le MCP change de phase est atteinte. On remarque que la température se stabilise de façon constante, puis recommence à augmenter jusqu'à atteindre la température imposée.

3.2.2 Modèle avec une seule ailette :

Après analyse du premier essai, nous avons remarqué que la fusion se propage de manière non uniforme. Alors, le MCP fond de façon non homogène dans toute l'enceinte. La figure 3.7 présente la progression de la fusion après avoir ajouté une ailette à la configuration initiale.

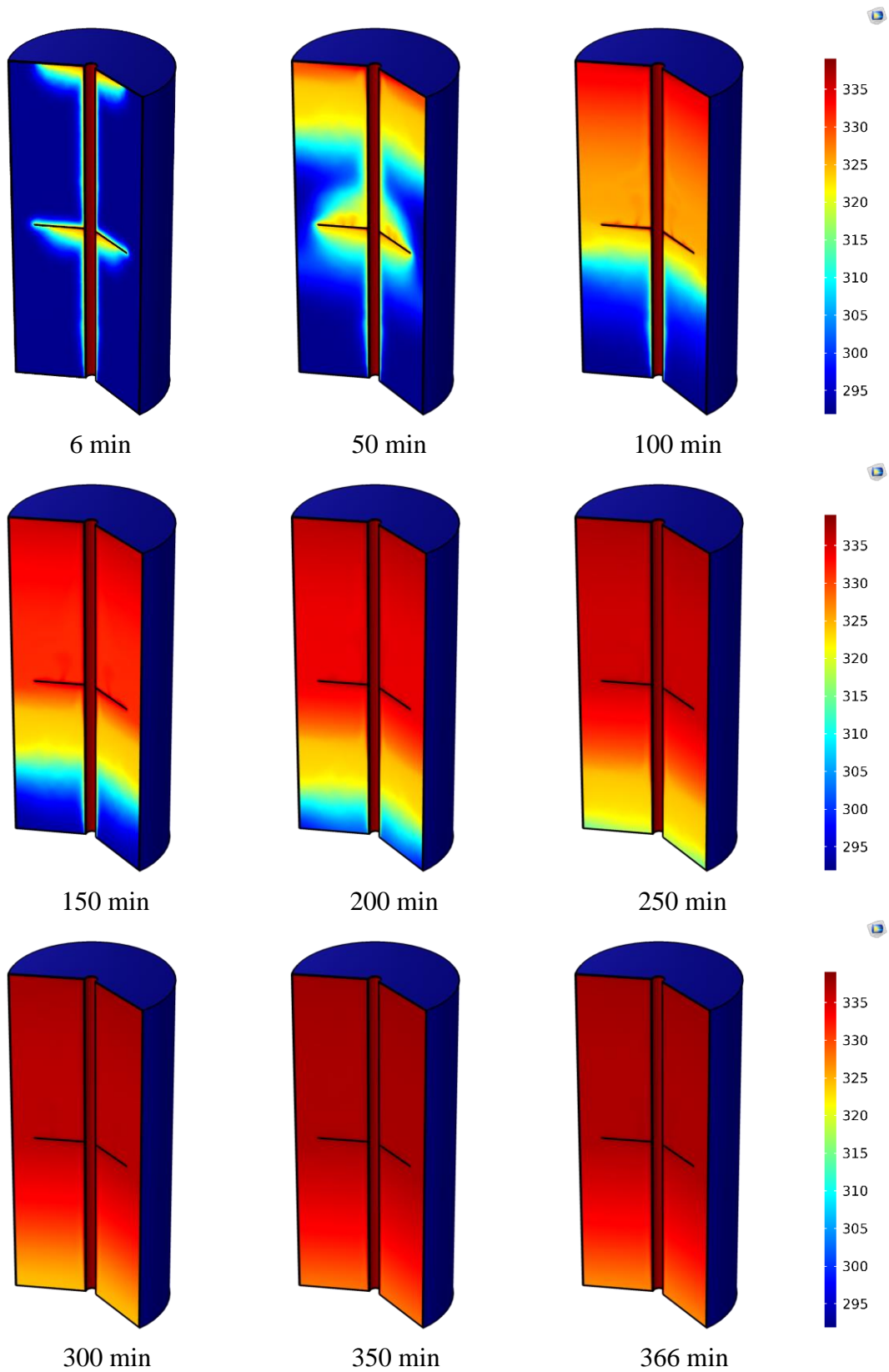


Figure 3.7 : *l'évolution transitoire de la fraction liquide pour le cas avec une seule ailette.*

Dans ce deuxième essai, on observe l'effet de l'ajout de l'ailette qui se traduit par la participation de cette dernière à la diffusion du flux thermique dans l'enceinte. Une réduction significative du temp de la fusion complète à 366 minutes est observée. Même avec l'ajout d'une seule ailette, la fusion reste non uniforme le long du cylindre.

❖ **Graphique d'évolution de la température dans le modèle avec une seule ailette :**

Les graphes suivants présente l'évolution de la température en fonction du temps :

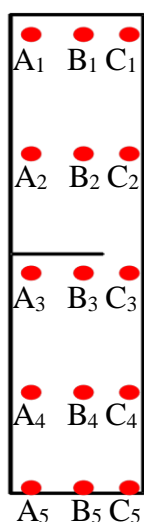


Figure 3.8 : points de référence.

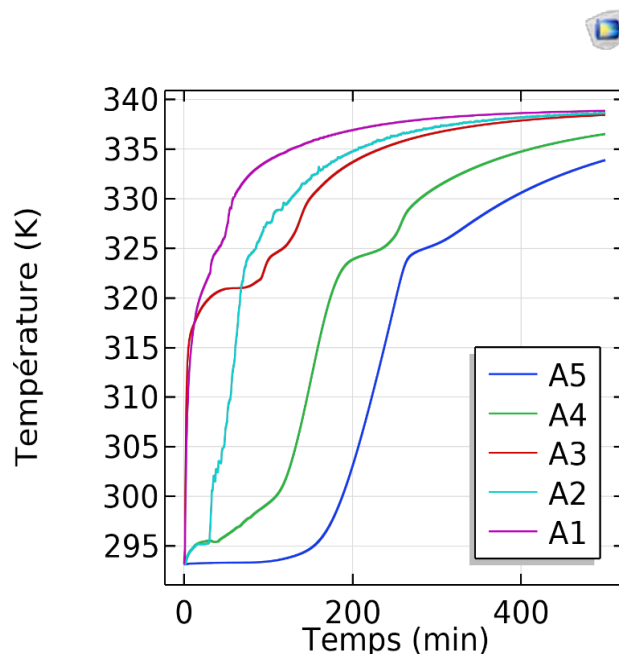


Figure 3.9 : évolution de la température configuration a 1 ailette pour les points (A1, A2, A3, A4, A5).

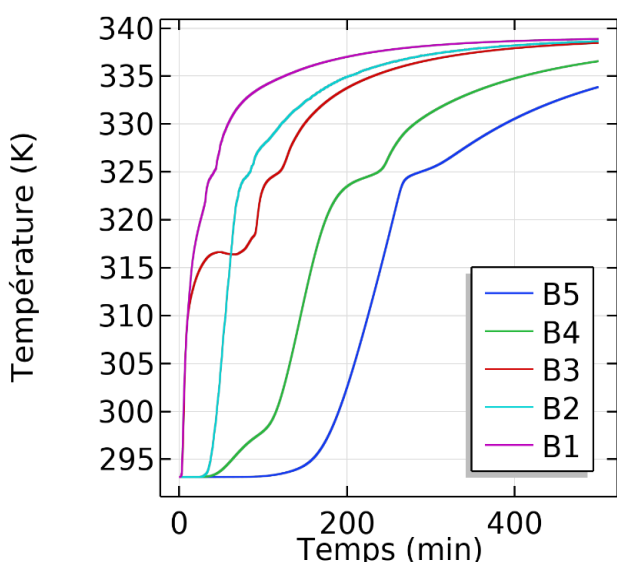


Figure 3.10 : évolution de la température configuration a 1 ailette pour les points (B1, B2, B3, B4, B5).

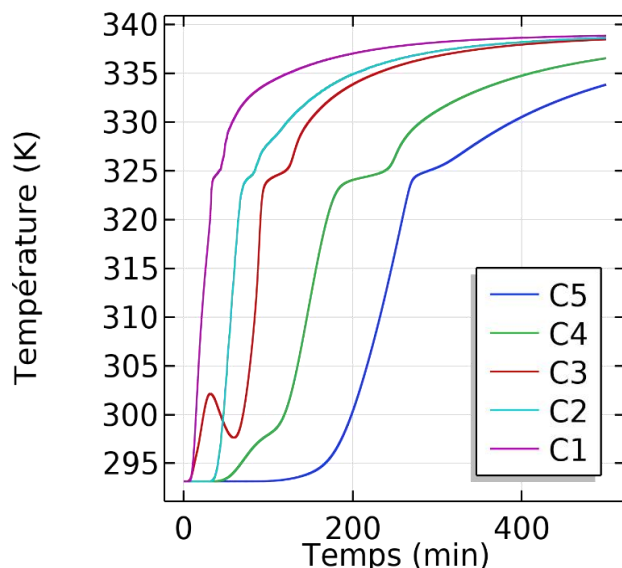


Figure 3.11 : évolution de la température configuration a 1 ailette pour les points (C1, C2, C3, C4, C5).

- Les points $A_1 B_1 C_1$: on constate une augmentation de la température rapide et direct dès le début de la simulation, cela se traduit par la monté de la fraction liquide vers le haut du cylindre.
- Les points $A_2 B_2 C_2$: la température au point A_2 se comporte comme les premiers points avec la différence des perturbations du flux de chaleur venant de l'ailette et de la paroi interne du cylindre sont importantes. Pour les points $B_2 C_2$, le profil de température évolue de la même manière, on peut expliquer cela par la progression du front de fusion qui touche les deux zones au même moment.
- Les points $A_3 B_3 C_3$: les courbes que forment la température en ces points sont soumis à des variations lors du stockage thermique par chaleur sensible. Cela est due, premièrement aux flux de chaleur circulant à travers l'ailette et deuxièmement à la fraction liquide qui se forme aux alentours et qui par la suite monte vers le haut. à $t = 100$ min, on constate que le stockage thermique par chaleur latente s'opère durant plus au moins 25 minutes pour laisser place au stockage par chaleur sensible dans la phase liquide.
- Les points au-dessous de l'ailette : le profil de température est le même pout tous les points. Cela est due au front de fusion qui progresse d'une manière homogène après avoir dépassé l'ailette.

3.2.3 Modèle avec deux ailettes :

Dans le but de réduire le temps de fusion du MCP, nous avons réalisé un troisième essai avec deux ailettes qui divisent l'espace annulaire en trois compartiments égaux.

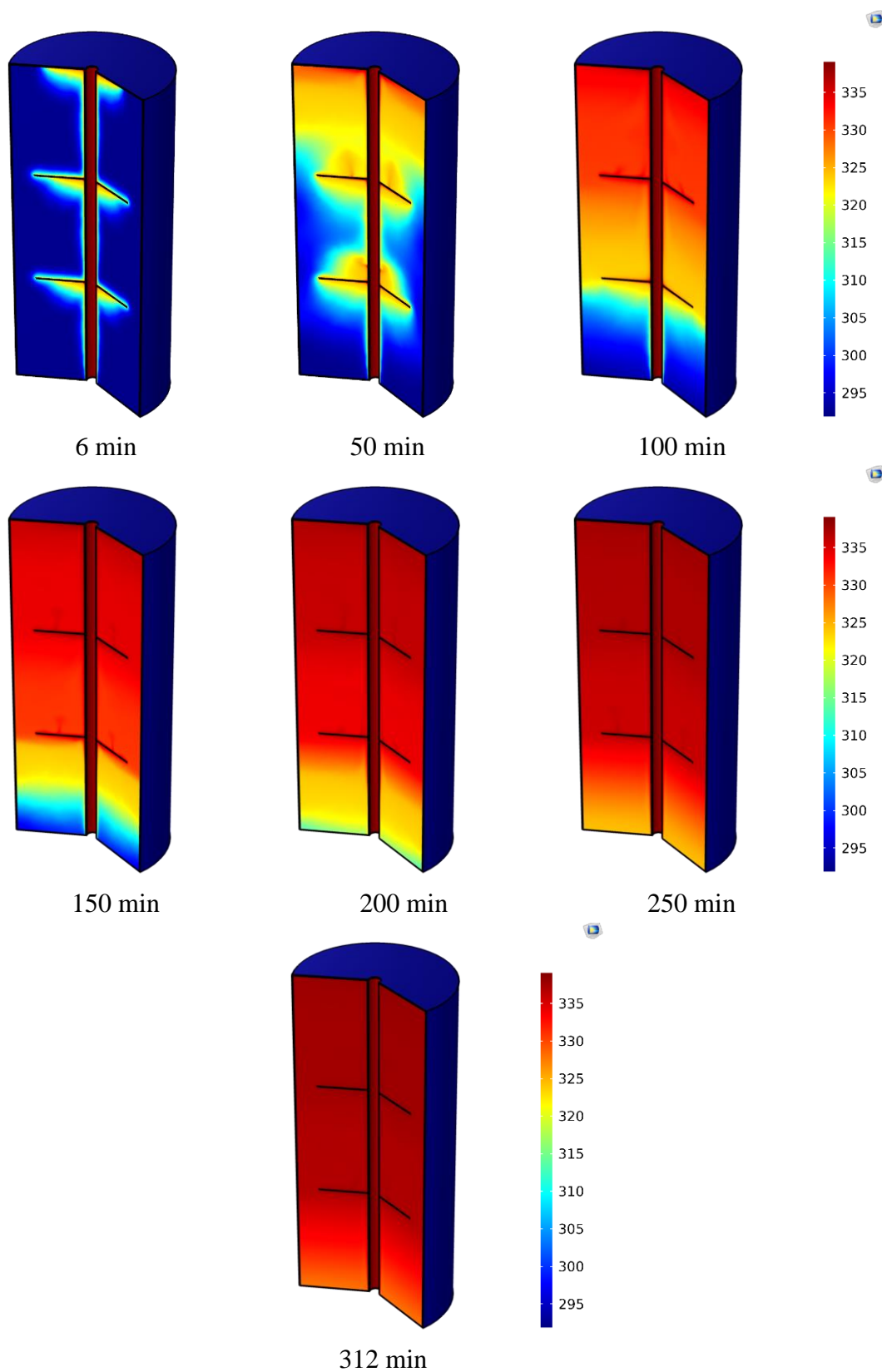


Figure 3.12 : *l'évolution transitoire de la fraction liquide pour le cas avec deux ailettes.*

Nous avons observé que le comportement de la fusion est similaire aux deux premiers essais. Par contre, la progression est nettement plus rapide. En effet on a obtenu une fusion complète à $t = 312$ min.

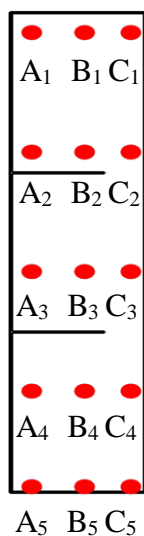


Figure 3.13 : points de référence.

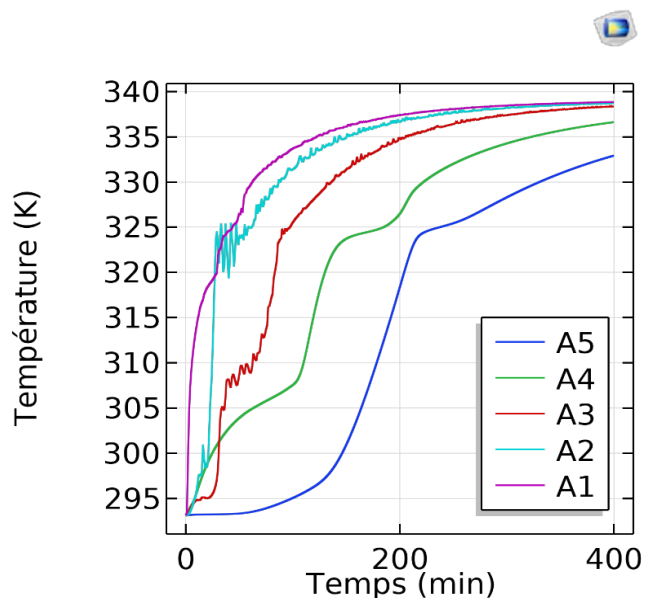


Figure 3.14 : évolution de la température configuration a 2 ailettes pour les points (A1, A2, A3, A4, A5).

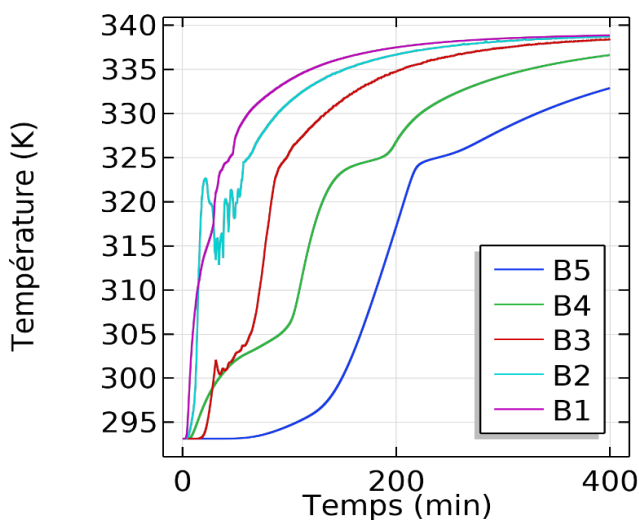


Figure 3.15 : évolution de la température configuration a 2 ailettes pour les points (B1, B2, B3, B4, B5).

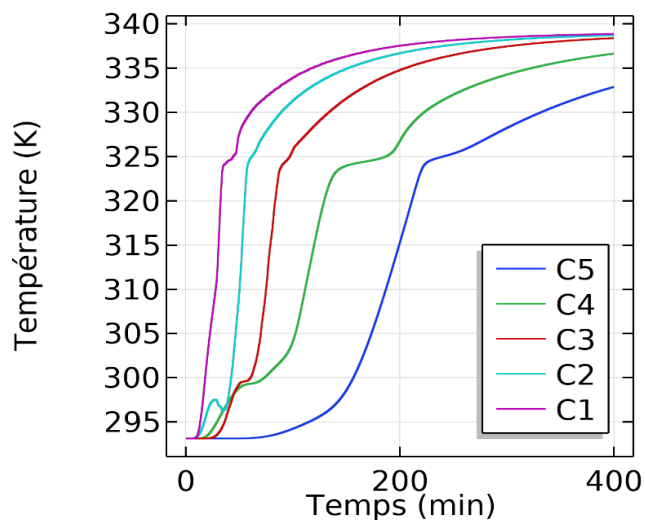


Figure 3.16 : évolution de la température configuration a 2 ailettes pour les points (C1, C2, C3, C4, C5).

❖ Interprétation des graphes :

- Les points A_1 B_1 C_1 : l'évolution de la température est plus au moins identique avec les essais précédents à part une légère perturbation au niveau du point A_1 due à la première couche de fusion qui se forme.
- Les points A_2 , A_3 , B_2 et B_3 : l'évolution de la température au niveau de ces points subit des perturbations, ce qui provoque une variation au cours du processus de stockage par chaleur sensible. Le MCP liquide monte vers le haut de l'enceinte (particules chaudes) et le MCP solide (particules moins chaudes) descend vers la partie inférieure de l'enceinte. Un stockage par chaleur latente est observé au niveau des points A_3 B_3 contrairement aux points A_2 et A_3 où les perturbations sont plus importantes due à leurs emplacements proches de l'ailette.
- Les autres points : les courbes au niveau des points restant présentent une certaine stabilité due à la progression homogène du front de fusion à partir de $t = 100$ min.

3.2.4 Modèle avec trois ailettes :

Cet essai est fait avec trois ailettes formant quatre compartiment, la figure 3.17 présente cette configuration et l'évolution de la température ainsi que le front de fusion du MCP.

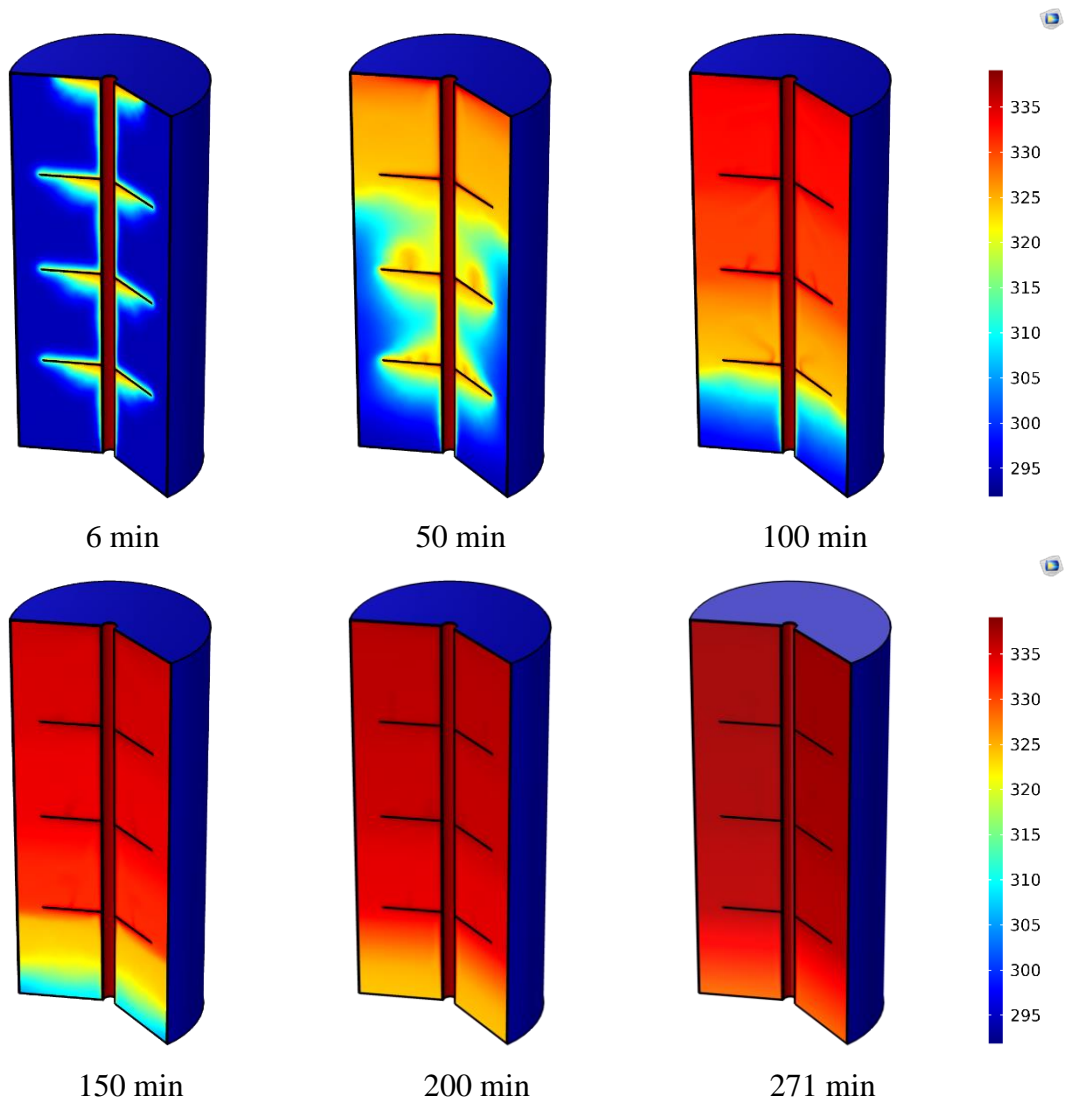


Figure 3.17 : *l'évolution transitoire de la fraction liquide pour le cas avec trois ailettes.*

On observe une réduction significative du temps de la fusion complète du MCP ($t = 271$ min).

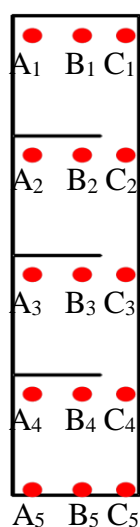


Figure 3.18 : points de référence.

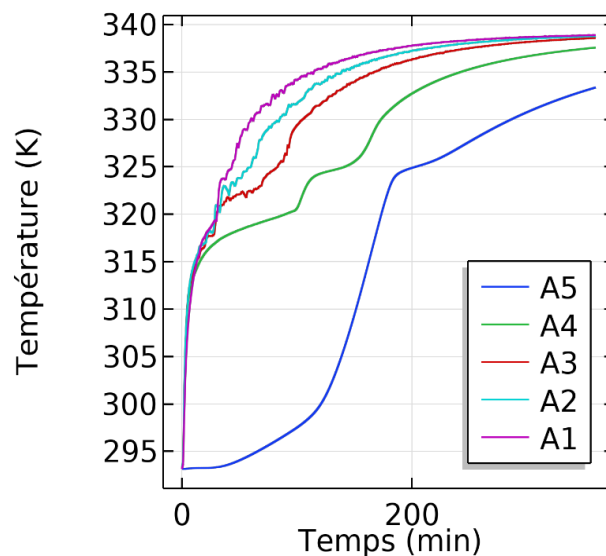


Figure 3.19 : évolution de la température configuration a 3 ailettes pour les points (A1, A2, A3, A4, A5).

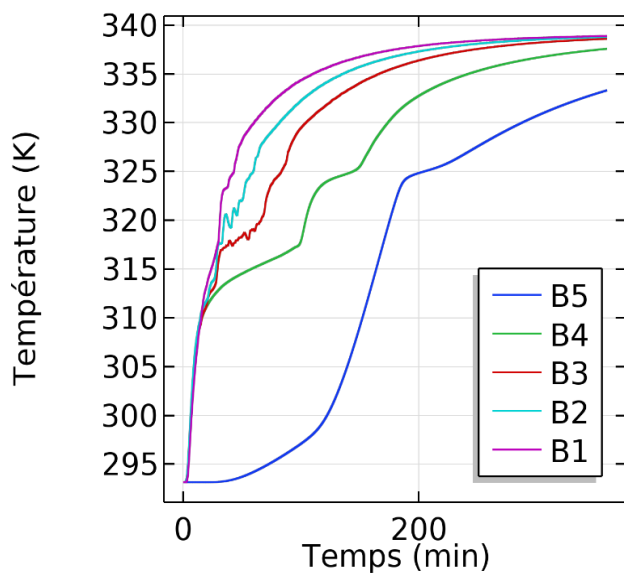


Figure 3.20 : évolution de la température configuration a 3 ailettes pour les points (B1, B2, B3, B4, B5).

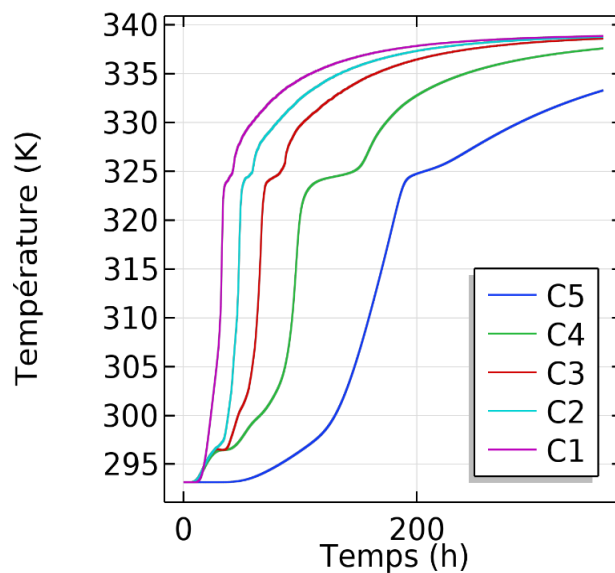


Figure 3.21 : évolution de la température configuration a 3 ailettes pour les points (C1, C2, C3, C4, C5).

❖ **Interprétation des graphes :**

- Les points A₁, A₂ et A₃ : les courbes des températures présentent des perturbations (le phénomène est expliqué précédemment), on distingue alors un léger stockage par chaleur latente au niveau du points A₃ due à la température qui devient de plus en plus uniforme.
- Les points B₁ B₂ B₃ : on constate que les courbes de température subissent des perturbations lors du stockage par chaleur sensible et se stabilisent lors du changement de phase et deviennent plus stable dans la phase liquide.
- Les autres points : les courbes que forme la température au niveau des points restant présente clairement les trois modes de stockage thermique.

3.3 La comparaisant des résultats des quatre configurations :

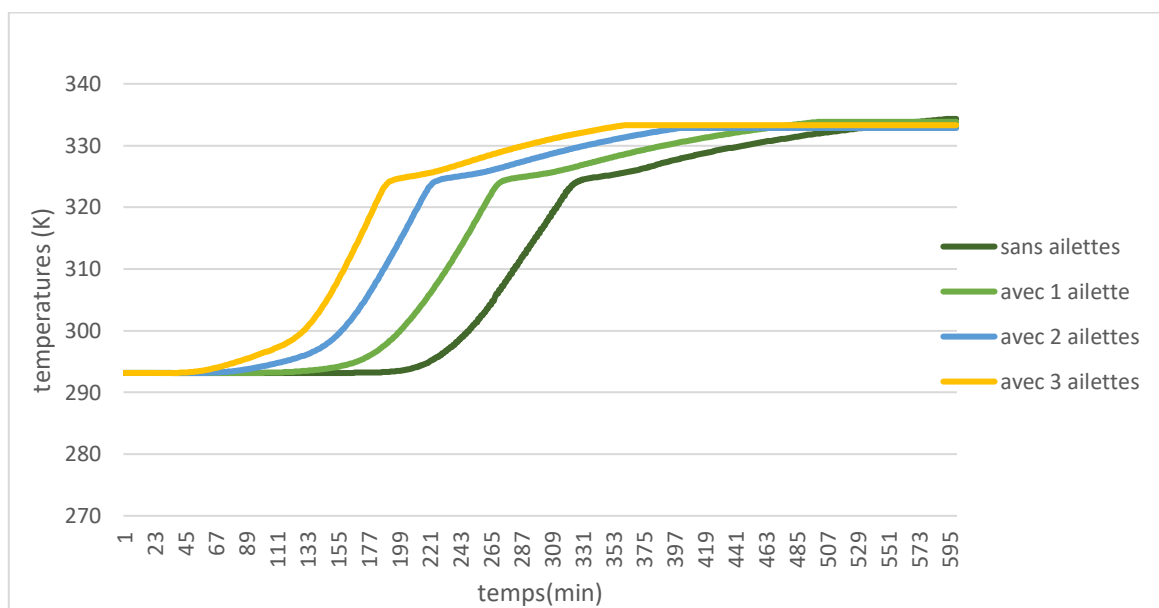


Figure 3.22 : *Graphe de comparaison de l'évolution de la température au point C5 pour les différentes géométries*

Les cas de l'étude	Stockage par Chaleur sensible en état solide	Stockage par chaleur latente	Stockage par chaleur sensible en état liquide
Sans ailette	A partir t=200mn	T= [330,370]	A partir t=370mn
Avec une ailette	A partir t=180mn	T= [269,309]	A partir t=309mn
Avec deux ailettes	A partir t=120 mn	T= [226,263]	A partir t=263mn
Avec trois ailettes	A partir t=70 mn	T= [188,226]	A partir t=226mn

Tableau 3.1 : *comparaison de l'évolution de la température au point C5 pour les différentes géométries.*

❖ **Interprétation :**

Afin de mieux visualiser le transfert thermique pour les quatre configurations, nous avons sélectionné le point C₅ comme point de comparaison en terme du temps de fusion pour les différents essais traités. Le choix de ce point revient à son emplacement dans le cylindre de stockage qui représente le point le plus éloigné de la source de chaleur et donc le dernier point du MCP qui atteint la fusion.

D'après la figure 3.22 et le tableau 3.1, on remarque que plus le nombre d'ailettes augmente plus le temps de fusion diminue. En effet, pour le cas sans ailettes, le stockage par chaleur sensible à l'état solide commence à $t = 200$ min. Pour le cas une seule ailette, ce temps est à $t=180$ min. pour deux ailettes, il est à $t = 120$ min. enfin pour le cas avec 3 ailettes le stockage commence à $t = 70$ min.

En ce qui concerne le stockage par chaleur latente, pour le cas sans ailettes, l'intervalle de stockage par chaleur latente est de $t = [330,370]$ min, pour le cas avec une ailette il est $t = [269,309]$ min, pour le cas avec deux ailettes il est de $t = [226,263]$ min, et pour le cas avec 3 ailettes il est de $t = [188,226]$ min.

Concernant le stockage par chaleur sensible en état liquide, pour le cas sans ailettes, le stockage commence à $t=370$ min pour le cas sans ailettes, à $t=309$ min concernant la deuxième configuration, à $t=263$ min pour le cas de deux ailettes, et enfin $t=226$ min concernant le quatrième cas.

Cette différence obtenue peut être expliquer par l'effet de l'ajout des ailettes servant à améliorer le transfert de chaleur dans le système de stockage. Ce qui permet un gain considérable sur le temps de fusion.

3.4 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié un modèle numérique pour le système de stockage d'énergie thermique par chaleur latente dans un cylindre MCP. Plusieurs simulations sont effectuées en ajoutant des ailettes pour étudier l'évolution de front de fusion du matériau à changement de phase et le stockage thermique par chaleur latente.

On peut conclure que l'ajout des ailettes joue un rôle important dans l'amélioration du transfert de chaleur d'une manière uniforme dans toute l'enceinte ce qui a permis une nette amélioration du temps de fusion du MCP.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons traité le problème de stockage d'énergie par chaleur latente avec un matériau à changement de phase qui est l'Acide stéarique dans un système cylindrique à l'aide du code de calcul COMSOL multiphysics pour une application de production d'eau chaude sanitaire.

Le travail effectué est composé de trois chapitres, le premier consacré à l'étude bibliographique qui nous a permis de conclure que cette application est très intéressante du point de vue optimisation énergétique, il est important de choisir le MCP adéquat afin d'obtenir des résultats satisfaisants pour de tel application.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les modèles réalisés dans COMSOL multiphysics à savoir deux tubes concentriques dont le MCP est inséré dans l'espace annulaire. Le nombre d'ailettes est variée d'une à trois dont le but d'augmenter le transfert de chaleur dans le MCP. Puis le matériau à changement de phase utilisé (acide stéarique) présente une plage de température très intéressante pour ce genre d'application. On a mis aussi l'accent sur les physiques utilisées ainsi que les équations gouvernantes. Cette approche nous a permis d'approfondir notre vision de résolution de problème.

Le chapitre trois, présente les résultats et discussions de la simulation numérique étudié à savoir le stockage d'énergie thermique par chaleur latente dans un matériau à changement de phase, encapsulé dans une enceinte cylindrique, une simulation réalisée sur le logiciel COMSOLmultiphysique. Afin d'étudier le processus de fusion du matériau a changement de phase qui est l'Acide stéarique et l'influence de l'ajout des ailettes sur l'amélioration de transfert de chaleur dans le système MCP.

Les résultats obtenus peuvent être résumées par les points suivants :

- L'ajout des ailettes améliore le transfert de chaleur et fait diminuer le temps de fusion du MCP.
- La fusion du matériau a changement de phase est dû au transfert thermique au voisinage du cylindre et les ailettes ajoutées

Références bibliographiques

- [1] BOUTAOUI Meriem (2016), mémoire du Magister, « Simulation numérique du stockage thermique par chaleur latente dans une capsule Elliptique », Université M'Hamed Bougara Boumerdes.
- [2] LAGHZAoui Amine (2013), PEERHOSSAINI Donia, « Stockage de chaleur : énergie solaire et autres applications », Ecole des mines de douai.
- [3] KévyN JOHANNES (2005), thèse doctorat, « Optimisation des installations solaires collectives d'eau chaude sanitaire : application des techniques « des faibles débits » et « du stockage divisé » », Ecole doctorale de l'Université de Savoie.
- [4] MECIEB Fatima Zohra (2020), thèse doctorat, « Analyse numérique et expérimentale du stockage d'énergie thermique latente solaire », Université Djilali Liabes de Sidi Bel Abbes.
- [5] K. Faraj, M. Khaled, J. Faraj, F. Hachem, and C. Castelain (2020), « A review on phase change materials for thermal energy storage in buildings: Heating and hybrid applications » Journal of Energy Storage, vol. 33.
- [6] MAHFOUDI Nadjiba (2016), Thèse doctorat, « stockage de la chaleur dans un milieu granuleux solide », université Mohamed Khider – Biskra.
- [7] A. Akrouche (2011), mémoire du Magister, « Etude du stockage et déstockage d'énergie dans un matériau à changement de phase », Université de M'Hamed Bougara -Boumerdes.
- [8] M. PIERRE PARDO (2013), Thèse de Doctorat, « développement d'un procédé de stockage d'énergie thermique haute température par voie thermochimique », université de toulouse.
- [9] H.Mehling et L.F.Cabeza, Heat and cold storage with PCM, Springer - Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [10] Adèle SOUPART-CARON (2005), Thèse de Doctorat, « Stockage de chaleur dans les Matériaux à Changement de Phase », université GRENOBLE ALPES.
- [11] ABHAT A. (1983) « Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials », Solar Energy Journal.
- [12] CABEZA « Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications », Applied Thermal Engineering.
- [13] Mariam JADAL, Thèse de doctorat, « Caractérisation thermique d'un échangeur–stockeur constitué d'un matériau à changement de phase dans une structure conductrice », université de NANTES.

- [14] M. M. Kenisarin, « High-temperature phase change materials for thermal energy storage », 2010.
- [15] KHILLARKA D.B., GONG Z. X. and MUJUMDAR A.S. (2000) « Melting of a phase change material in concentric horizontal annuli arbitrary cross section », *Applied Thermal Engineering Journal*, Vol. 20, pp. 893-912.
- [16] FUKUSAKO S. and YAMADA M. (1999) « Melting heat transfer inside ducts and over external bodies », *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 19, pp. 93-117.
- [17] LAMBERG P. (2003) « Mathematical modeling and experimental investigation of melting and solidification in a finned phase change material storage », *Doctoral Dissertation*, Department of Mechanical Engineering, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland.
- [18] GHASEMI B. and MOLKI M. (1999) « Melting of unfixed solid square cavities », *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 20, pp. 446-452.
- [19] ESAM M.A. (2004) « Phase change process with free convection in a circular enclosure: Numerical simulations », *Computer and Fluids Journal*, Vol. 33, pp.1335-1348.
- [20] GROULX, D. and LACROIX, M. (2006) « Study of close contact melting of ice from a sliding heated flat plate », *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 4407-4416.
- [21] LAUARDINI V.J. (1981) « Heat transfer in cold climates », Van Nostrand, New York, pp. 98-103.
- [22] CRANK J. and GUPTA R. (1995) « Isothermal migration in two dimensions », *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 18, pp. 1101-17.
- [23] LAZARIDAS, S. (1990) « A numerical solution of the multidimensional solidification (or melting) problem », *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 13, pp.1459-77.
- [24] ROLPH III W. and BATH E.K.J. (1982) « An efficient algorithm for analysis of nonlinear heat transfer with phase change », *International Journal of Numerical Methods Eng.*, Vol. 18, pp.119-34.
- [25] YIMER B., and ADAMI M. (1997) « Parametric study of phase change material energy storage systems for space applications », *Energy Conversion and Management Journal*, Vol. 38, pp. 253-262
- [26] YINGQIU Z., YINPING Z., YI J, and YANBING K. (1999) « Thermal storage and heat transfer in phase change material outside a circular tube with axial variation of the heat transfer fluid temperature », *International Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 121, pp. 145-149.
- [27] KIM C. J. and KAVIANY M. (1992) « A numerical method for phase-change problems with convection and diffusion », *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 35, pp. 457-467.

- [28] ZIVKOVIC B. and FUJI I. (2001) « An analysis of isothermal phase change of phase change material within rectangular and cylindrical containers », *Solar Energy*, Vol. 70, pp. 51-61.
- [29] GONG Z. and MUJUMDAR A. (1998) « A finite element model for convection dominated melting and solidification problem », *International Journal of Numerical Method of Heat Fluid Flow*, Vol. 4, pp. 393.
- [30] SARRIS I.E., LEKAKIS I. and VLACHOS N.S. (2004) « Natural convection in rectangular tanks heated locally from below », *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 3549- 3563.
- [31] HAMDAN M. A. and ELWERR F. A. (1996) « Thermal energy storage using a phase change material », *Solar Energy*, Vol. 56, pp. 183-189.
- [32] BENMANSOUR A., HAMDAN M.A. and BENGUEUDDACH A. (2006) « Experimental and numerical investigation of solid particles thermal energy storage unit », *Applied Thermal Engineering*, Vol. 26, pp. 513-518.
- [33] VEERAPPAN M., KALAISELVAM S., INIYAN S. and GOIC R. (2009) « Phase change characteristic study of spherical PCMs in solar energy storage », *Solar Energy*, Vol.83, pp.1245- 1252.
- [34] ISMAIL K.A.R. and HENRIQUEZ J.P. (2000) « Solidification of PCM inside a spherical capsule », *Energy Conversion and Management*, Vol.41, pp. 173-187.
- [35] 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*, Vol. 53, pp. 4082-4091.
- [36] ESEN M. and AYHAN T. (1996) « Development of a model compatible with solar assisted cylindrical energy storage tank and variation of stored energy with time for different phase change materials », *Energy Conversion and Management*, Vol.37, pp. 1775-1785.
- [37] LACROIX M. (1993) « Numerical simulation of a shell-and-tube: latent heat thermal energy storage unit », *Solar Energy*, Vol. 50, pp. 357-367.
- [38] EI-DESSOUKY H. and AI-JUWAYHEL F. (1997) « Effectiveness of a thermal energy storage system using phase-change materials », *Energy Conversion and Management*, Vol. 38, pp. 601- 617.
- [39] DEBORAH A. K. and MICHAEL K. J. (2005) « Introduction to Thermal and Fluid Engineering », John Wiley and Sons, New Jersey, pp. 420–436.
- [40] JEGADHEESWARAN S. and SANJAY D. P (2009) « Performance enhancement in latent heat thermal storage system: A review », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, pp. 2225–2244.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[41] LAMBERG P., LEHTINIEMI R. and HENELL A.M. (2004) « Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage », International Journal of Thermal Sciences, Vol. 43, pp. 277–87.

[42] NATERER G.F. (2003) « Heat Transfer in Single and Multiphase Systems », CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, pp. 356-389