

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Amar Telidji - Laghouat



Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique

THÈSE DE DOCTORAT LMD Génie Mécanique / Energétique

Etude Thermique des Performances d'un Echangeur de Chaleur à Section Elliptique pour le Stockage Thermique par Chaleur Latente

Mebrouk Benbrika

	Membre	Université
Président	Pr. Ahmed YOUSFI	Université Amar Telidji, Laghouat
Examineur	Pr. El-Hacène MEZAACHE	Université 20 Août 1955, Skikda
Examineur	Dr. Abdelghani LAOUER	Université Mohamed Seddik Benyahya, Jijel
Examineur	Pr. Ahmed MEDJELLED	Université Amar Telidji, Laghouat
Examineur	Pr. Said BOUABDALLAH	Université Amar Telidji, Laghouat
Directeur de thèse	Pr. Mohamed TEGGAR	Université Amar Telidji, Laghouat

2019-2020

RESUME

Vu leurs avantages en matière de stockage thermique, les matériaux à changement de phase (MCPs) reçoivent beaucoup d'attention, aussi bien dans l'industrie que dans la recherche scientifique. Le MCP peut être intégré dans des échangeurs de chaleur pour différentes applications telles que le stockage thermique, le chauffage solaire, le rafraîchissement, le transport des produits thermosensibles, etc.

Les chercheurs œuvrent constamment pour améliorer les systèmes thermiques afin de concevoir des systèmes rentables et efficaces dans surtout le respect de l'environnement. La géométrie d'encapsulation du MCP peut affecter considérablement les performances thermiques du MCP. Différentes géométries ont donc été étudiées (rectangulaire, cylindrique, sphérique ou autre) avec et sans ailettes pour étudier les processus de charge/décharge thermique du MCP (milieu du stockage). Or, les tubes à section circulaire ont été beaucoup étudiés tandis que les tubes à section elliptique ont en fait reçu moins d'attention, bien qu'ils puissent avoir de meilleures performances pour le stockage thermique. D'ailleurs, les MCPs ont généralement une faible conductivité thermique, ce qui réduit considérablement leurs caractéristiques de charge et de décharge thermique.

Donc, la dispersion de nanoparticules de haute conductivité thermique dans le MCP améliore la conductivité thermique effective du nanocomposite résultant.

Donc, cette étude vise à améliorer les performances d'un MCP dans un tube d'échangeur thermique. Les contributions de cette thèse se résument notamment en :

- Dans un premier temps, la fusion d'un MCP (n-eicosane) dans un échangeur de tubes à section elliptique est étudiée pour examiner l'effet de la géométrie du tube sur les caractéristiques thermiques du MCP. L'orientation du tube par rapport à la gravité reçoit alors une attention particulière.
- Ensuite, l'effet de l'insertion de nanoparticules à base de graphène dans un MCP (nano-MCP) est étudié dans un tube d'échangeur de chaleur.

Le modèle mathématique 2D utilisé dans cette étude est basé sur la méthode d'enthalpie-porosité ainsi que les techniques des volumes finis. Un logiciel commercial de calcul est utilisé pour résoudre les équations de conservation (continuité, mouvement et énergie). Les prédictions numériques sont validées par comparaison avec les résultats expérimentaux et ceux de référence (benchmark) disponibles dans la littérature.

Les résultats de la présente étude ont montré que les courants convectifs de flottabilité ont un effet considérable sur le taux de fusion dans les tubes elliptiques. Or, la convection de type Rayleigh-Bénard capturée dans l'enceinte elliptique horizontale a rendu la fusion du MCP plus rapide que dans le cas de l'enceinte elliptique verticale. De ce fait, un taux de fusion élevé et par conséquent une durée de fusion nettement réduite sont obtenus comparée à l'enceinte elliptique verticale. Par ailleurs, les résultats ont montré que la dispersion des nanoparticules (NPGs) dans le MCP (1-tetradecanol) permet de réduire la durée de décharge à hauteur de 50% tandis que le processus de charge a montré un comportement assez compliqué dans la mesure où une concentration élevée des nanoparticules tend à affaiblir la convection naturelle dans le MCP liquide à cause de l'augmentation de la viscosité du nanocomposite, ce qui rend donc les transferts thermiques et le processus de fusion plus lents.

Mots-clés: MCP, Tube elliptique, Fusion/Solidification, Nano-MCP, Echangeur de chaleur

ABSTRACT

Phase Change Materials (PCMs) are receiving much attention both in industry and research field due to their advantages for thermal storage. The PCM may be used in heat exchangers for different applications such as thermal storage, solar heating, free cooling, transportation of thermosensible products, etc. Investigators are continuously searching to improve thermal systems in order to design cost-effective and efficient systems and particularly with respect to the environment. The geometry of the PCM container can affect significantly the thermal performance of the PCM. Different geometries were investigated including rectangular, cylindrical, spherical and other shapes with and without extended surfaces to investigate the heat load/unload process of the storage medium (PCM). Tubes of circular section were extensively investigated while tubes with elliptic cross section received less attention in literature, although they may have better thermal performance for thermal storage.

Moreover, PCMs have usually low thermal conductivity which impairs their thermal charging and discharging characteristics. However, dispersion of nanoparticles in MCP enhances greatly the effective thermal conductivity of the resulted nanocomposite.

Therefore, this study is aimed to investigate:

- First, the PCM melting in an elliptic tube to examine the effect of the tube geometry on the thermal characteristics of the PCM. The focus is made mainly on the orientation of the elliptic enclosure in respect to gravity.
- Then, the phase change characteristics of a graphene based nano-enhanced PCM (NePCM) in a tube of a heat exchanger is examined.

The 2D mathematical model used in this study is based on the enthalpy-porosity method along with the finite control volume techniques. A computational code is employed to solve the conservation equations (continuity, momentum and energy). Numerical predictions are validated by comparison with experimental and benchmark results available in the literature.

Results showed that natural heat convective currents have a strong effect on the melting rate in elliptic tubes. The analysis of the results revealed that the elliptic orientation in respect to the gravity has a strong effect due to the flow field namely the Rayleigh-Bénard convection that appears in the horizontal elliptic enclosure. Higher melting rate and hence lower total melting time are obtained, compared to those of the vertical elliptic enclosure. Moreover, results showed that dispersion of Graphene nanoplatelets (GNPs) in PCM (1-tetradecanol) reduces the discharging time by up to 50% while the charging process showed complicated behavior regarding the increasing viscosity that tends to slow down the natural convection within the PCM melt and hence the fusion process is decelerated.

Keywords: PCM, Elliptic cylinder, Melting/Solidification, NePCM, Heat exchanger

ملخص:

تحظى المواد متغيرة الطور باهتمام كبير في مجال تخزين الحرارة. يمكن استخدام هذه المواد في المبادلات الحرارية في تطبيقات مختلفة مثل تخزين الطاقة الشمسية، التدفئة والتبريد... الخ. يسعى الباحثون باستمرار إلى تحسين النظام الحراري من أجل تصميم أنظمة فعالة من حيث التكلفة وصديقة للبيئة. يمكن أن يؤثر الشكل الهندسي لحاوية المواد متغيرة الطور بشكل كبير على الأداء الحراري. تم في الأديبات دراسة أشكال هندسية مختلفة بما في ذلك المستطيل والأسطوانة والكروي مع الأسطح الممتدة أو بدونها لفحص عمليات التخزين الحراري. تمت دراسة الأنابيب ذات المقاطع الدائرية بشكل مكثف، بينما لم تحظى الأنابيب ذات المقطع البيضاوي باهتمام كاف على الرغم من أنه قد يكون لها أداء أفضل للتخزين الحراري، علاوة على ذلك، عادة ما يكون للمواد متغيرة الطور معامل توصيل حراري منخفض مما يضعف وتيرة التخزين الحراري وكذا التفريغ. لذلك فإن إضافة جسيمات دقيقة (النانو) في المواد متغيرة الطور يعزز بشكل كبير معامل التوصيل الحراري للمواد الناتجة. لذلك تهدف هذه الدراسة إلى: -أولاً، دراسة ذوبان مادة متغيرة الطور في أنبوب بيضاوي لفحص تأثير الشكل الهندسي للأنبوب على الخصائص الحرارية لهذه المادة.

-كذلك فحص خصائص تغير الطور للمواد متغيرة الطور المحسنة باستعمال نانو- جزيئات للتخزين الحراري. يستند النموذج الرياضي ثنائي البعد المستخدم في هذه الدراسة على نموذج الطاقة الكامنة-المسامية إلى جانب تقنيات الحجوم المنتهية. كما تم استخدام برنامج حاسوب لحل معادلات النموذج الرياضي (الاستمرارية، كمية الحركة والطاقة). قمنا بالتحقق من صحة التنبؤات العددية من خلال مقارنتها مع النتائج التجريبية ومعايير القياس المتوفرة في دراسات سابقة.

أظهرت النتائج أن التيارات الحرارية للحمل الطبيعي لها تأثير قوي على ذوبان المواد متغيرة الطور. كما أظهرت نتائج التحليل أن الأنابيب البيضاوية الشكل تقدم مكاسب في الأداء الحراري، مع أن لموضع الاسطوانة البيضاوية تأثير قوي بسبب تأثير مجال التدفق بالحمل الحراري، إنَّ للأنابيب البيضاوية الأفقية معدل ذوبان أعلى وبالتالي انخفاض في وقت الانصهار الإجمالي مقارنة بالأنابيب البيضاوية العمودية. علاوة على ذلك، أظهرت النتائج أنَّ تضمين جسيمات النانو في المواد متغيرة الطور يقلل من وقت تفريغ الشحن بنسبة 50٪، بينما أظهرت عملية الشحن سلوكاً معقداً نظراً لتزايد اللزوجة التي بدورها تعمل على إضعاف الحمل الحراري والتقليل من التبادل الحراري مما ينجر عنه زيادة وقت الشحن الحراري.

الكلمات الدلالية: المواد متغيرة الطور، أنابيب بيضاوية، الانصهار/التجمد، المواد متغيرة الطور مع جسيمات النانو، المبادل الحراري

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier tout particulièrement mes très chers parents et frères.

*Merci pour leurs contributions et leurs présence quotidienne et
leurs conseils, merci de m'avoir toujours soutenu et
aidé durant ces longues années d'études.*

*Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à mon directeur de thèse Monsieur Mohamed TEGGAR
pour ses directives et encouragements précieux et ses soutien et suivi durant toute
cette période de réalisation de ce travail.*

*Mes remerciements s'adressent aussi à nos collaborateurs Pr. Kamal Abdel Radi Ismail de
l'université de Campinas (Brésil) et Pr. Muslum Arici de l'université de Kocaeli (Turquie) qui ont
contribué à nos travaux de thèse sans oublier mon collègue M. Mohammed Benbelhout.*

*Que les membres du jury Pr. Yousfi, Pr. Mezaache, Dr. Laouer, Pr. Medjelled et Pr. Bouabdallah
trouvent ici mes sincères remerciements d'avoir jeté un regard critique sur notre modeste travail,
merci pour votre temps ainsi que pour vos commentaires.*

*Je finirais en remerciant toutes les personnes
qui ont eu le bonheur (ou le malheur !) de croiser ma route.*

*peut-être que sans le savoir,
d'un seul regard, d'un seul mot, ils ont changé ma vie.*

Alors, à vous tous, MERCI.

Sommaire

Résumé

Remerciements

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Introduction générale 1

Chapitre 1: Matériaux à changement de phase et leurs applications

1.Nécessité et avantages des systèmes de stockage d'énergie 4

2.Types de systèmes de stockage thermique 6

2.1. Système de stockage de chaleur sensible

2.2. Système de stockage de chaleur latente 7

2.3. Systèmes de stockage thermochimique

2.4. Système de stockage combiné 8

3.Matériaux de stockage d'énergie thermique 9

3.1. Matériaux de stockage de chaleur sensible 10

3.2. Matériaux à changement de phase

4.Applications des systèmes de stockage d'énergie thermique 13

4.1. Chauffage solaire

4.2. Applications dans le bâtiment 14

4.3. Transport des matériaux sensibles à la température

4.4. Réfrigération et conditionnement d'air 15

4.5. Abris de télécommunication 17

4.6. Récupération de la chaleur résiduelle

4.7. Automobiles 18

4.8. Chauffage des serres agricoles	19
-------------------------------------	----

Chapitre 2: Recherche bibliographique

1. Etudes de la fusion du MCP	21
2. Changement de phase dans une cavité cylindrique	25
3. Changement de phase dans une cavité elliptique	30
4. Effet des nanoparticules dispersées dans le MCP	33

Chapitre 3: Modélisation numérique et validation

1. Modélisation mathématique	44
2. Procédure numérique	47
3. Validation numérique	52
3.1. Comparaison avec le modèle de Hannoun et al. [51]	
3.2. Comparaison avec les résultats expérimentaux de Assis et al. [18]	53

Chapitre 4: Etude du changement de phase dans un échangeur tubulaire

1. Introduction	56
2. Modèle physique	
3. Résultats et discussions	58
3.1. Distribution de température	59
3.2. Fractions liquides et les lignes de courant	61
3.3. Evolution de la fraction liquide	64
3.4. Durée de fusion complète du MCP	65
4. Conclusion	67

Chapitre 5: Etude de la fusion d'un MCP dans un échangeur tubulaire à section elliptique

1. Introduction	70
2. Modèle physique	71
3. Résultats et discussions	72

3.1.	Distribution de température	
3.2.	Lignes de courant	76
3.3.	Fractions liquides	81
3.4.	Durée de fusion complète	82
4.	Conclusion	84

Chapitre 6: Nano-amélioration d'un échangeur tubulaire à chaleur latente

1.	Introduction	86
2.	Modèle physique	87
3.	Résultats et discussions	88
3.1.	Mode de décharge	89
3.2.	Mode de charge	94
4.	Conclusion	103
	Conclusion générale	105

Références bibliographiques

Liste des figures

Figure 1.1 : Système de stockage combiné	9
Figure 1.2 : Classification des matériaux à changement de phase	12
Figure 1.3: Réservoirs d'un système de stockage installée à Tidel Park (Inde)	17
Figure 3.1 : Optimisation numérique (1 ^{ère} configuration)	49
Figure 3.2 : Optimisation numérique (2 ^{ème} configuration, inclinaison 0°)	50
Figure 3.3 : Optimisation numérique (2 ^{ème} configuration, inclinaison 90°)	51
Figure 3.4 : Comparaison des prédictions avec les résultats de Hannoun et al. [31]	53
Figure 3.5: Comparaison avec les résultats expérimentaux d'Assis et al. [8]	54
Figure 4.1 : Représentation du problème de fusion du MCP dans une cavité circulaire	57
Figure 4.2 : Distribution de température à différents instants pour $h=100 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	60
Figure 4.3 : Distribution de température à différents moments pour $h=25 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	61
Figure 4.4 : Fractions liquides et lignes de courant pour $h=100 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	63
Figure 4.5 : Fractions liquides et lignes de courant pour $h=25 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	64
Figure 4.6: Évolution de la fraction liquide avec le temps pour $h=100 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	65
Figure 4.7: Durée de fusion complète en fonction du coefficient de convection de chaleur	66
Figure 5.1: Schéma de la cavité elliptique remplie de MCP	71
Figure 5.2: Distribution de températures pour deux inclinaisons 0° et 90° du tube elliptique	75
Figure 5.3: Lignes de courant et fractions liquides pour les inclinaisons de 0° et 90°	79
Figure 5.4 : Lignes de courant et fractions liquide pour $h = 25 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	80
Figure 5.5 : Evolution de la fraction liquide moyenne pour $h = 100 \text{ W. m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	83
Figure 5.6 : Variation de la durée de solidification avec le coefficient d'échange	83
Figure 6.1: Représentation du Nano-MCP encapsulé	87
Figure 6.2 : Evolution des températures sur les points A, B et C	91
Figure 6.3 : Evolution de la fraction liquide pendant le temps de décharge	92

Figure 6.4 : Durée de solidification en fonction des concentrations massique des NPGs	93
Figure 6.5 : Variation de l'énergie libérée lors de la décharge	94
Figure 6.6 : Variations des températures sur les points sélectionnés A, B et C	96
Figure 6.7 : Contours de températures pour la concentration NPGs de 0%	97
Figure 6.8 : Contours de température pour la concentration NPGs de 0.5%	97
Figure 6.9 : Fraction liquide en fonction du temps pour les différentes concentrations	99
Figure 6.10 : Durée de charge pour les différentes concentrations soigneusement choisie pour améliorer les performances thermiques du nanocomposite.	101
Figure 6.11 : Evolution de l'énergie stockée en fonction du temps pour les échantillons nano-MCP pendant le processus de charge.	101

Liste des tableaux

Tab. 3.1: Propriétés thermophysiques de la paraffine RT27 [18]	54
Tab. 4.1: Propriétés thermophysiques du MCP (n-eicosane) [24]	58
Tab. 6.1: Propriétés thermophysiques du nano-MCP (NPGs- $C_{14}H_{30}O$) [17]	88

Nomenclature

a	Axe majeur de la cavité elliptique, m
b	Axe mineur de la cavité elliptique, m
C_p	Chaleur massique, $J.k^{-1}.kg^{-1}$
D	Diamètre du tube, m
g	Accélération de la pesanteur, $m.s^{-2}$
H	Enthalpie spécifique, $J.kg^{-1}$
h	Coefficient de convection, $W.m^{-2}.k^{-1}$
k	Conductivité thermique, $W.m^{-1}.k^{-1}$
L	Chaleur latente, $J.kg^{-1}$
m	Masse, kg
S	Terme source
T	Température, K
t	Temps, s
u, v	Composantes de la vitesse, m

Symboles grecs

β	Coefficient d'expansion thermique, K^{-1}
λ	Fraction liquide
μ	Viscosité dynamique, $pa.s$
ν	Viscosité cinématique, $m^2.s^{-1}$
ρ	Masse volumique, $kg.m^{-3}$
Φ	Fraction massique de nanoparticules
ϑ	Vitesse, $m.s^{-1}$

Indices

f	Fusion
HTF	Fluide caloporteur
i	Initiale
l	Liquide
s	Solide
w	Paroi
0	Référence

Introduction générale

L'énergie est l'une des principaux besoins de la communauté humaine dans le monde entier. La demande d'énergie augmente régulièrement et atteindra probablement des niveaux de plus en plus élevés à mesure que les populations et les économies se développeront.

Le profil de la demande d'énergie dans les secteurs commercial, industriel et des services publics varie quotidiennement, hebdomadairement et de façon saisonnière. Les unités de stockage d'énergie peuvent de ce fait être utilisées avec des systèmes de gestion de l'énergie pour réduire notamment la consommation d'énergie dans les établissements commerciaux et industriels, en utilisant la chaleur résiduelle disponible ou d'autres sources d'énergie comme l'énergie solaire.

Le stockage d'énergie thermique (SET) est l'une des technologies clés pour la conservation d'énergie, il a été récemment développé au point où il peut avoir un impact significatif sur les technologies modernes. Le SET est le stockage temporaire de l'énergie à haute ou basse température pour une utilisation ultérieure, et c'est évidemment la méthode la plus appropriée pour réduire l'inadéquation entre l'approvisionnement en énergie à la source et sa demande.

En effet, le stockage thermique par chaleur latente requière l'utilisation des matériaux à changement de phase (MCPs). Il a au moins deux avantages par rapport au stockage conventionnel :

- une grande densité énergétique
- à un niveau de température quasi isothermique

Parmi les améliorations possibles des performances thermiques des systèmes de stockage thermique intégrant des MCPs, on peut citer l'adoption d'une géométrie optimale de l'enceinte contenant le MCP dans l'échangeur de chaleur[1-3]. Cette géométrie optimale doit donc rendre rapide les échanges thermiques et offrir également une meilleure capacité de stockage.

Par ailleurs, l'intégration de nanomatériaux de grande conductivité thermique dans le corps MCP devient récemment une méthode efficace pour augmenter les transferts thermiques par notamment l'augmentation de la conductivité thermique effective du matériau composite résultant (nano-MCP)[4-6]. Donc, ces deux types d'améliorations des performances des MCPs encapsulés feront évidemment l'objet de cette thèse.

L'objectif de cette étude est donc d'analyser d'une part l'effet de l'orientation de la géométrie elliptique et l'insertion de nanoparticules d'autre part sur les performances thermiques d'un MCP dans des tubes d'un échangeur de chaleur.

Pour ce faire, des simulations numériques sont en effet réalisées à l'aide d'un code de calcul (Ansys Fluent). Ce code est basé sur la méthode d'enthalpie-porosité pour la modélisation du transfert de chaleur lors du changement de phase d'un MCP. Les prédictions numériques sont d'abord validées par comparaison avec des résultats expérimentaux et ceux de benchmark issus de la littérature. Deux orientations de géométrie elliptique des tubes de l'échangeur à chaleur latente et l'insertion des nanoparticules de différentes concentrations massiques d'autre part sur les performances thermiques sont examinés dans cette thèse.

Ce manuscrit est donc organisé en six chapitres, des généralités sur les MCPs font évidemment l'objet du premier chapitre, le deuxième chapitre fait donc avec l'état de l'art notamment en termes de performances thermiques des MCPs confinés et les améliorations en particulier de géométrie mais aussi d'insertion de nanoparticules. Ensuite, dans le troisième chapitre, on présente la méthodologie suivie dans cette étude (simulation numérique). Dans le quatrième chapitre, on expose donc une étude sur une configuration de base (fusion d'un MCP sans nanoparticules dans un tube à section circulaire).

Donc, les deux derniers chapitres (5 et 6) font avec les contributions principales de cette thèse. Ainsi, l'effet de l'encapsulation elliptique fait l'objet du cinquième chapitre. Enfin, dans le dernier chapitre (6), on aborde l'analyse de l'effet des nanoparticules, le graphène en l'occurrence, sur les performances thermiques du nano-MCP dans un tube d'échangeur de chaleur.

Chapitre 1

**Matériaux à changement de phase et
leurs applications**

1. Nécessité et avantages des systèmes de stockage d'énergie

La contrainte technique majeure qui empêche la mise en œuvre réussie et donc l'utilisation efficace des sources d'énergie renouvelables est absolument sa nature intermittente et la disponibilité et la demande inadaptées de temps. Afin de réduire cette discordance, le système de ces sources devrait donc être intégré aux unités de stockage d'énergie. Les énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire, gagne en importance dans le monde entier, car elle est tout à fait propre, non polluante, inépuisable et gratuite. Bien que de nombreuses applications soient possibles, un facteur important est que l'énergie solaire dépend donc du temps. Par conséquent, l'acceptation commerciale et l'économie des services ou des installations thermiques solaires sont liées à la conception d'un système de stockage thermique efficace, pour répondre toutefois à l'approvisionnement en temps et en énergie et aux exigences d'utilisation finale.

En effet, il existe de nombreux types de systèmes de stockage d'énergie:

- 1) Énergie mécanique : Stockage hydraulique (stockage par pompage), Stockage d'air comprimé....etc.
- 2) Énergie chimique : Batteries électrochimiques, Batteries au plomb-acide, Piles au lithium sulfure de fer, Piles au soufre, Stockage moléculaire organique, Stockage de pompe à chaleur chimique.
- 3) Énergie électromagnétique
- 4) Énergie thermique

Parmi ces méthodes de stockage, le stockage d'énergie thermique est donc l'une des technologies clés pour la conservation de l'énergie, ce type de stockage revêt donc d'une grande importance pratique. Les systèmes SET peuvent en particulier contribuer de manière significative à répondre aux besoins incessants de la société en

matière de consommation de l'énergie plus efficace et respectueuse de l'environnement dans des domaines tels que le chauffage et la climatisation, l'aérospatiale, de l'électricité et des services publics. D'ailleurs le SET est peut-être aussi vieux que la civilisation elle-même. L'homme a récolté de la glace et l'a stockée pour une utilisation ultérieure. De grands systèmes SET ont été utilisés ces dernières années pour de nombreuses applications allant du stockage d'eau chaude solaire aux systèmes de climatisation des bâtiments. La technologie TES n'a en fait été développée que récemment jusqu'à un point où elle peut avoir un impact significatif sur la technologie moderne [7].

Les systèmes de stockage d'énergie thermique ont un énorme potentiel pour accroître l'efficacité de l'utilisation de l'équipement de conversion d'énergie et pour faciliter les substitutions de combustible à grande échelle dans l'économie mondiale. L'utilisation du système SET a en particulier les avantages suivants :

- ✓ Réduction des coûts énergétiques
- ✓ Consommation d'énergie réduite
- ✓ Flexibilité accrue de l'opération
- ✓ Réduction des coûts initiaux et de maintenance

En outre, Dincer et Rosen [8] ont souligné quelques autres avantages du système SET:

- ✓ Taille réduite d'équipement
- ✓ Utilisation plus efficace de l'équipement
- ✓ Conservation des combustibles fossiles (en facilitant une utilisation plus efficace de l'énergie et / ou la substitution du carburant)
- ✓ Émissions réduites de polluants (par exemple CO₂)

2. Types de systèmes de stockage thermique

L'énergie thermique peut être stockée sous la forme de chaleur sensible dans un milieu solide (e.g. sable) ou liquide (e.g. eau), de la chaleur latente dans une substance à changement de phase (paraffine par exemple) ou d'une réaction chimique. Absolument, l'énergie est fournie à un système de stockage pour être récupérée et utilisée ultérieurement. Le choix du support de stockage dépend donc de la quantité d'énergie à stocker dans le volume unitaire ou le poids du support, et de la plage de température à laquelle il est requis pour une application donnée.

2.1. Système de stockage de chaleur sensible

Le stockage de chaleur sensible (SCS) est une technologie simple et bien développée, où l'énergie est stockée en chauffant ou en refroidissant un liquide ou un solide sans changement de phase pendant le processus de stockage/déstockage. Différents matériaux ont été utilisés dans de tels systèmes (SCS). Les matériaux couramment utilisés dans le système de stockage de chaleur sensible sont en particulier l'eau, les lits de galets, les lits pleins emballés, les matériaux réfractaires, les huiles hydrocarbonées, les matières organiques et les sels. La quantité de chaleur stockée dépend notamment de la chaleur spécifique du matériau, du changement de la température et de la quantité du matériau de stockage. Un système SCS comprend un support de stockage, un conteneur et des ports d'entrée/sortie. Les conteneurs doivent conserver le matériau de stockage et éviter la perte de la chaleur.

Evidemment, le principal avantage du système de stockage de chaleur sensible est que l'échange d'énergie est possible très facilement. Cependant, les matériaux de stockage de chaleur sensible ont une capacité de stockage de chaleur très faible par

unité de volume et l'énergie récupérée ne sera pas toutefois fournie à une température constante.

2.2. Système de stockage de chaleur latente

Le stockage de la chaleur latente (SCL) est basé tout à fait sur l'absorption ou la libération d'énergie lorsqu'un matériau de stockage subit un processus de changement de phase. L'unité de SCL est particulièrement intéressante en raison de sa haute énergie stockée et de son comportement quasi isotherme pendant le processus de stockage et de récupération d'énergie (processus de changement de phase). Ces dernières décennies, les scientifiques ont manifesté un vif intérêt pour le développement de matériaux de stockage thermique pour diverses applications. Une large gamme de MCPa été étudiée, y compris des hydrates de sel[9], des paraffines [10] et des composés organiques non paraffines, pour des applications industrielles et domestiques. Tout système SCL doit en effet posséder au moins les trois composants suivants :

- ✓ Une substance de stockage de chaleur (MCP) qui subit un changement de phase dans la plage de températures de fonctionnement souhaitée, dans laquelle la majeure partie de la chaleur ajoutée est stockée sous forme de chaleur latente.
- ✓ Une enceinte pour confiner la substance de stockage
- ✓ Un fluide caloporteur pour transporter la chaleur de la source de chaleur à la substance de stockage.

2.3. Systèmes de stockage thermochimique

Dans un système de stockage thermochimique, l'énergie thermique est utilisée pour produire une certaine réaction chimique endothermique, et les produits de la réaction sont stockés. Lorsque l'énergie doit être libérée, la réaction exothermique inverse est

réalisée. Ces systèmes sont en revanche coûteux et ne conviennent pas à la plupart des utilisations commerciales et domestiques.

2.4. Système de stockage combiné

Les systèmes de stockage combiné SCS sont de conception absolument plus simple que les systèmes de stockage thermochimique et les systèmes de stockage de chaleur latente. En revanche, les systèmes dits SCS souffrent en fait des inconvénients d'une faible capacité de stockage de chaleur par unité de volume du matériau de stockage, et de leur comportement non isotherme pendant les processus de chargement (stockage de chaleur) et de décharge (récupération de chaleur).

D'autre part, les systèmes SCL ont reçu une attention particulière en raison de leurs avantages, tels que le stockage d'une grande quantité d'énergie dans un petit volume, à savoir une quantité de stockage élevée et une charge/décharge à une température presque constante. Bien que les systèmes SCL ont des caractéristiques souhaitables, ils ne sont pas aussi utilisés commercialement que les systèmes SCS [7], en raison du faible taux de transfert de chaleur pendant les processus de stockage et de récupération de la chaleur. La raison principale derrière est que dans une unité SCS l'interface solide-liquide s'éloigne, pendant le changement de phase, de la surface de transfert de chaleur par convection. La résistance thermique de la couche du MCP solidifié augmente, ce qui rend le transfert de chaleur plus faible.

Le système de stockage combiné possède les avantages des systèmes de stockage de chaleur sensible et latente.

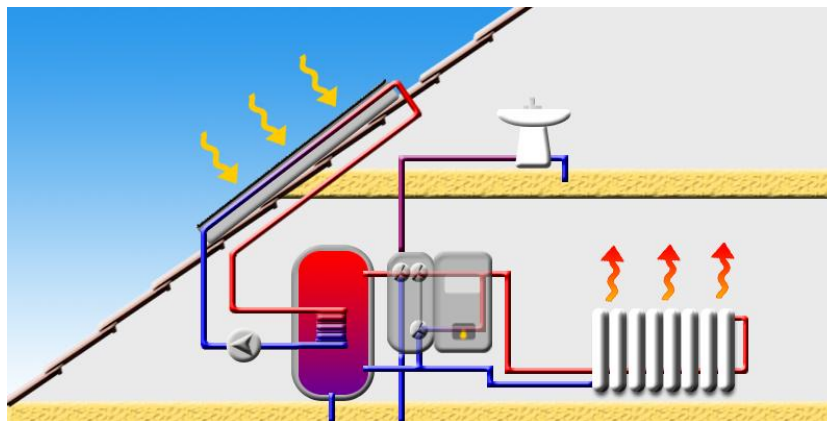


Figure 1.1 : Système de stockage combiné

Dans ce système, les conteneurs / capsules MCP sont toujours entourés par le fluide caloporteur, qui fonctionne également comme un matériau SCS et c'est une meilleure alternative, qui offre les avantages suivants:

- ✓ Capacité thermique supérieure
- ✓ Chargement et déchargement isothermes
- ✓ Elimination de la variation du taux de transfert de chaleur en surface, due à la mauvaise conductivité thermique du matériau à changement de phase
- ✓ Format compact

Donc, le système combiné de stockage de chaleur sensible et latente a trouvé de nombreuses applications dans les secteurs domestique, commercial et industriel.

3. Matériaux de stockage d'énergie thermique

Des matériaux de stockage thermique pour diverses applications sont en développement sans cesse. La classification des matériaux de stockage et les critères de sélection du matériau de stockage pour les applications requises sont donnés dans cette section.

3.1. Matériaux de stockage à chaleur sensible

Dans les systèmes SCS, l'énergie est stockée en augmentant la température d'un matériau de stockage, tel que l'eau, l'air, l'huile, les lits rocheux, les briques et le sable ou le sol. Dans le cas d'un milieu liquide, l'eau est la plus pratique, car elle est peu coûteuse et a également une chaleur spécifique élevée.

En revanche, le coût du réservoir de stockage augmente considérablement pour stocker la chaleur au-delà de 100°C. Les huiles organiques, les sels fondus et les métaux liquides ne présentent pas donc les mêmes problèmes de pression, mais leur utilisation est limitée.

Les difficultés et limitations relatives aux liquides peuvent être évitées notamment en utilisant des matériaux solides pour stocker l'énergie thermique sous forme de chaleur sensible. Mais, de plus grandes quantités de solides sont nécessaires que pour celle de l'eau, en raison du fait que les solides, en général, ont une capacité de stockage nettement inférieure à celle de l'eau. Le coût des supports de stockage par unité d'énergie stockée est cependant toujours acceptable pour les roches.

3.2. Matériaux à changement de phase

Les matériaux à changement de phase sont largement utilisés comme matériaux de stockage de chaleur latente. La liaison chimique à l'intérieur du MCP se brise en raison d'une augmentation de la chaleur absorbée de la source chaude. Les matériaux à changement de phase utilisés dans les dispositifs SCL devraient particulièrement remplir un certain nombre d'exigences. Fondamentalement, un bon MCP doit avoir les propriétés suivantes :

- un point de fusion dans la plage de température de fonctionnement souhaitée
- une chaleur latente élevée

- une fusion congruente
- et bien entendu sans surfusion pendant la congélation.

Les différents critères qui régissent généralement la sélection des matériaux de stockage à changement de phase sont donc:

Propriétés thermophysiques

- ✓ Température de fusion dans la plage de température de fonctionnement souhaitée
- ✓ Grande chaleur latente de fusion par unité de volume pour stocker une quantité d'énergie importante.
- ✓ Chaleur spécifique élevée pour fournir une chaleur sensible significative supplémentaire.
- ✓ Conductivité thermique élevée des deux phases solide et liquide pour faciliter la charge et la décharge de l'énergie dans les systèmes de stockage.
- ✓ Petits changements de volume durant la transformation de phase pour réduire le problème de confinement.
- ✓ Fusion congruente du MCP pour une capacité de stockage constante du matériau avec chaque cycle de fusion/ solidification.

Propriétés cinétiques

- ✓ Taux de nucléation élevé pour éviter la surfusion de la phase liquide.
- ✓ Taux élevé de croissance des cristaux, de sorte que le système peut répondre aux demandes de récupération de chaleur du système de stockage.

Propriétés chimiques

- ✓ Stabilité chimique
- ✓ Cycle complet de solidification/fusion réversible

- ✓ Pas de dégradation après un grand nombre de cycles de solidification/fusion.
- ✓ Non-corrosif
- ✓ non toxique
- ✓ non inflammable
- ✓ et enfin non explosif

Propriétés économiques

- ✓ Disponibilité à grande échelle et à bas prix

Le choix du MCP dépend donc de la plage de température dans laquelle il doit être utilisé, également de sa compatibilité avec le matériau d'encapsulation et évidemment de son coût.

Les MCP sont généralement classés en deux groupes, à savoir organique et inorganique (Fig. 1.2).

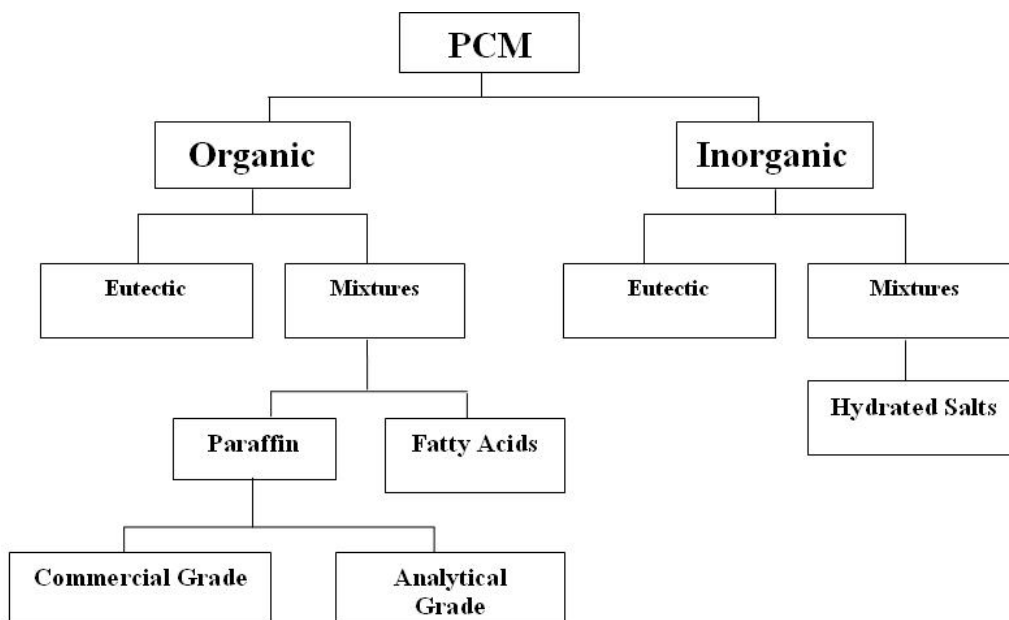


Figure 1.2 : Classification des matériaux à changement de phase [7]

4. Applications des systèmes de stockage d'énergie thermique

L'utilisation de systèmes SET a reçu beaucoup d'attention dans des applications thermiques tels que le chauffage et le conditionnement d'air. Les avantages potentiels du SET pour les applications de chauffage et de refroidissement ont été pleinement réalisés. Bien que ces systèmes fournissent de l'énergie à un coût plus élevé que les combustibles fossiles, les principaux avantages sont leur impact limité sur l'environnement et la durabilité de la source d'énergie. Les applications des systèmes SET sont diverses et nombreuses, on présente quelques applications dans les sous-sections suivantes.

4.1. Chauffage solaire

L'énergie solaire est une source d'énergie alternative importante qui sera sans doute utilisée davantage à l'avenir. Il est déjà mentionné que le facteur principal qui limite l'application de l'énergie solaire est qu'il s'agit d'une ressource énergétique cyclique dépendant du temps. Par conséquent, les systèmes solaires nécessitent un stockage d'énergie par le biais duquel est fournie de l'énergie pendant la nuit et les périodes où le rayonnement solaire est faible.

Le système de stockage par MCP offre en fait les avantages suivants par rapport à un système conventionnel:

- ✓ faible volume par rapport aux systèmes de stockage d'eau chaude,
- ✓ et une plus grande efficacité en raison d'une différence de température plus faible entre la charge et la décharge de l'énergie.

Le chauffe-eau solaire à base de MCP donne lieu également à une température mieux contrôlée de l'eau. Les systèmes SET sont intégrés aux systèmes de chauffage

solaire de l'air qui sont utilisés pour le chauffage des locaux, le séchage des cultures, l'incubation des œufs de volaille, pour ne citer que ces exemples.

4.2. Applications dans le bâtiment

L'ambiance dans un habitat se trouve confortable si sa température varie peu au cours d'une journée. Pour cette raison, les maisons avec des murs très épais sont particulièrement confortables, fraîches en été et chaudes en hiver. Un inconvénient important des bâtiments légers est leur faible masse thermique. Ils ont une tendance à subir de fortes fluctuations de température, ce qui entraîne toutefois une forte demande de chauffage ou de conditionnement d'air. Le système de stockage à base de MCP intégré dans les bâtiments diminue donc la fréquence des oscillations internes de la température de l'air et maintient en conséquence la température plus proche de la valeur désirée sur une longue période (en absorbant la chaleur aux pics et la libérant plus tard dans la nuit; dans des cas favorables, on peut même se passer de la climatisation)[11].

L'utilisation de MCP pour le rafraîchissement a été développée pour les applications de climatisation, où l'énergie fraîche est collectée et stockée dans l'air ambiant pendant la nuit, et est libérée à l'intérieur pendant les heures les plus chaudes de la journée. Ce concept est connu sous le nom de « free cooling ».

4.3. Transport des matériaux sensibles à la température

Le transport de substances thermosensibles nécessite en particulier des camions frigorifiques. Parmi ces produits, on peut citer:

- produits pharmaceutiques
- appareils électroniques divers (comme les transformateurs d'allumage)

- et de produits chimiques (explosifs).

Les camions de transport ont un coût d'exploitation prohibitif. Ces applications sont tout à fait adaptées aux applications du MCP, car la capacité du MCP à stocker la chaleur et le froid dans une plage de seulement quelques degrés, peut donc être très bien utilisée. Cette application peut déjà être trouvée sur le marché avec de nombreuses entreprises commercialisant des boîtes de transport pour les matériaux thermosensibles.

4.4. Réfrigération et conditionnement d'air

Le type de technologie SET le plus utilisé se trouve dans les grands bâtiments. Les systèmes de climatisation, en particulier dans les bâtiments commerciaux, sont les contributeurs les plus importants à la demande de pointe de charge électrique observée notamment pendant les journées chaudes d'été. Les systèmes de climatisation traditionnels fonctionnent pendant la journée pour répondre aux besoins de confort des bâtiments et rester hélas inactifs la nuit. En outre, les climatiseurs sont donc sélectionnés pour satisfaire la demande maximale, qui ne se produit que pendant quelques heures limitées par an, et passent ainsi la majeure partie de leur vie à une capacité réduite et à une faible efficacité. Dans les systèmes de climatisation intégrant des SET, les refroidisseurs sont installés pour répondre aux conditions de charge de refroidissement normales/moyennes. Pendant les heures creuses/nuits où les prix d'électricité sont relativement bas (si un système différentiel de tarification du KWh est adopté), les refroidisseurs peuvent fonctionner à pleine capacité, et l'excès d'énergie fraîche est stockée dans le réservoir de stockage rempli de MCP. La demande de charge de pointe pendant la journée est satisfaite par ce système de stockage. Le système SET permet donc une réduction significative de la

capacité du refroidisseur installé (entre 40% et 60%) [7], l'utilisation de l'électricité à bas tarif pour des économies significatives et une gestion efficace du refroidissement en fonction de la demande du système. La figure 1.3 montre les réservoirs de stockage à froid intégrés dans un système de refroidissement conventionnel installé à Tidel Park, Chennai, en Inde, qui est un complexe de bureaux de logiciels de douze étages et d'une superficie d'environ 93000 mètres carrés. La demande de pointe de charge du bâtiment pendant la journée est tout à fait satisfaite par ce système de stockage.

Les systèmes de réfrigération industrielle, qui assurent le refroidissement pour nombreuses applications, nécessitent des capacités de refroidissement élevées pendant des courtes périodes, correspondant aux cycles de production. En outre, la plupart des systèmes industriels de climatisation et de réfrigération nécessitent une forme d'installation de secours pour donc se protéger contre une défaillance du système et une perte de temps de production coûteuse. Le système SET est donc une solution flexible et fiable pour la gestion de ces besoins énergétiques importants. Les dispositifs SET pourraient fournir un moyen pour répondre à la demande de pointe sans installer de capacité de pointe ou de production intermédiaire dans ces systèmes. Dans de tels systèmes, l'énergie est stockée pendant les heures creuses et libérée donc pendant les périodes de forte demande. Un tel système permettrait aux unités de production en ligne de fonctionner aux conditions de conception, où leur efficacité est tout à fait plus grande.



Figure 1.3: Réservoirs d'un système de stockage installée à Tidel Park, Inde [7].

4.5. Abris de télécommunication

Actuellement, les MCP sont largement utilisés dans les abris de télécommunication. Ces abris consistent en effet en enceintes isolées et climatisées abritant le cœur de la communication mobile, la station de base. La station de base et les batteries sont en particulier très sensibles à la température et leur environnement, donc elles doivent toujours être maintenues à des températures en dessous de 35°C. Dans les pays sous-développés, les pannes de courant sont fréquentes, ce qui oblige donc les fournisseurs de services cellulaires pour installer impérativement des génératrices d'électricité pour soutenir les climatiseurs, en cas de coupure de courant. Le MCP installé dans un abri absorbe la chaleur en cas d'indisponibilité de l'énergie, minimisant/éliminant ainsi l'utilisation des génératrices, ce qui peut donc se traduire par d'énormes économies à travers des milliers d'abris.

4.6. Récupération de la chaleur résiduelle

Les systèmes de récupération de la chaleur résiduelle sont d'une importance primordiale pour l'utilisation efficace de l'énergie dans les processus industriels[12]. Ceux-ci comprennent la réduction de la demande d'énergie primaire en recyclant la chaleur résiduelle rejetée à l'aide d'échangeurs de chaleur de

récupération ou de régénération. Bien que la plupart des systèmes de récupération de la chaleur résiduelle soient installés sans système de stockage d'énergie, les tendances futures pourraient bien voir une augmentation significative de l'utilisation du SET. Cela sera nécessaire, afin d'étendre l'utilisation rationnelle des grandes sources de chaleur perdue.

4.7. Automobiles

De nombreuses difficultés rencontrées dans les automobiles, tels que le démarrage des moteurs diesel à basse température, une combustion inefficace pendant l'échauffement, des émissions d'échappement élevées et la consommation de carburant, etc. Ces soucis peuvent du coup être surmontés par un simple préchauffage du moteur avant démarrage. Les dispositifs de préchauffage classiques sont en fait coûteux. Or, des économies d'énergie et une amélioration des performances sont possibles si la chaleur résiduelle du moteur peut être stockée et réutilisée efficacement. Par conséquent, plusieurs sociétés ont étudié et développé des systèmes de récupération de l'énergie thermique par l'utilisation des MCPs pour les véhicules (e.g. Rubitherm [13]). Dans cette application, le réservoir de chaleur est chauffé par le liquide de refroidissement pendant que le moteur tourne, et la chaleur emmagasinée peut être réutilisée pour préchauffer le moteur lors d'un nouveau démarrage, et également fournir du confort à l'habitacle du conducteur pendant l'hiver. Le MCP est donc utilisé dans le conduit d'échappement des véhicules pour absorber la chaleur des gaz d'échappement. Cela permet de maintenir le convertisseur catalytique (si installé) à sa température de conception, en réduisant les émissions excessives d'hydrocarbures lors du démarrage du véhicule.

4.8. Chauffage des serres agricoles

Les serres agricoles solaires sont largement utilisées pour augmenter la qualité et la productivité des produits cultivés, et pour réduire ainsi la consommation de combustibles fossiles pour le chauffage et le refroidissement. Les serres les plus efficaces nécessitent en particulier le contrôle de la température, de l'humidité, de l'irradiation solaire et de la composition interne du gaz notamment avec une consommation rationnelle d'énergie. En revanche, en raison des grandes variations de température dans les températures diurnes, la plupart des serres ont besoin de conditionnement d'air, soit le chauffage ou le refroidissement. Le MCP installé dans le sol de ces serres peut donc éliminer ou réduire la dépendance de l'air de conditionnement.

En outre, il y a d'autres applications où les systèmes SET peuvent être utilisés telles que la cuisson solaire, le chauffage solaire avec pompes à chaleur, le refroidissement des appareils électronique, les centrales solaires et bien d'autres.

Donc, dans toutes ces applications le PCM subit un changement de phase durant les phases de charge et décharge thermique, des processus correspondant en effet de fusion et solidification d'un MCP confiné.

Dans le prochain chapitre donc, nous présenterons les travaux de recherche ayant trait avec la fusion et la solidification du MCP confiné.

Chapitre 2

Recherche bibliographique

Le stockage d'énergie thermique joue un rôle essentiel dans le développement d'un dispositif énergétique. En ce qui concerne les dispositifs solaires thermiques, il existe toujours un décalage entre l'offre et la demande en raison de la nature intermittente et imprévisible du rayonnement solaire. Un système de stockage d'énergie thermique bien conçu est capable d'atténuer cet inconvénient en fournissant un apport constant d'énergie à la charge.

Le stockage par chaleur latente conduit à la compréhension du phénomène de fusion de MCP, un problème largement investi par les chercheurs.

1. Etudes de la fusion du MCP

Faden et al.[14] ont présenté un nouveau algorithme implicite pour le problème de fusion d'un matériau à changement de phase macro-encapsulé. Le modèle mathématique à grille fixe est basé sur la technique de l'enthalpie-porosité et la méthode du volume de fluide (VOF). Une méthode de limite immergée est appliquée pour calculer la vitesse de précipitation du MCP solide dans le MCP fondu, qui est ensuite prescrite par un terme de Darcy étendu. Comme cas d'essai, la fusion dans une capsule cubique quasi bidimensionnelle est choisie. L'algorithme implicite nouvellement introduit est comparé avec un algorithme explicite existant et il est démontré que le calcul implicite améliore considérablement la stabilité du modèle. De plus, le modèle numérique est validé par rapport aux expériences réalisées, où pour la première fois la vitesse de précipitation du MCP solide est mesurée directement. Un bon accord est trouvé entre les simulations et l'expérience. Les capacités du nouvel algorithme sont démontrées par de multiples calculs avec des températures de paroi variables. De ce fait, les auteurs ont constaté que la vitesse de précipitation du solide n'est à un état quasi stationnaire que pendant un certain temps.

Les conclusions suivantes ont été tirées:

- 1) La vitesse de précipitation du MCP solide vers le fond est presque constante après une phase d'accélération.
- 2) L'épaisseur de l'espace de fusion est la plus mince pour les températures de paroi basses et il s'élargit pour les températures de paroi élevées. De plus, un maximum local peut être observé dans la première phase du processus de fusion.
- 3) Le flux de chaleur à travers la paroi inférieure dépasse clairement la somme des flux de chaleur à travers les autres parois. De plus, le rapport entre le flux de chaleur à travers la paroi inférieure et la somme des flux de chaleur à travers les autres parois est plus élevé pour les ΔT plus petits.

Lee et al. [15] ont utilisé la méthode intégrale pour obtenir la solution analytique exacte à court terme de la fusion ou la solidification d'un matériau dans une cavité sphérique. Des résultats numériques sont présentés et la validité et l'exactitude des solutions sont brièvement discutées.

Chung et al. [16] ont étudié l'effet du nombre de Rayleigh pour étudier systématiquement la transition de l'écoulement pendant le processus de fusion dans un cylindre horizontal chauffé isothermiquement, en mettant l'accent sur la structure de l'écoulement multicellulaire compliqué et l'instabilité thermique. La formulation d'enthalpie-porosité est employée avec des termes sources appropriés pour tenir compte du changement de phase. Au faible nombre de Rayleigh, le flux est dans un état stable car un flux de base monocellulaire est développé au stade initial de fusion. Pour des nombres élevés de Rayleigh, la convection de type Rayleigh-Bénard se développe dans un espace liquide étroit entre la surface solide non fondue et la paroi inférieure du cylindre. Pour des nombres intermédiaires de Rayleigh, le début de la convection de Rayleigh-Bénard dépend de la force du flux de base en cours de

développement et une interaction délicate entre les deux flux détermine ensuite le modèle de flux. Le nombre de Rayleigh effectif et le nombre d'onde correspondant sont en excellent accord avec ceux de la théorie de la stabilité linéaire. La structure multicellulaire et l'instabilité thermique au début du processus de fusion dans le cylindre horizontal ont été analysées numériquement pour une gamme relativement large des nombres de Rayleigh, les nombres intermédiaires de Rayleigh inclus auxquels des études antérieures ont montré des résultats contradictoires. Plusieurs observations importantes sont notées :

- 1) La méthode d'enthalpie est une méthode de solution efficace, en particulier lorsque la génération de la grille n'est pas réalisée par la méthode de suivi du front de changement de phase.
- 2) Aux nombres intermédiaires de Raleigh, la flottabilité thermique et les forces visqueuses sont équilibrées dans un état neutre et stable. Ainsi, le flux est susceptible de transiter vers différents modèles par des perturbations expérimentales ou numériques infinitésimales.
- 3) Aux nombres élevés de Rayleigh, la convection de Rayleigh-Bénard montre un comportement ordonné sans être affectée par le flux convectif de base.

Pan et al. [17] ont présenté une étude plus approfondie sur la zone pâteuse. Ils ont utilisé la méthode d'enthalpie-porosité, la méthode par défaut dans Ansys Fluent pour les simulations des problèmes de fusion. Une discussion complète des valeurs des paramètres de la zone pâteuse est présentée avec une comparaison des résultats numériques avec ceux expérimentaux. Les auteurs ont constaté que la convection dans la phase liquide peut exercer une force de cisaillement vers le bas sur le solide. Ils ont montré également que dans la région pâteuse, les solides incomplètement fondus coulent au fond sous l'effet de gravité, cela peut améliorer le transfert de chaleur.

Enfin, une solution analytique pour la fusion d'un MCP dans un tube vertical avec un paramètre de réglage pour modifier la viscosité de la région pâteuse a été développée. Une corrélation linéaire pour le paramètre de réglage basée sur les différentes températures est donnée et validée expérimentalement.

Assis et al. [18] ont exploré numériquement et expérimentalement le processus de fusion d'un MCP dans une géométrie sphérique. Le MCP étudié est de la cire de paraffine, un MCP disponible dans le marché. Une étude paramétrique détaillée est effectuée pour la fusion dans des coquilles sphériques de 40, 60 et 80 mm de diamètre, lorsque la température de la paroi est uniforme et varie de 2 °C à 20 °C au-dessus de la température de fusion moyenne du MCP. Des simulations numériques sont effectuées à l'aide du logiciel Fluent 6.0. Ces simulations montrent le processus de fusion intégrant des phénomènes tels que la convection en phase liquide, l'expansion volumétrique due à la fusion, la précipitation du solide dans le liquide et la fusion par contact étroit. Les résultats expérimentaux se comparent favorablement aux résultats numériques et servent ainsi à valider l'approche numérique suivie. Les résultats des calculs montrent comment le processus de changement de phase instationnaire dépend des paramètres thermiques et géométriques du système, y compris la différence de température entre la paroi et la température de fusion moyenne, et le diamètre de la coque. L'analyse dimensionnelle des résultats est effectuée et présentée comme les nombres moyens de Nusselt et les fractions de fusion par rapport à une combinaison appropriée des nombres de Fourier, Grashof et Stefan. Ce dernier nombre caractérise le rapport chaleur sensible/ chaleur latente

2. Changement de phase dans une cavité cylindrique

La recherche sur la fusion dans des cavités cylindriques a reçu une attention particulière, vu l'importance de la géométrie dans l'industrie.

Hlimi et al. [19] ont étudié le rôle de la convection naturelle sur le mouvement de l'interface solide-liquide lors de la fusion au sein d'une capsule cylindrique horizontale. Les auteurs ont développé un code numérique en utilisant une méthode des volumes finis non structurés et une technique d'enthalpique-porosité pour résoudre le problème de la convection naturelle couplée au changement de phase solide-liquide. Des structures d'écoulement pour différents nombres de Rayleigh sont présentées. Les formes du front de fusion résultantes et la température dans le MCP fournissent une preuve concluante de l'importance de la convection naturelle sur le transfert de chaleur dans le MCP liquide. Les auteurs ont également étudié numériquement l'effet du nombre de Rayleigh sur la convection naturelle au cours du processus de fusion. Il est constaté que le processus de fusion du MCP est dominé par la conduction aux premiers stades de la fusion, indiquée par des interfaces concentriques solide-liquide parallèles à la paroi circulaire chauffée. Plus tard, la convection naturelle devient plus importante et domine alors les transferts thermiques au sein du MCP, ce qui affecte la forme du front de fusion et entraîne par conséquent une fusion asymétrique autour de l'axe horizontal du cylindre. Les résultats numériques indiquent également que pour un faible nombre de Rayleigh, l'écoulement dans la zone de fusion reste à l'état stable car la force visqueuse est dominante. Au nombre élevé de Rayleigh, la convection de Rayleigh-Bénard indique un comportement ordonné sans être affecté par le flux de base.

Stewart et al. [20] ont étudié et analysé la congélation d'eau pure initialement surchauffée contenue dans un cylindre horizontal. Trois expériences ont été menées et

comparées à un modèle analytique basé sur la méthode intégrale du bilan thermique considérant le transfert de chaleur par conduction (radial) avec ou sans surchauffe initiale. Les équations sont résolues numériquement en utilisant la méthode de Runge-Kutta pour résoudre les équations différentielles du modèle analytique. La solution a donné le temps nécessaire au liquide pour atteindre la température de changement de phase (0°C) en cas de surchauffe initiale. Les résultats analytiques et expérimentaux obtenus sur la durée de solidification dans cette étude se comparent très bien. La durée de solidification s'est avéré être une fonction linéaire du nombre de Stefan pour une surchauffe initiale nulle. Cependant, les résultats analytiques obtenus pour le cas sans surchauffe initiale diffèrent quelque peu des résultats de certaines études de la littérature. Les effets de la convection libre semblent être négligeables durant le processus de solidification de l'eau. Cependant, les résultats expérimentaux pour la durée de solidification sans dimension diffèrent de 7% des résultats analytiques.

Pour les problèmes dans lesquels la température du fluide à changement de phase est initialement à la température de fusion, avec une surchauffe initiale nulle, Il y a une équation qui peut être utilisée pour prédire la durée de solidification en fonction du nombre de Stefan. Aux nombres relativement faibles de Stefan étudiés, les effets de la convection libre sont donc négligeables.

Ismail et al. [21] ont présenté les résultats d'une étude numérique validée par des mesures expérimentales sur la solidification du MCP dans un tube horizontal en utilisant la technique d'immobilisation du front de solidification. Le modèle bidimensionnel du problème de changement de phase est formulé sur la base de l'équation de l'énergie et de la transformée de Landau qui sert à transformer les interfaces irrégulières mobiles en interfaces parallèles fixes. La méthode des volumes finis est utilisée pour discrétiser le système d'équations et les conditions aux limites et

initiales associées. Un programme de calcul a été élaboré et les grilles de temps et d'espace ont été optimisées pour rendre la solution numérique insensible à la taille de la grille. Un bon accord a été trouvé par rapport aux résultats expérimentaux et numériques disponibles dans la littérature. Des résultats supplémentaires ont été obtenus et les prédictions numériques se sont avérées en bon accord avec les nouvelles mesures, montrant ainsi que la technique d'immobilisation est adéquate pour gérer les problèmes de changement de phase. Les auteurs ont montré que la diminution de la température du fluide de transfert accélère l'avancement de la position d'interface, la masse solidifiée et la vitesse d'interface et réduit donc la durée de solidification complète. D'ailleurs, l'augmentation du débit massique augmente modérément ces paramètres caractéristiques, mais avec un degré moins par rapport à l'effet de la température du fluide de transfert.

Yang et al. [22] ont étudié numériquement le processus de fusion dans une unité de stockage d'énergie thermique à chaleur latente en coquille et tube avec des ailettes annulaires. La paraffine commerciale est utilisée comme MCP et l'eau sert de fluide de transfert de chaleur. Des simulations numériques basées sur la méthode des volumes finis sont effectuées pour étudier les effets de la hauteur et de l'épaisseur des ailettes sur le processus de changement de phase. Une attention particulière est accordée pour justifier la contribution de la convection naturelle locale au processus global de changement de phase. Les résultats démontrent que la durée de fusion complète pourrait être réduite jusqu'à 65% en insérant des ailettes annulaires dans le MCP. Les principales conclusions de cette étude sont:

- 1) La convection naturelle locale en phase de fusion provoque une amélioration remarquable de l'évolution de l'interface de fusion. La durée de fusion complète pour un seul tube avec convection naturelle est 1.74 fois plus courte de celle sans

convection naturelle. Ce rapport de réduction varie de 1.55 pour le cas où des ailettes conductrices sont impliquées.

- 2) Les ailettes annulaires présentent un potentiel prometteur pour améliorer le transfert de chaleur durant le processus de fusion. La durée de fusion complète pourrait être réduite au maximum de 65% en insérant des ailettes annulaires dans le MCP, en raison principalement d'une conduction thermique considérablement accrue couplée à une convection naturelle locale.

Hirata et al. [23] ont présenté une méthode d'analyse utilisant la conductivité thermique équivalente de la phase liquide pour étudier le problème de fusion d'un MCP à l'intérieur d'un cylindre horizontal chauffé de manière isotherme. La conductivité thermique équivalente de la phase liquide, pendant le processus de fusion, est estimée à partir des résultats du transfert de chaleur par convection naturelle entre des cylindres circulaires horizontaux concentriques, des formules empiriques sont employées pour la conductivité équivalente du MCP liquide. Le processus de fusion est donc analysé comme un problème de conduction thermique pure. Des expériences sont également réalisées en utilisant le n-octadécane comme MCP.

Les conclusions suivantes sont tirées.

- 1) La conductivité thermique équivalente pour les anneaux cylindriques concentriques peut être bien corrélée pour $5 < Pr < 800$.
- 2) Une méthode analytique pour le processus de fusion à l'intérieur d'un cylindre horizontal chauffé isothermiquement a été proposée, ainsi le taux de fusion du MCP peut être estimé.
- 3) L'effet de la convection naturelle sur le taux de chaleur transférée du cylindre à l'interface solide-liquide est présenté, il devient négligeable pour $Ra < 10^5$.

Darzi et al. [24] ont étudié numériquement la fusion d'un matériau à changement de phase (n-eicosane) à l'intérieur d'un récipient cylindrique. Des simulations numériques sont effectuées pour la fusion du matériau à changement de phase, initialement sous-refroidi à 1°C , entre deux cylindres dans des réseaux concentriques et excentriques en utilisant le logiciel Ansys Fluent. Le tube cylindrique intérieur est considéré comme une paroi chaude tandis que le tube extérieur est isolé thermiquement. Les résultats ont montré que le taux de fusion est le même, approximativement, pour les réseaux concentriques et excentriques dans les premières 15 minutes. Après ce temps, le taux de fusion diminue en réseau concentrique. Cela est dû à la conduction pure entre le tube chaud et le MCP solide froid. Il est intéressant de noter que lorsque le tube intérieur du cylindre se déplace vers le bas, le taux de fusion augmente fortement. Cela est dû à la dominance du transfert de chaleur par convection naturelle dans la plus grande partie du MCP.

Park et al. [25] ont étudié le processus de fusion à l'intérieur d'un tube circulaire horizontal. Les équations gouvernantes basées sur la formulation d'enthalpie sont résolues par une méthode de pseudo compressibilité de type volumes finis. De petites perturbations de quatre types différents sont données au tout début de la fusion afin d'examiner la dépendance de la solution vis-à-vis la perturbation initiale. Au nombre de Rayleigh $Ra=10^6$, l'écoulement reste donc unicellulaire pour toutes les perturbations prescrites. Cependant, à un nombre de Rayleigh plus élevé, $Ra = 810^6$, deux solutions de ramification (écoulement bicellulaire et tri-cellulaire) ont été obtenues en fonction du type des perturbations initiales. Ce phénomène de bifurcation peut expliquer les structures de fusion contradictoires apparues dans la littérature.

Ho et al. [26] ont étudié expérimentalement et analytiquement le problème de fusion dans une capsule cylindrique horizontale. Ils ont utilisé la technique du

shadowgraph pour mesurer les coefficients de transfert de chaleur locaux à la surface de la source de chaleur. Ils ont enregistré photographiquement le mouvement de l'interface solide-liquide pendant le changement de phase. Ils ont également visualisé le mouvement convectif dans le MCP liquide pendant la fusion en utilisant de la poudre d'aluminium comme traceur d'écoulement. Les résultats expérimentaux ont réaffirmé le rôle dominant joué par le mouvement naturel du fluide convectif dans la phase liquide lors de la fusion. En plus de l'écoulement principal de recirculation convective dans le MCP liquide, une circulation secondaire s'est produite dans la partie inférieure de la région de fusion. Pour étayer les expériences, les auteurs ont comparé les données aux prédictions numériques, un bon accord a en effet été obtenu.

3. Changement de phase dans une cavité elliptique

La littérature s'est intéressée également au problème de fusion dans d'autres géométries bien qu'avec évidemment un degré moins. La cavité elliptique a en effet fait l'objet d'études notamment numériques.

Dans l'étude de Jourabian et al. [27] est étudié le processus de fusion de la glace en tant que MCP dans une matrice poreuse en nickel-acier à l'intérieur d'un tube elliptique horizontal. La méthode de Boltzmann en réseau avec une fonction de double distribution formulée sur la base de la méthode d'enthalpie est appliquée à l'échelle de volume élémentaire représentative sous l'hypothèse d'équilibre thermique local entre le MCP et la matrice poreuse dans le composite. D'ailleurs, la réduction ou l'augmentation du rapport d'aspect des tubes circulaires conduit à une fusion accélérée. En outre, l'inclinaison de 90° de chaque tube elliptique dans le cas de la fusion du MCP pure n'affecte pas le taux de fusion. Avec la réduction de la porosité, la conductivité thermique et le taux de fusion efficaces dans tous les tubes sont

favorisés. Bien que la convection naturelle soit totalement supprimée en raison du blocage important de l'écoulement dans la structure poreuse, les taux de fusion sont généralement augmentées dans tous les cas. Les auteurs ont conclu au terme de l'étude:

- 1) Aux premiers stades de la fusion, dans tous les tubes le processus est dominé par la conduction thermique, un motif concentrique du front de changement de phase parallèle à la paroi chaude est donc observé. Cette forme est conservée jusqu'à ce que tout le MCP soit fondu à $Ra = 10^4$.
- 2) A partir de $Ra = 10^5$, la convection naturelle est intensifiée, ce qui rend le processus asymétrique par rapport à la ligne horizontale de tous les tubes.
- 3) La réduction ou l'augmentation du rapport d'aspect des tubes circulaires entraîne l'accélération de la fusion.
- 4) l'inclinaison de 90° de chaque tube elliptique dans le cas de la fusion du MCP pure n'engendre aucun changement dans les taux de fusion notamment pour $Ra=10^4$ et $Ra=10^5$.
- 5) La convection naturelle induite dans le MCP fondu améliore le taux de fusion uniquement dans le tube circulaire. Cependant, cela affecte les lignes de courant et les isothermes pour certains cas et non les taux de fusion.
- 6) La réduction de la porosité entraîne une augmentation de la conductivité thermique effective et des vitesses de fusion dans tous les tubes. Bien que la convection naturelle soit complètement supprimée, lorsque la matrice poreuse métallique est introduite dans le MCP de base dans le nombre de Rayleigh de 10^5 , les taux de fusion sont généralement augmentés dans tous les cas.
- 7) Le taux de diminution de la durée de fusion complète dans les tubes elliptiques est le même lorsque la matrice poreuse métallique est introduite. L'imprégnation de la

matrice poreuse métallique dans le MCP de base dans le tube circulaire est plus efficace lorsque $Ra = 10^4$.

8) Du point de vue économie d'énergie, il est recommandé d'utiliser les tubes elliptiques avec une matrice de porosité plus faible afin d'avoir le maximum d'efficacité.

Gong et al. [28] ont analysé le processus de fusion d'un MCP autour d'une source de chaleur à cylindre elliptique horizontal. Un nouveau modèle mathématique est proposé, les équations fondamentales pour le processus de fusion sont dérivées de la théorie de lubrification. La distribution de pression à l'intérieur de la couche limite, la loi de variation de l'angle normal de l'interface solide-liquide, l'épaisseur de la couche limite et la relation entre le taux de fusion et la force résultante sont obtenues. Les solutions des équations fondamentales sous différents coefficients de compression elliptiques sont analysées et discutées. On a d'ailleurs constaté que l'épaisseur de la couche limite obtenue par le nouveau modèle est une valeur finie et s'accorde «également avec les résultats de l'expérimental. Les résultats indiquent qu'après avoir considéré la différence d'angle normal entre la surface horizontale du cylindre elliptique et l'interface solide-liquide, l'épaisseur de la couche limite des deux côtés du cylindre elliptique peut être calculée. Les auteurs proposent donc que deux équations puissent être employées dans la recherche d'une loi de variation de l'épaisseur de la couche limite, par laquelle il y aura un résultat plus raisonnable et plus précis que celui de la littérature.

Chen et al. [29] ont étudiés le processus de fusion d'un MCP à l'intérieur d'un tube elliptique horizontal. Les formules théoriques du taux de fusion, de l'épaisseur de la couche liquide et du nombre de Nusselt pendant le processus de fusion sont obtenues. Les résultats incluent ceux de la fusion par contact à l'intérieur d'un cylindre

horizontal. Enfin, les effets du coefficient de compression elliptique et de la différence de température lors de la fusion sont examinés. Les résultats ont montré que pour le même tube elliptique ayant la même aire de section et la même longueur que le tube cylindrique, le taux de fusion par contact, l'épaisseur de la couche et le nombre de Nusselt peuvent être différents et dépendants du sens de la fusion.

4. Effet des nanoparticules dispersées dans le MCP

L'utilisation de matériaux de stockage d'énergie thermique dans les capteurs solaires est connue pour être un moyen efficace pour stocker l'énergie thermique[30]. Cependant, en raison de la faible conductivité thermique des MCPs, leurs applications en tant que milieu de stockage de chaleur sont limitées. En raison des progrès rapides de la nanotechnologie, des variétés de nanomatériaux ont été conditionnées et dispersées dans des MCPs pour améliorer leurs propriétés thermophysiques[31-38], la conductivité thermique en particulier. Une synthèse bibliographique [39] présente l'état de l'art et les tendances de développement des matériaux de stockage thermique. Une description détaillée des applications de l'énergie solaire thermique, se concentrant principalement sur différents matériaux a été également présentée dans cette revue. En outre, l'amélioration des matériaux dopés avec des nanomatériaux a été discutée. Il a été constaté que l'effet des nanomatériaux sur la conductivité thermique apparente dépend de divers paramètres tels que la taille des particules, la forme, le matériau, la fraction volumique, le type de fluide et la température. De plus, les additifs et la manipulation du pH contribuent de manière significative à la stabilité des matériaux de base et conduisent ainsi à une conductivité plus élevée des matériaux de stockage. Les nano-MCPs offrent donc une solution alternative aux MCPs conventionnels. Des études expérimentales ont montré qu'avec la quantité optimale de nanoparticules, le nano-MCP devient donc un moyen de stockage plus

efficace. Une amélioration du système de stockage avec des nanoparticules a été observée dans différents matériaux. Cependant, les résultats de la littérature n'ont pas été concluants car l'amélioration thermique par des nanomatériaux est encore au stade laboratoire, les travaux futurs devraient donc se concentrer en tenant compte:

- 1) Effet des nanomatériaux, leurs taille et forme, concentration et température de fonctionnement pour améliorer le système de stockage
- 2) Stabilité à long terme
- 3) Compatibilité avec les matériaux incorporés dans le système de stockage

Les études expérimentales et numériques pour les capteurs solaires ont montré que dans certains cas, l'efficacité peut augmenter remarquablement en utilisant des nanoparticules. Il a été suggéré que le système dopé avec différentes fractions volumiques de nanoparticules soit testé pour trouver la fraction volumique optimale. De nombreuses théories et mécanismes ont été proposés pour améliorer les propriétés thermophysiques des nanocomposites. Cependant, les mécanismes et théories exacts et les propriétés thermophysiques améliorées des sels fondus et les paraffines sont toujours à l'étude. De plus, en raison des divergences dans les données rapportées, il est nécessaire de mener plus d'expériences pour étudier tous les facteurs responsables de l'amélioration des propriétés thermophysiques des nanocomposites. En outre, de nombreux défis associés tels que l'agglomération, la ségrégation en fonction du temps, la dégradation, la concentration optimale et le coût, doivent être résolus avant de pouvoir être utilisés comme matériaux de stockage dans des applications à grande échelle.

Kibria et al. [40] ont présenté une revue des études expérimentales sur les altérations des propriétés thermophysiques des MCPs dues à la dispersion des nanoparticules. Des nanotubes/fibres de carbone dispersés et différentes

nanoparticules de métal/oxyde métallique dans la paraffine et les acides gras pourraient être une solution pour améliorer les performances de stockage thermique de la chaleur latente. Les propriétés thermophysiques telles que la conductivité thermique, la chaleur latente, la viscosité et la surfusion des MCPs pourraient être modifiées pour différentes propriétés physiques des nanoparticules dispersées telles que la taille, la forme, la concentration et les propriétés de surface. Parmi les nanoparticules, comparativement les nanotubes de carbone et les nanofibres de carbone ont montré de meilleures performances dans l'amélioration des propriétés thermiques du MCP pour leurs propriétés uniques. Cette revue se focalise sur les études décrivant comment les propriétés de surface, chimiques et physiques des nanoparticules pourraient affecter les propriétés thermiques du MCP à l'aide des explications disponibles dans la littérature.

Akhmetov et al. [41] ont étudié numériquement deux dispositifs de stockage thermique séquentiellement intégrés à base de paraffine avec différentes plages de température de changement de phase à l'aide du logiciel de calcul Comsol Multiphysics pour un stockage efficace de l'énergie thermique. Les propriétés thermiques des paraffines sont caractérisées et des nanoparticules d'oxyde d'aluminium (nano- Al_2O_3) sont dispersées dans les paraffines pour améliorer leur capacité de transfert de chaleur. Selon les résultats de l'appareil flash laser, lorsque le nano- Al_2O_3 compose 4 wt% de la masse de la paraffine, sa diffusivité thermique peut être augmentée jusqu'à 40%.

D'autres études de caractérisation montrent que l'incorporation du nano- Al_2O_3 ne modifie pas de manière significative la capacité thermique spécifique, la chaleur latente de fusion et de solidification des MCPs, mais améliore l'efficacité de transfert de chaleur des MCPs. Les propriétés thermiques mesurées des MCPs sont considérées

comme des données d'entrée dans la simulation numérique des régimes de fonctionnement des dispositifs. La durée de charge des systèmes de stockage intégrés est réduite de 57 min et 106 min lorsque le nano- Al_2O_3 compose respectivement 2 et 4% en masse de la masse du MCP. Du même, la durée de décharge est diminuée de 32 et 74 min par l'ajout de nano- Al_2O_3 par respectivement 2 et 4% en masse. De telles réductions conduisent à une amélioration de l'efficacité de charge et de décharge des systèmes de stockage.

Arici et al. [42] ont étudié numériquement la fusion de la cire de paraffine dispersée avec des nanoparticules de CuO à l'intérieur d'une enceinte carrée en utilisant la technique de l'enthalpie-porosité. Une température de variation sinusoïdale est imposée à une paroi chaude, tandis que la paroi froide est maintenue à une température constante. Les autres parois de l'enceinte carrée sont considérées comme isolées thermiquement. Les propriétés thermophysiques dépendantes de la température et de la phase sont incorporées dans les équations du modèle mathématique. Les résultats numériques ont démontré que le taux de fusion et l'énergie stockée pour le cas du chauffage par le bas sont considérablement plus élevées que le cas du chauffage par le côté. Avec la dispersion des nanoparticules dans la cire de paraffine, le taux de fusion et l'énergie stockée sont considérablement augmentées par rapport au chauffage latéral. Un agrandissement plus élevé est atteint pour la fraction volumique de nanoparticules de 1 vol% par rapport à celle de 3 vol%.

Les principales conclusions tirées de l'étude sont les suivantes:

- 1) Une circulation primaire est établie dans l'enceinte carrée pour le chauffage des parois latérales, sauf pendant les premiers stades de la fusion. Dans le cas du chauffage par le bas, un flux multicellulaire avec des écoulements à six cellules se manifeste.

- 2) Les taux de fusion pour le cas du chauffage par le bas sont considérablement plus élevés que ceux du chauffage latéral pour tous les cas traités dans l'étude en raison de la présence de forts courants convectifs. A la fin de la même période de chauffage de 1500 s, la fraction liquide atteint plus de 0.8 pour le chauffage par le bas et environ 0.6 pour le chauffage par le côté.
- 3) Les fronts de fusion se développent plus rapidement pour le nanocomposite que pour le MCP pur. À un premier stade de la fusion, lorsque le principal mode de transfert de chaleur est la conduction, une amélioration de la fusion plus importante est obtenue pour 3% en volume par rapport à 1% en volume. Ce comportement est dû à une diffusivité thermique plus élevée et à une réduction prononcée de la chaleur latente.
- 4) Cependant, au début de la convection, le taux de fusion obtenue pour 1 vol% est plus élevé car l'augmentation relative de la viscosité pour 3 vol% dégrade le transfert de chaleur par convection et ainsi le taux de fusion est réduite par rapport à 1 vol%.

Des expériences de fusion dans une enceinte carrée verticale [43] ont été entreprises avec un matériau à changement de phase solide-liquide (n-octadécane) dispersé avec des nanoparticules (Al_2O_3) comme Nano-MCP. L'enceinte a une dimension en coupe de 25 mm sur 25 mm et une longueur de 60 mm. Les parois latérales verticales étaient chauffées de manière isotherme différentielle tandis que les parois latérales restantes étaient isolées thermiquement. L'effet de la dispersion des nanoparticules dans le MCP sur les caractéristiques de transfert de chaleur de fusion dans l'enceinte est examiné pour les paramètres pertinents dans les plages suivantes: la fraction de masse des nanoparticules 0.5 et 10 wt%; le nombre de Rayleigh, $Ra = 1.71 \times 10^6 - 5.67 \times 10^7$; le nombre Stefan, $Ste = 0.037 - 0.108$; et le paramètre de surfusion, 0.042 –

0.537. Les résultats de transfert de chaleur moyenné en surface obtenus au cours des expériences de fusion indiquent que le transfert de chaleur par convection naturelle dans la région fondue de l'enceinte a tendance à se dégrader nettement avec l'augmentation de la fraction massique de nanoparticules dispersées dans le Nano-MCP, par rapport à celle du MCP de base. Cela est expliqué par l'augmentation de la viscosité qui tend à rendre plus faible la convection libre et par conséquent les transferts thermiques.

Zabalegui et al. [44] ont examiné la chaleur latente des Nano-MCPs à base de paraffine pour étudier l'utilisation de matériaux à changement de phase améliorés pour les applications de stockage d'énergie thermique. Cette approche a souvent été exploitée pour améliorer la conductivité thermique des MCPs, mais les effets de l'addition de nanoparticules sur d'autres propriétés thermiques affectant le stockage sont relativement ignorés. Une étude expérimentale de Nano-MCPs à base de paraffine contenant différentes tailles de particules de nanotubes de carbone à parois multiples a été menée pour étudier l'effet des nanoparticules sur la chaleur latente de fusion. Les résultats ont démontré que l'amplitude de la réduction de la chaleur latente des Nano-MCPs augmente pour les particules de plus petit diamètre en suspension. Trois mécanismes sont alors possibles :

- 1) la stratification inter-faciale du liquide,
- 2) le mouvement brownien
- 3) l'agglomération des particules

Ces mécanismes ont été examinés pour expliquer la réduction supplémentaire de la chaleur latente par l'affaiblissement des liaisons entre molécules. Bien que des recherches supplémentaires soient nécessaires pour explorer les mécanismes détaillés, des manipulations expérimentales suggèrent que la stratification liquide inter-faciale

et le mouvement brownien ne peuvent pas expliquer le degré de réduction de la chaleur latente observée. D'ailleurs, un modèle d'éléments finis est également présenté comme une méthode de quantification des performances de stockage d'énergie des Nano-MCPs. Les propriétés thermiques basées sur la théorie du milieu effectif modifié et une relation empirique pour la chaleur latente de fusion ont été appliquées comme paramètres du modèle pour déterminer l'énergie stockée et extraite sur une période de temps donnée. Les résultats du modèle montrent que, bien que les inclusions de particules à micro-échelle présentent une certaine amélioration des performances, les nanoparticules dans les MCPs n'apportent aucune amélioration significative des performances du stockage. Avec des particules plus petites, l'amélioration de la conductivité thermique n'est pas suffisamment importante pour surmonter la réduction de la chaleur latente de fusion, et moins d'énergie est stockée pendant la période de charge. Par conséquent, l'approche Nano-MCP peut ne pas être justifiée pour les applications de stockage d'énergie. Cependant, comme les paramètres du modèle dépendent des propriétés des matériaux du système observé, les performances de stockage peuvent varier pour différents Nano-MCPs.

Seeniraj et al. [45] ont présenté une analyse théorique pour l'étude des performances d'un système de stockage thermique à chaleur latente contenant un matériau à changement de phase dispersé avec des particules à haute conductivité thermique. L'effet de la fraction de particules dispersées dans le MCP sur la durée de stockage d'énergie et le flux de chaleur est présenté pour les écoulements laminaires et turbulents, ainsi que des expressions analytiques sont présentées pour diverses quantités d'intérêt pour étudier les capacités de stockage d'énergie. L'effet combiné des propriétés thermiques et d'écoulement du fluide caloporteur et du mélange MCP

est également inclus dans l'étude. On observe qu'il existe une fraction optimale de particules à disperser dans le MCP pour un stockage/récupération d'énergie maximale.

Fan et al. [46] ont revisité expérimentalement le problème classique de la fusion dans un récipient sphérique en présence de matériaux à changement de phase nano-améliorés. Les échantillons de nano-MCPs ont été préparés avec des nanoplaquettes de graphite à différentes concentrations jusqu'à 1wt%. Un certain nombre de propriétés thermophysiques importantes des échantillons de nano-MCPs ont été mesurées en termes de charge et de température. Diverses températures limites ont été adoptées dans les expériences de fusion. Il a été démontré que la durée de fusion totale est diminuée de 10% pour l'échantillon de 0.5% en masse à la température limite la plus basse (seulement 8 °C au-dessus du point de fusion), en raison de la conductivité thermique améliorée par rapport à celle du MCP pur. Cependant, il a été démontré que, pour tous les cas, la contribution de la convection naturelle est considérablement affaiblie par l'augmentation importante de la viscosité du MCP liquide (plus de 60 fois pour l'échantillon de 1% en masse). De plus, à la fois la fraction de fusion et le flux de chaleur moyenné en surface étaient corrélés à un groupe de variables sans dimension régissant ce problème. Des corrélations ont été proposées pour tous les échantillons de nano-MCPs avec une incertitude globale inférieure à 15%.

Fan et al. [47] ont étudié expérimentalement le transfert de chaleur transitoire pendant la fusion de nanocomposites à base de graphène. Des MCPs composites avec de nanoplaquettes de graphène ont été préparés à différentes concentrations jusqu'à 3% en masse. La conductivité thermique, la viscosité dynamique et la chaleur latente de fusion des nanocomposites ont été mesurées. Diverses températures aux limites ont également été adoptées pour faire varier l'intensité de la convection naturelle. Il a été

montré que lorsque la température limite est de 55°C, la fusion est accélérée de 8% à la concentration la plus élevée de 3% en masse de nanoplaquettes de graphène en raison de la conductivité thermique doublée du nanocomposite par rapport à celle du MCP de base. L'augmentation de la température limite conduit à une convection naturelle plus intensive qui à son tour ralentit la fusion car la contribution de la convection naturelle est considérablement supprimée par la viscosité dynamique qui est en effet considérablement augmentée, par exemple, une augmentation de 10 fois à la concentration de 3% en masse. Le taux de fusion est donc déterminé par la compétition entre la conduction thermique améliorée et la convection naturelle affaiblie. De plus, la fraction de fusion et le transfert de chaleur étaient corrélés à des groupements sans dimension de ce problème. Des corrélations valables pour l'ensemble des gammes des paramètres étudiés ont été proposées avec une incertitude inférieure à 20%.

Jourabian et al. [48] ont présenté une étude numérique sur la fusion d'un MCP avec des nanoparticules à l'intérieur d'un tube cylindrique en utilisant la méthode de Boltzmann en réseau. L'eau (glace) et le cuivre sont choisis comme fluide de base (MCP) et nanoparticules, respectivement. Les résultats ont montré que le taux de fusion est le même pour toutes les régions du cylindre pour un faible nombre de Rayleigh, alors qu'il s'intensifie dans la moitié supérieure du cylindre pour un nombre de Rayleigh modéré. De plus, l'existence d'un fort écoulement instable dans la partie inférieure du cylindre à un nombre de Rayleigh de 10^6 provoque une augmentation du taux de fusion après un certain temps défini. Les nanoparticules n'ont pas d'effet significatif sur le taux de fusion au début de la fusion, où le mode de conduction du transfert de chaleur domine entre la paroi chaude et le MCP solide, tandis que la

fusion complète du MCP se produit plus tôt par l'augmentation de la concentration solide.

Donc, la littérature discutée plus haut révèle que l'insertion de nanoparticules dans le MCP en vue d'améliorer les performances thermiques des systèmes à chaleur latente n'est pas absolument bénéfique. Or, un choix judicieux de la concentration en matière de nanoparticules est à déterminer pour chaque configuration à part.

Chapitre 3

Modélisation numérique et validation

1. Modélisation mathématique

La modélisation du transfert de chaleur associé au changement de phase d'un MCP est réalisée en utilisant un le code de calcul Ansys Fluent. Ce code utilise la méthode d'enthalpie-porosité[49]. Avec cette méthode, l'interface de fusion/solidification n'est pas explicitement suivie contrairement à d'autres méthodes retenues par la littérature. Au lieu de cela, une quantité appelée fraction liquide, qui indique la fraction du volume cellulaire sous forme liquide, est associée à chaque cellule du domaine de calcul. La fraction liquide est calculée à chaque itération sur la base évidemment d'un bilan enthalpique. La zone pâteuse est donc une région dans laquelle la fraction liquide se situe absolument entre $\lambda=0$ et 1. La zone pâteuse est modélisée comme un «pseudo» milieu poreux dans lequel la porosité diminue de 1 à 0 à mesure que le matériau se solidifie. Lorsque le matériau est complètement solidifié dans une cellule, la porosité et les vitesses deviennent donc nulles.

Le modèle mathématique décrivant le processus de la fusion du matériau étudié est basé sur les hypothèses suivantes:

- La surfusion du MCP est négligeable.
- La variation du volume due au changement de phase est également négligée.
- Le MCP liquide est considéré comme fluide newtonien.
- L'écoulement dans la région de fusion est supposé être laminaire, instationnaire et incompressible.
- L'approximation de Boussinesq est utilisée dans le terme de flottabilité.
- La dissipation visqueuse est négligée.

Dans les conditions ci-dessus, le transfert de chaleur dans l'ensemble du MCP et le flux visqueux de fusion sont décrits par les équations de conservation suivantes[50]:

Conservation de la masse

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

Conservation de la quantité de mouvement

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} v_x) \right) = \nabla \cdot (\mu \nabla v_x) - \frac{\partial P}{\partial x} + S_x \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} v_y) \right) = \nabla \cdot (\mu \nabla v_y) - \frac{\partial P}{\partial y} + S_y \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} v_z) \right) = \nabla \cdot (\mu \nabla v_z) - \frac{\partial P}{\partial z} + S_z \quad (4)$$

La prise en compte du changement de phase est faite grâce à un modèle de porosité qui considère la zone en transition comme une zone poreuse dont la fraction liquide est comprise entre 0 et 1. La fraction liquide intervient au niveau de la quantité de mouvement grâce au terme source \vec{S} (équation (5)) et permet d'annuler la quantité de mouvement lorsque le MCP est solide, c'est-à-dire quand la fraction liquide est égale à 0.

$$\vec{S} = \frac{M(1-\lambda)^2}{\lambda^3+c} \quad (5)$$

Avec \vec{S} , terme source qui s'exprime grâce à la fraction liquide λ et à un nombre très petit c pour éviter la division par zéro. La constante M est appelée constante de Mushy ou de mélange et détermine la rapidité avec laquelle la vitesse est réduite à zéro lorsque le MCP passe en phase solide. Cette constante est généralement située entre 10^5 et 10^7 .

Pour modéliser la convection naturelle, il est nécessaire d'introduire une dépendance de la masse volumique à la température. L'approximation de Boussinesq (équation (6)) est utilisée.

$$\rho = \rho_0(1 - \beta(T - T_0)) \quad (6)$$

En tenant compte de la convection naturelle et du modèle porosité enthalpie, l'équation de la quantité de mouvement s'écrit comme présenté dans l'équation (7).

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}\vec{v}) \right) = -\nabla \vec{P} + \nabla \cdot (\mu \nabla v) - \rho \vec{g} \beta (T - T_0) + \vec{S} \quad (7)$$

Conservation de l'énergie

L'équation de la conservation de l'énergie peut s'écrire selon les équations (8) et (9).

$$\rho \frac{\partial h(T)}{\partial t} + \nabla h(T) \rho \vec{v} - \nabla \cdot (\mathcal{D} \nabla h(T)) + S = 0 \quad (8)$$

$$\rho \frac{\partial h(T)}{\partial t} + \nabla h(T) \rho \vec{v} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - S \quad (9)$$

Les systèmes subissant un changement de phase ont une enthalpie totale égale à la somme de l'énergie sensible $h_{\text{sensible}}(T)$ et de l'énergie latente $h_{\text{latente}}(T)$ comme présenté dans l'équation (10).

$$h(T) = h_{\text{sensible}}(T) + h_{\text{latente}}(T) \quad (10)$$

La chaleur sensible $h_{\text{sensible}}(T)$ correspond à l'énergie stockée sous forme d'élévation de la température du matériau solide ou liquide et peut être exprimée grâce à l'équation (11).

$$h(T) = \int_{T_{\text{initiale}}}^{T_{\text{fusion}}} C_{p,s} dT + \int_{T_{\text{fusion}}}^{T_{\text{finale}}} C_{p,l} dT \quad (11)$$

La part d'énergie latente $h_{\text{latente}}(T)$ représente l'énergie accumulée par le matériau durant son changement de phase et peut s'exprimer selon l'équation (12).

$$h_{\text{latente}}(T) = \lambda \Delta h \quad (12)$$

Avec :

λ Fraction liquide à la température T

$$\lambda = \begin{cases} 0 & \text{si } T \leq T_s \\ 1 & \text{si } T \geq T_l \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & \text{si } T_s < T < T_l \end{cases} \quad (13)$$

Si les équations (11) et (12) sont recombinaées dans l'équation de conservation

d'énergie, en négligeant les termes sources, on obtient alors l'équation-bilan (14).

$$\rho \left[\frac{\partial h(T)}{\partial t} + \nabla \cdot (v h(T)) + \Delta h \lambda + \Delta h \nabla \cdot (v \lambda) \right] = \Delta \cdot q \quad (14)$$

La chaleur sensible et la fraction liquide sont alors reliées par l'équation (14) et des itérations entre l'équation de conservation d'énergie et l'équation de la fraction liquide $\lambda = \frac{T - T_s}{T_1 - T_s}$ permettent de déterminer la température.

Telles que T_1 et T_s sont respectivement les températures du liquidus et du solidus.

Le MCP est initialement à une température constante T_i .

$$t=0: T=T_i \quad (15)$$

Alors qu'à la paroi du tube, une condition de non glissement et un flux convective sont considérés.

$$u = v = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial x} = h(T_{HTF} - T_w) \quad (16)$$

Avec T_{HTF} et T_w sont respectivement la température du fluide caloporteur et celle de la paroi.

2. Procédure numérique

La résolution numérique du modèle mathématique retenu a été réalisée en utilisant un code de calcul commercial (ANSYS Fluent 18.2). Des volumes finis non structurés ont été utilisés pour le maillage spatial. Pour la discrétisation des différents termes du modèle, le schéma QUICK a été utilisé tandis que l'algorithme SIMPLE a été employé pour le couplage vitesse-pression. Pour la correction de l'équation de pression, le schéma PRESTO a été choisi. Des facteurs de relaxation ont été fixés 0.3, 0.7, 1 et 0.9 pour respectivement la pression, la vitesse, l'énergie et la fraction liquide. Les valeurs de la convergence résiduelle ont été retenues comme suivant: 10^{-3} , 10^{-3} et 10^{-6} pour respectivement les équations de la continuité, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Des tests numériques pour l'indépendance des prédictions numériques

de la taille de la grille et le pas du temps ont été mis en œuvre. Ils sont présentés pour l'évolution temporelle de la fraction liquide moyenne dans la cavité (Figs. 3.1,3.2 et 3.3).

Puisque ce model numérique a été exploité dans différentes configurations d'étude, on a optimisé donc le choix numérique pour chaque cas à part.

Donc, pour la première configuration dans le chapitre 4 (tube à section circulaire rempli d'un MCP), les tests numériques d'optimisation ont montré que le choix optimal à retenir est de 10577 grilles de volumes finis non structurés avec un pas de temps 0.1.

Quant à la deuxième configuration dans le chapitre 5 (tube à section elliptique rempli d'un MCP), le choix optimal pour le nombre de volumes de contrôle est 10333 et 15951, pour respectivement les inclinaisons des capsules de 0° et 90° . Alors que les choix optimaux pour le pas de temps ont été 0.5 et 0.1 s respectivement pour les deux inclinaisons 0° et 90° du tube.

Enfin, pour la troisième configuration dans le chapitre 6 (tube à section circulaire rempli d'un nano-MCP), il est démontré que 22728 volumes de contrôle et un pas de temps de 0.05 s sont un choix optimal.

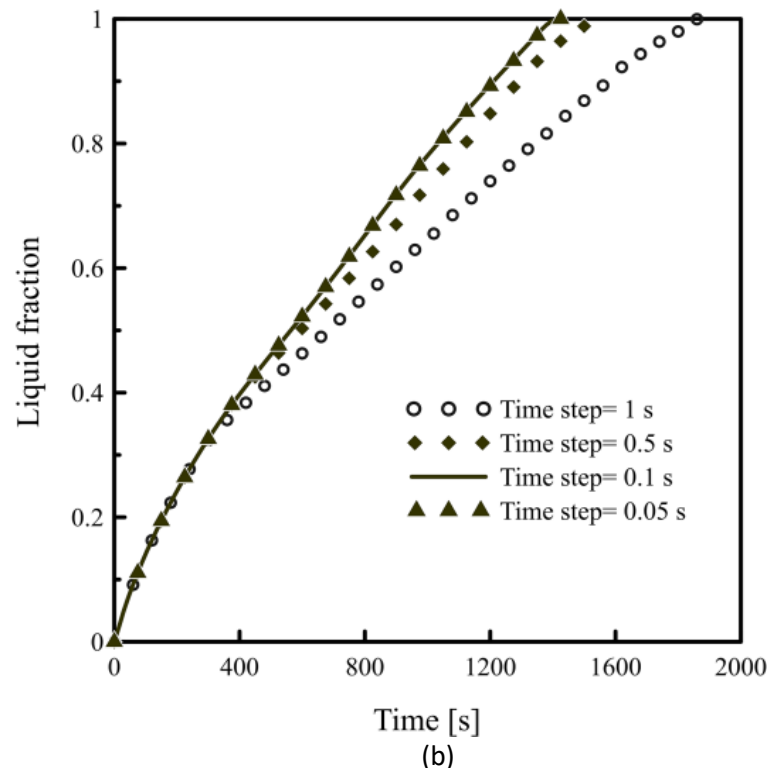
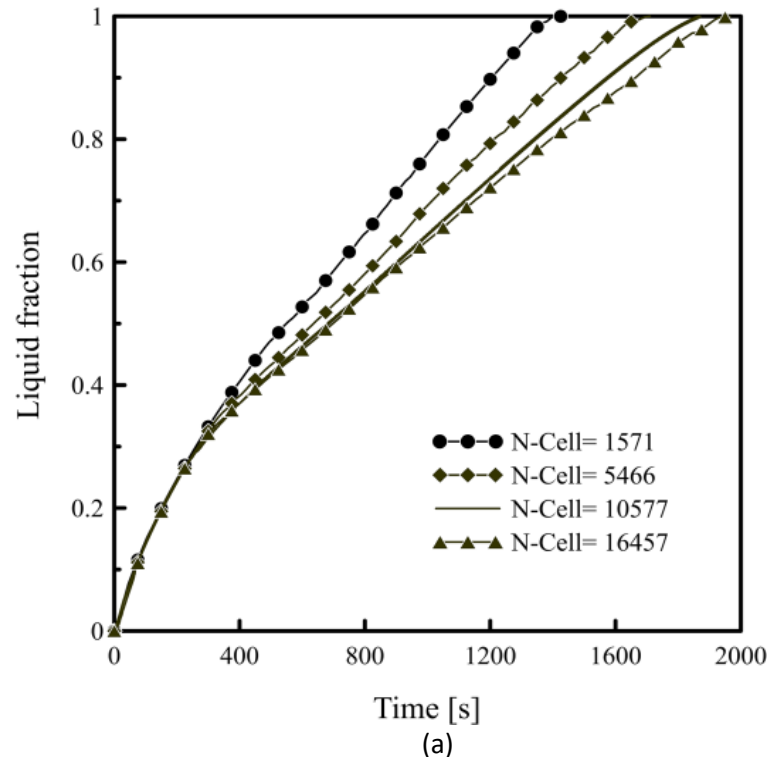
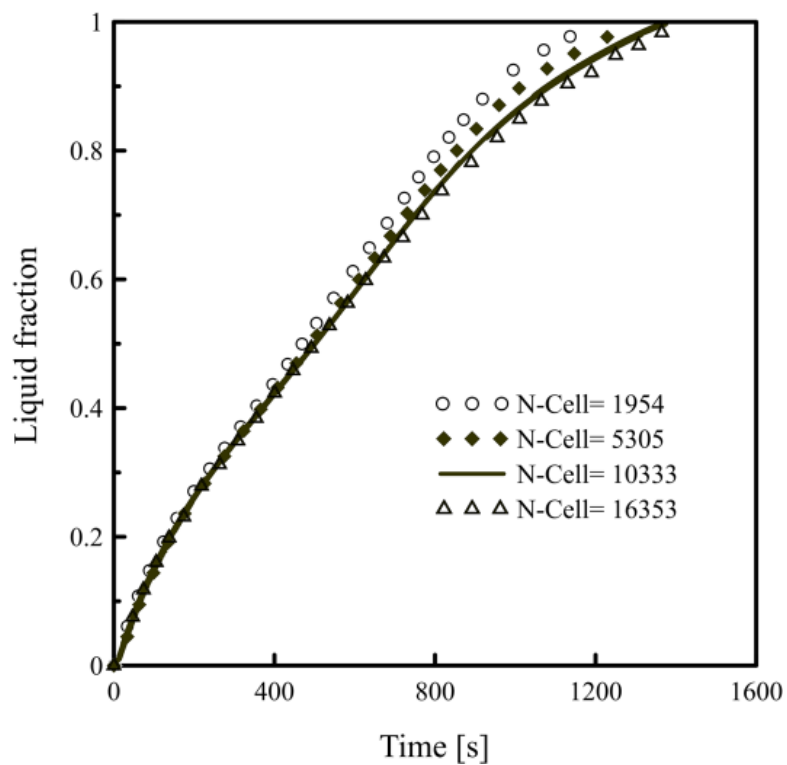
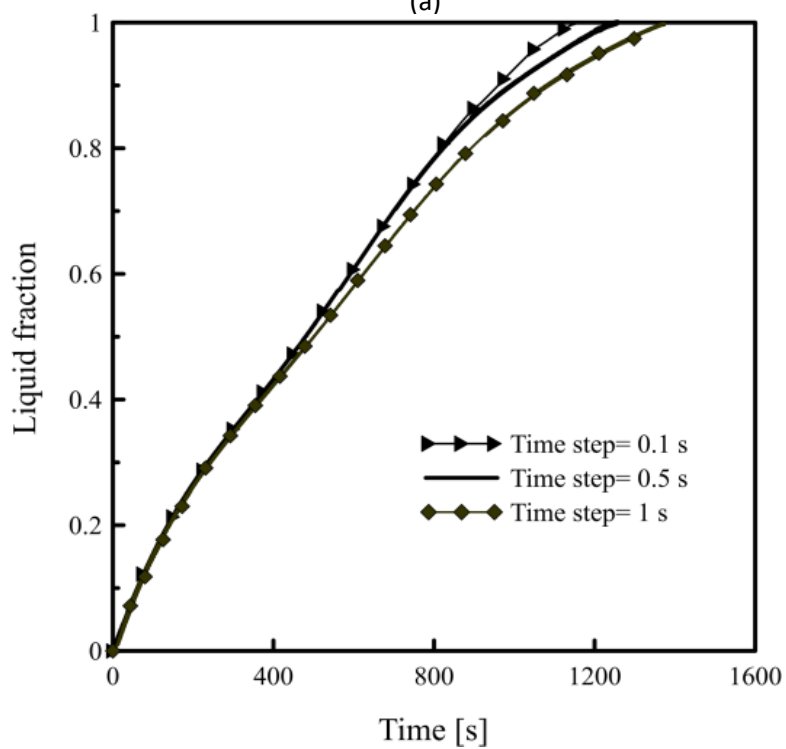


Figure 3.1 : Optimisation numérique (1^{ère} configuration)

(a) nombre de maille (b) pas de temps



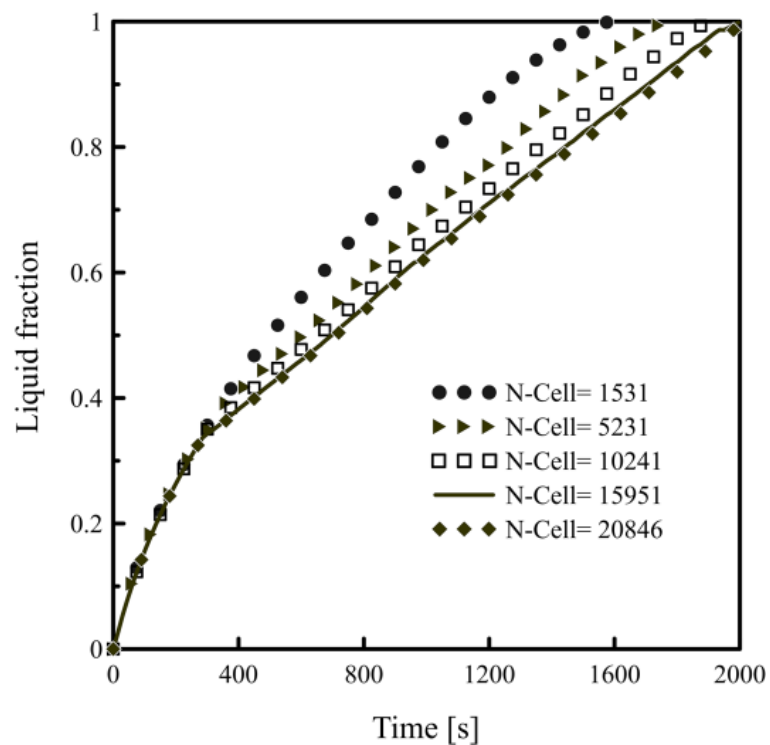
(a)



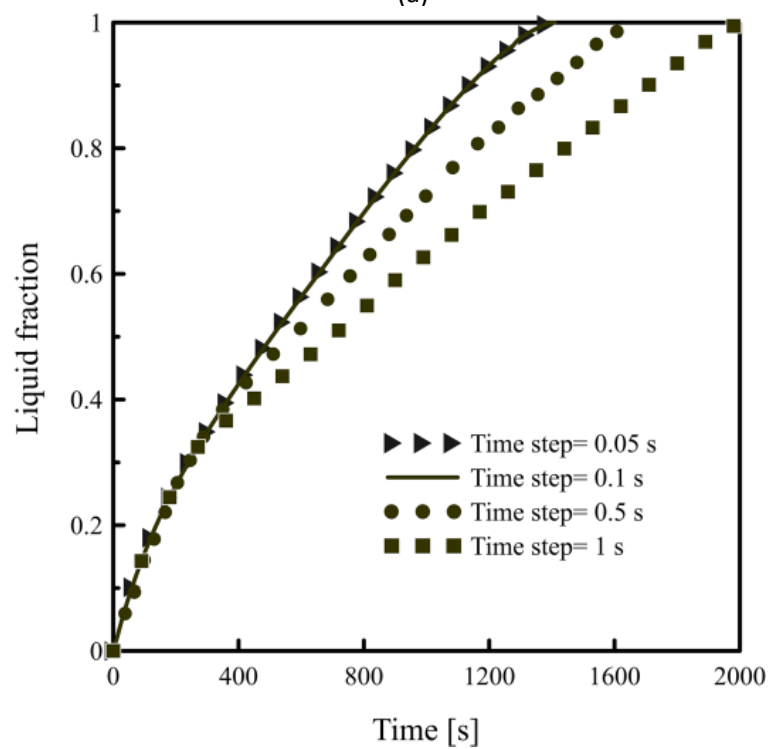
(b)

Figure 3.2 : Optimisation numérique (2^{ème} configuration, inclinaison 0°)

(a) nombre de maille (b) pas de temps



(a)



(b)

Figure 3.3 : Optimisation numérique (2^{ème} configuration, inclinaison 90°)

(a) nombre de maille (b) pas de temps

3. Validation numérique

La validité des résultats numériques du code de calcul utilisé dans cette étude a été vérifiée par comparaison des prédictions numériques avec des résultats expérimentaux et numériques de référence (benchmark) de la littérature.

3.1. Comparaison avec le modèle de Hannoun et al.[51]

Les prédictions du modèle numérique de changement de phase ont été validées par comparaison avec les résultats de référence présentés par Hannoun et al. [51]. Les auteurs ont étudié la fusion de l'étain dans une cavité carrée ($0.1 \times 0.1 \text{ m}^2$). Une paroi verticale de la cavité a été chauffée à une température supérieure à la celle de fusion (508 K). Les parois horizontales ont été maintenues adiabatiques. La comparaison des deux résultats est basée sur l'évolution temporelle de la fraction liquide dans la cavité. Un bon accord entre les deux résultats est obtenu, comme le montre la figure 3.4.

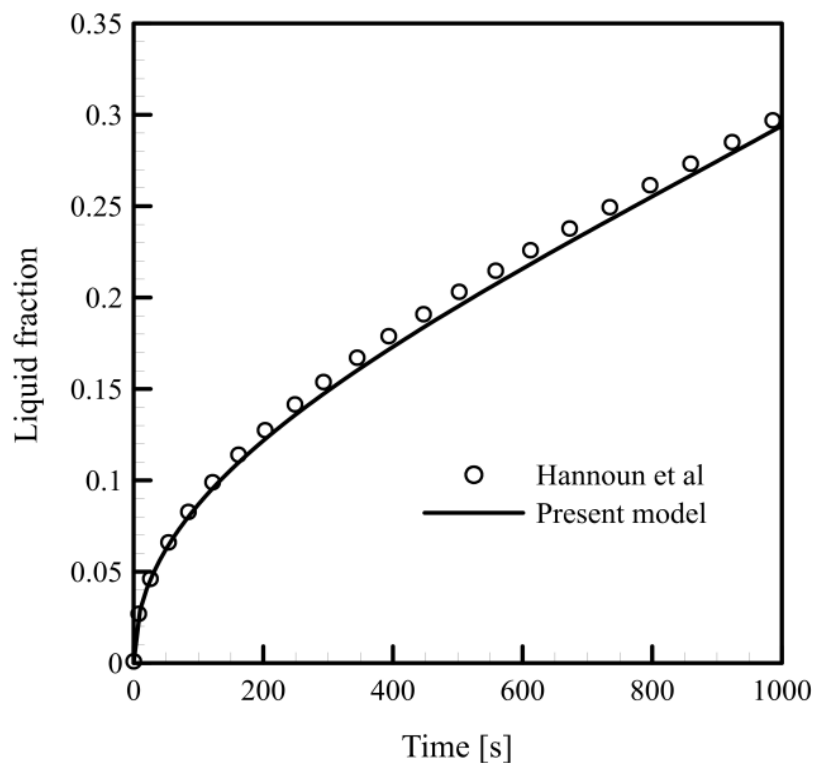


Figure 3.4 : Comparaison des prédictions numériques (fraction liquide) du présent modèle avec les résultats numériques de Hannoun et al. [51]

3.2. Comparaison avec les résultats expérimentaux de Assis et al.[18]

D'ailleurs, les prédictions numériques du code utilisé dans la présente étude sont validées par comparaison avec les résultats expérimentaux de Assis et al.[18]. Un bon accord est obtenu comme on peut le constater sur la figure 3.5 pour la fusion de la paraffine wax (Tab 3.1) enfermée dans une capsule sphérique (80 mm Ø). Le MCP solide(paraffine) a été initialement maintenue à une température de $T_i=29^\circ\text{C}$. La capsule a été exposée à de l'eau chaude (39°C).

Tab. 3.1: Propriétés thermophysiques de la paraffine RT27 [18]

Propriétés	Valeurs
Température de fusion	28-30 °C
Masse volumique	870 kg m ⁻³
Viscosité dynamique	3.42 10 ⁻³ kg m ⁻¹ s ⁻¹
Chaleur spécifique (solide / liquide)	2.4/1.8 kJ kg ⁻¹ K ⁻¹
Conductivité thermique (solide / liquide)	0.24/0.15 W m ⁻¹ K ⁻¹
Chaleur latente	179 kJ kg ⁻¹

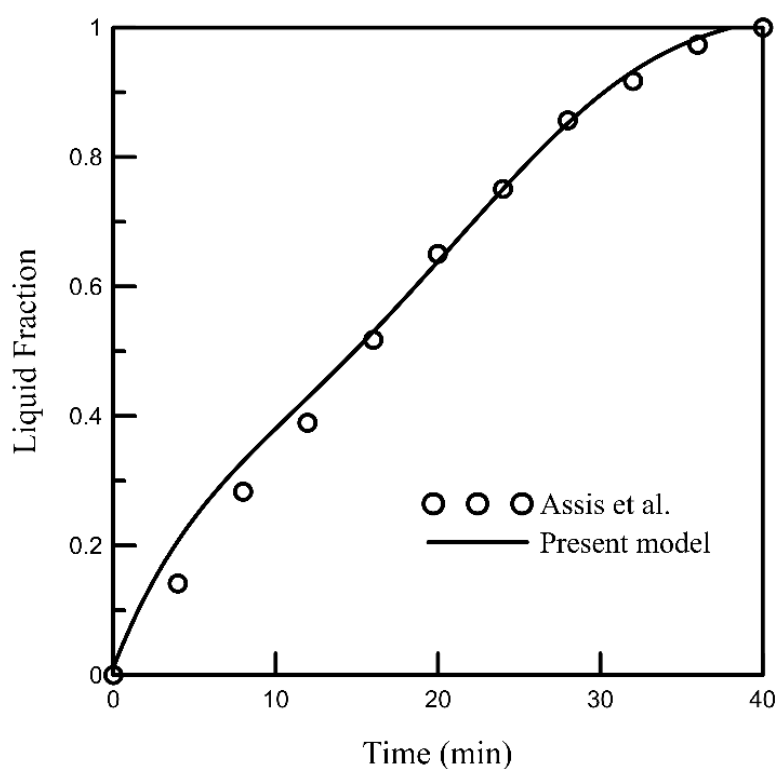


Figure 3.5: Comparaison du présent modèle avec les résultats expérimentaux d'Assis et al. [18]

Chapitre 4

Etude du changement de phase dans un échangeur tubulaire

1. Introduction

Ce chapitre expose une étude de la fusion d'un MCP (n-eicosane) dans un tube d'échangeur de chaleur, la fusion du MCP correspond en fait à la phase de charge thermique de l'échangeur, laquelle est assurée par le biais un fluide caloporteur venant d'un capteur solaire thermique. La chaleur emmagasinée sera récupérée ultérieurement au besoin. Donc, des simulations numériques sont menées pour la mise en évidence du comportement thermique et aussi dynamique du MCP lors de la phase de stockage thermique dans l'échangeur tubulaire. L'étude est en effet réalisée pour différents taux de charge thermique. Les caractéristiques thermiques de la fusion du n-eicosane sont donc examinées à travers la distribution des températures pendant l'évolution du processus de fusion, la dynamique du changement de phase quant à elle est illustrée par l'évolution avec le temps de la fraction liquide comme paramètre de contrôle de la fusion du MCP, les lignes de courants et enfin la durée de fusion complète. En fait, la durée de fusion complète revêt d'une grande importance pratique pour notamment gérer la charge thermique de l'échangeur de chaleur. En effet, on a souvent intérêt à minimiser la durée de charge thermique.

Par ailleurs, les résultats du présent chapitre ont fait l'objet d'une publication internationale [52].

2. Modèle physique

Considérons une section d'un échangeur de chaleur qui consiste évidemment en un tube horizontal de diamètre D rempli de MCP (Fig. 4.1). Un fluide caloporteur venant d'un capteur solaire thermique ($T_{HTF} > T_f$) s'écoule parallèlement sur le tube. Durant le processus de charge thermique de fusion, le MCP subit un changement de phase solide-liquide.

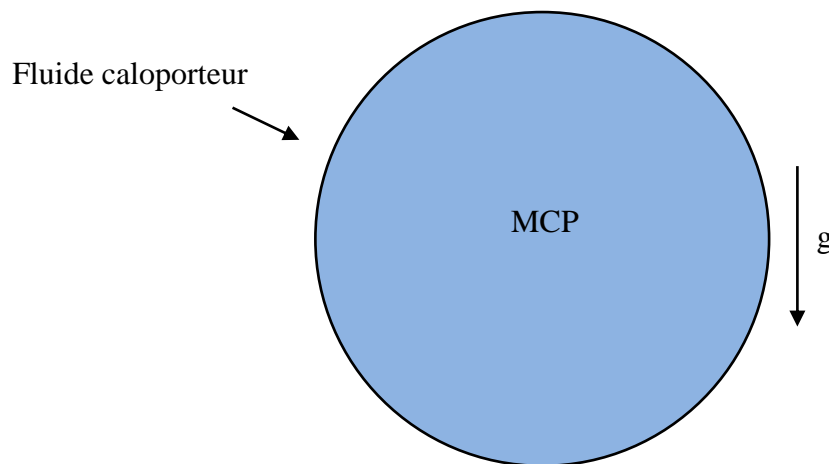


Figure 4.1 : Représentation du problème de fusion du MCP dans une cavité circulaire

Ce problème se ramène évidemment à l'étude de la fusion 2D du MCP dans une cavité à section circulaire (Fig. 4.1) car le transfert de chaleur le long de l'axe du tube peut être négligé sur une portion axiale donnée. De plus, l'épaisseur du tube est négligée, étant donné que sa conductivité thermique est très élevée comparée à celles du fluide caloporteur et le MCP. Donc, le tube ne présente pas une résistance thermique au transfert de chaleur entre le fluide caloporteur et le MCP en fusion.

Le MCP est initialement à une température T_i . La surface extérieure du tube est soumise à un flux de chaleur convectif (coefficient moyen de transfert de chaleur par convection h).

La modélisation mathématique ainsi que l'approche numérique de cette étude sont déjà expliquées dans le chapitre 3 (sections 1 et 2).

3. Résultats et discussions

L'analyse du problème 2D de la fusion du MCP (n-eicosane) est effectuée au sein d'un tube de diamètre $D=4$ cm. Les propriétés thermophysiques du n-eicosane sont montrées dans le tableau 4.1. Le MCP est initialement solide à $T_i= 290.15$ K. Sur le tube circule un fluide caloporteur. Donc, La surface externe des tubes est soumise à un flux de chaleur convectif avec un coefficient de convection thermique moyen (h). En fait, différentes valeurs du coefficient de convection sont simulées ($h=25-100$ $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$), cette plage couvre évidemment différents types de fluides caloporteurs comprenant ceux liquides et gazeux. La température du fluide caloporteur est maintenue constante à $T=325\text{K}$.

Dans cette étude, les caractéristiques de la fusion du n-eicosane dans un échangeur tubulaire horizontal sont analysées pour différents taux de chauffe. L'analyse comprend pour ce faire les distributions de température, les lignes de courant, l'évolution des fractions liquides et la durée de fusion complète.

Tab. 4.1: Propriétés thermophysiques du MCP (n-eicosane)[24]

Propriétés	Valeurs
Température de fusion	308.15 – 310.15 K
Masse volumique de référence (ρ_0)	770 kg.m^{-3}
Viscosité cinématique	5×10^{-6} $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
Chaleur spécifique	2.460 $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Conductivité thermique	0.1505 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Chaleur latente de fusion	247.6 kJ.kg^{-1}
Coefficient d'expansion thermique	0.0009 K^{-1}

3.1. Distribution de températures

La figure 4.2 montre la distribution de températures dans le cylindre à cinq instants différents (250, 500, 750, 1000 et 1250 s) pour $h=100 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Au début du processus de la fusion du MCP, la distribution de températures est concentrique. Les isothermes ont donc la forme de la paroi du cylindre chauffé. À ce stade, le transfert de chaleur se fait principalement par conduction. Ce comportement a été observé dans d'autres travaux de la littérature [19, 27].

Ensuite, à mesure qu'on avance dans le processus de fusion, la partie supérieure de la cavité devient de plus en plus chaude à cause de la convection naturelle dans le MCP liquide[53], le fluide chaud monte donc à la partie supérieure du tube, il est évidemment remplacé par le MCP liquide plus froid.

Enfin, vers la fin du processus de fusion (1250 s), une sorte de stratification est établie dans le MCP liquide dans la partie supérieure de la cavité, les températures y calculées sont dans la plage de 294-317 K tandis que dans la moitié inférieure de la cavité la température ne dépasse guère le niveau de 306 K. Cela signifie qu'une partie de l'énergie thermique absorbée de la source chaude est utilisée pour chauffer la masse fondue au-dessus du MCP solide. Cet effet de convection thermique est plus prononcé en cas de la baisse du taux de chauffe notamment à $h=25 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

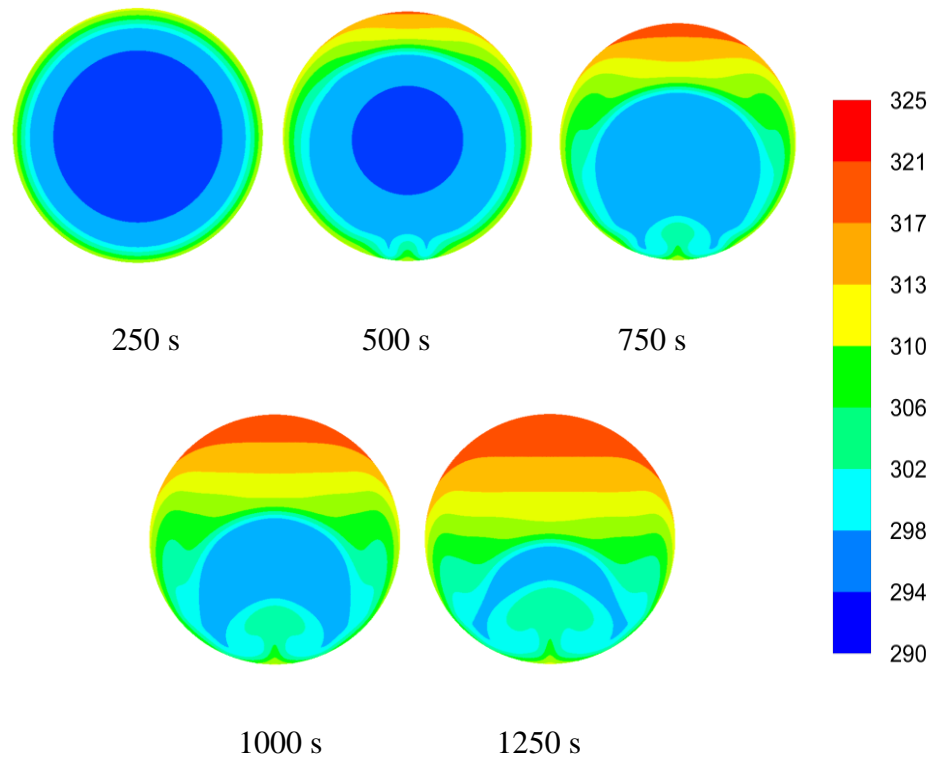


Figure 4.2 : Distribution de températures à différents instants pour $h=100 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

Les isothermes concentriques sont de plus en plus déformées à mesure qu'on avance dans le temps, cette distorsion est due aux courants convectifs provoqués par la force de flottabilité. La distorsion des isothermes est observée à 1000 s pour $h = 100 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ mais la distorsion à faible taux de charge (*i.e.* $h = 25 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) est observée plutôt à 1500 s, comme on peut le voir sur la figure 4.3. Par conséquent, le début de la convection naturelle est plutôt favorisée par la faible charge thermique.

A l'instant 1250 s, comme observé précédemment (avec $h = 100 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$), des températures stratifiées sont observées dans la couche liquide dans la partie supérieure du cylindre. Cette couche fondue, de plus en plus épaisse, augmente au fur et à mesure, ce qui conduit donc à diminuer le taux de fusion sur la surface solide supérieure.

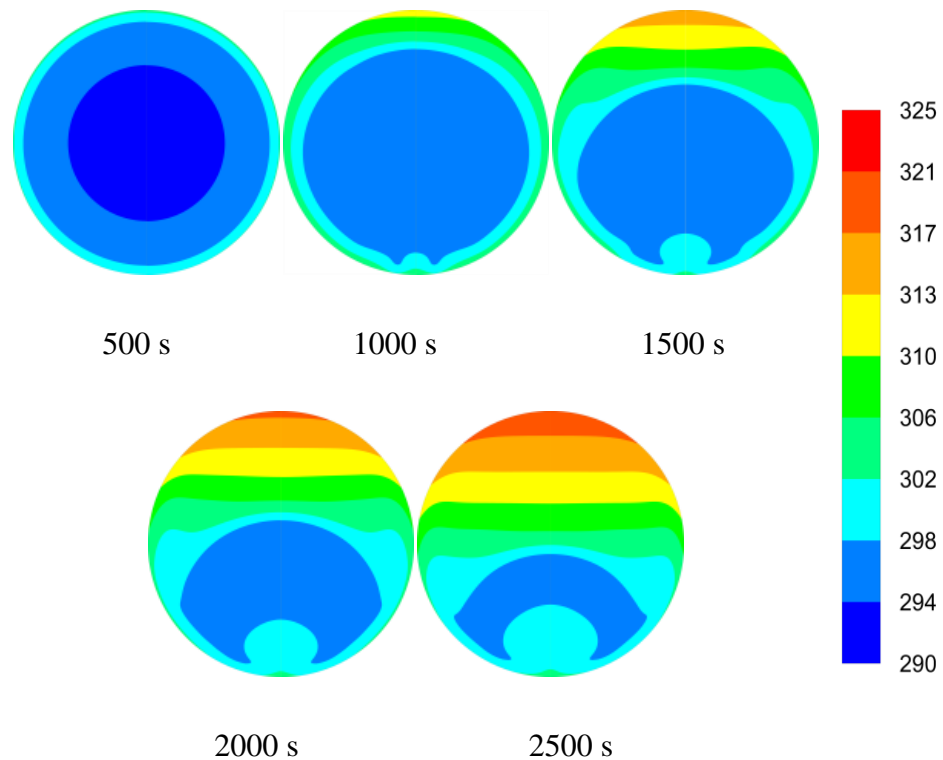


Figure 4.3 : Distribution de températures à différents instants pour $h=25 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

3.2. Fractions liquides et les lignes de courant

Les fractions liquides et les lignes de courant dans le tube à différents intervalles de temps dans le cas de $h=100 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ sont présentées sur la figure 4.4. Les fractions de fusion sont illustrées sur la moitié droite du tube tandis que les lignes de courant sont illustrées dans la moitié gauche. La masse fondue est illustrée donc par la couleur rouge tandis que le MCP solide est de couleur bleue, les autres couleurs montrent la zone pâteuse (c'est-à-dire entre le rouge et le bleu).

Au début du processus de la fusion du MCP (250 s), une fine couche de MCP liquide est formée symétriquement entre la paroi de la cavité chauffée et le MCP solide subissant un changement de phase, la couche fondue est de ce fait concentrique. Cette couche mince n'est pas suffisante pour le développement de courants de la convection naturelle. Le transfert de chaleur est alors dominé par la conduction comme mentionné plus haut ($h = 25 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$).

Par conséquent, dans de petits volumes, la convection naturelle peut être ignorée comme indiqué par les travaux antérieurs sur les problèmes de fusion/solidification [20, 21].

Yang et al. [22] ont montré qu'il existe une différence considérable dans la durée de fusion complète du MCP dans un système de calandre et de cylindre. Les valeurs de la durée de fusion estimées par deux modèles différents, à savoir les modèles à conduction et à convection, ont montré que la durée de fusion complète est améliorée d'un facteur 1.74 lorsque le modèle de convection est adopté.

A l'instant 500s, la couche fondue devient plus épaisse dans la moitié supérieure du tube. La progression de la fusion semble être meilleure sur la région supérieure de l'enceinte que sur la région inférieure. En raison de l'effet de la flottabilité, le transfert de chaleur est amélioré dans la région au-dessus du MCP solide. La majeure partie de la chaleur absorbée est transportée par les courants de la convection naturelle vers le haut de l'enceinte. De plus, la surface solide du MCP exposée au MCP liquide diminue avec le temps.

Au fil du temps (750s), alors que le front de changement de phase supérieur dans l'enceinte a toujours une forme incurvée, les deux petits tourbillons contrarotatifs modifient complètement la forme du front de fusion au fond du tube.

Cependant, lorsque la densité solide est supérieure à celle du MCP liquide, le noyau solide se déplace vers le bas pendant le processus de fusion, entraîné par la force de gravité. Cet effet est étudié dans certaines études [14, 28]. Mais, lorsqu'il n'y a pas de différence significative de densité, comme dans le cas présent, le noyau solide ne coule pas et le liquide est contraint, autrement dit il est maintenu à cause de la force de flottabilité.

Par ailleurs, les lignes de courant sont symétriques par rapport au plan vertical du tube (Fig. 4.4).

A l'instant 500 s, deux circulations contrarotatives se forment, provoquant ainsi un mouvement ascendant du MCP liquide. A l'instant 750 s, pour le taux de chauffe élevé, deux tourbillons supplémentaires caractérisent la structure de l'écoulement. Des courants convectifs plus forts sont en effet observés. Pendant ce temps, l'écoulement pour le bas taux de chauffe (Fig. 4.5) est dominé par deux grands tourbillons, les tourbillons n'apparaissent au fond de l'enceinte qu'aux derniers stades du processus de fusion (1250 s). A ce moment-là, la convection thermique est importante au milieu de l'enceinte. Une faible convection est cependant observée dans la région supérieure. A l'instant 1000 s, les tourbillons deviennent plus gros, plus de MCP est ensuite fondu. Les centres des tourbillons supérieurs sont légèrement décalés vers le bas.

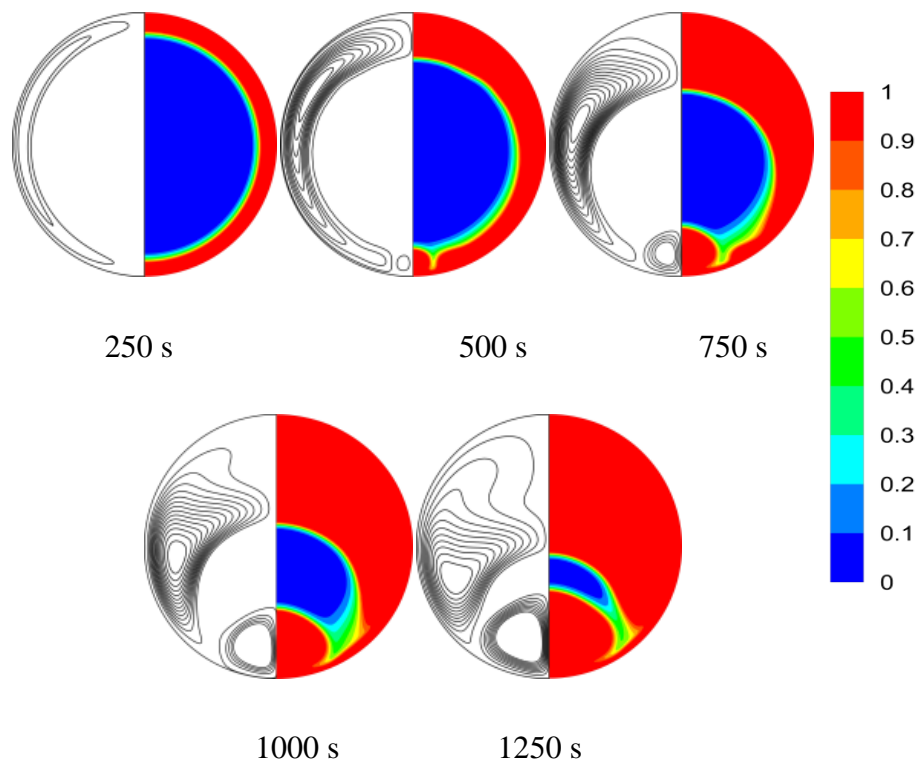


Figure 4.4 : Fractions liquides (droite) et lignes de courant (gauche) à différents moments pour $h=100 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

3.3. Evolution de la fraction liquide

La variation temporelle de la fraction liquide moyenne est représentée sur la figure 4.6. Comme indiqué dans la littérature [54], la fraction liquide/solide évolue généralement avec le temps en fonction de racine carrée [15]. Le taux de fusion est élevée aux premiers stades du processus de fusion du MCP, car la surface d'échange de chaleur entre le MCP solide et la couche fondue est grande, la couche du MCP liquide mince représente en fait une petite résistance thermique. Avec le temps, la quantité de matière fondue devient plus grande et donc la chaleur absorbée est utilisée à la fois pour fondre le MCP solide et chauffer d(ailleurs la masse fondue supérieure. Par conséquent, le taux de fusion est toutefois ralenti.

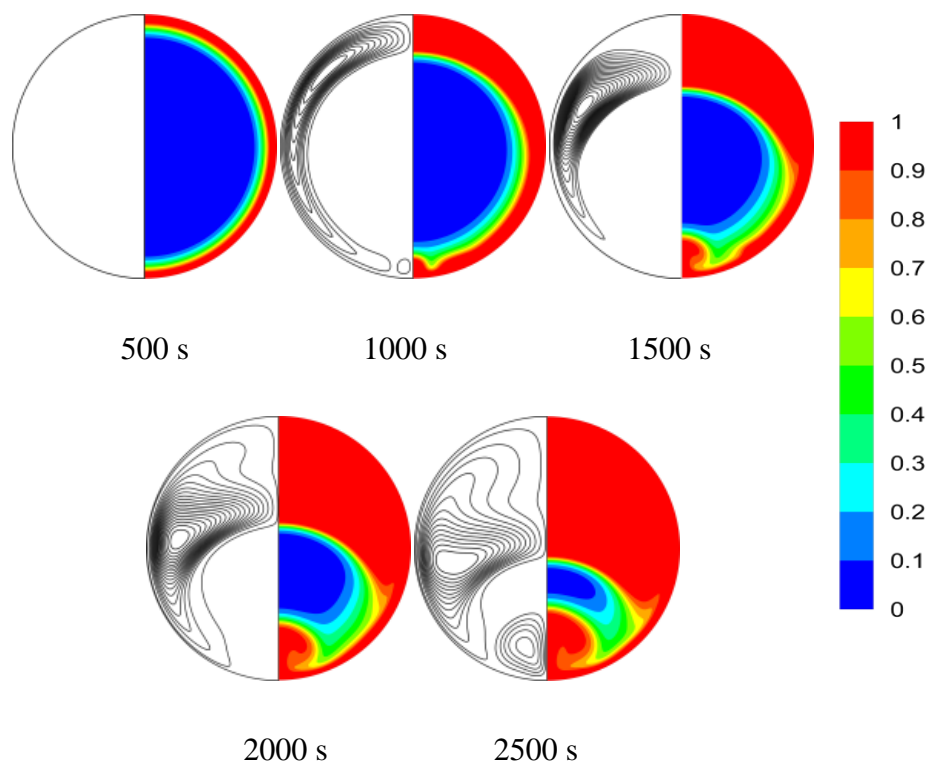


Figure 4.5 : Fractions liquides (droite) et lignes de courant (gauche)
à différents moments pour $h=25 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

3.4. Durée de fusion complète du MCP

Enfin, la durée nécessaire à la fusion complète du n-eicosane dans le tube horizontal de 4 cm de diamètre est calculée pour différents taux de chauffe. Or, la figure 4.7 montre la variation de la durée de fusion complète avec le coefficient de convection thermique entre le tube et le fluide caloporteur. Ces coefficients variaient de $h=25$ à $1000 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, correspondant ainsi à une large gamme de fluides caloporteurs. Pour des valeurs inférieures du coefficient de convection, la durée de fusion diminue rapidement avec l'augmentation des valeurs du coefficient h . Mais, pour des valeurs plus élevées, le temps de fusion varie légèrement avec la variation du coefficient de convection. Cela signifie qu'avec des liquides, comme fluide caloporteur, le temps de fusion n'est pas trop affecté par le taux de chauffage tandis que pour les fluides caloporteurs gazeux, la durée de fusion est fortement affectée par le taux de chauffage.

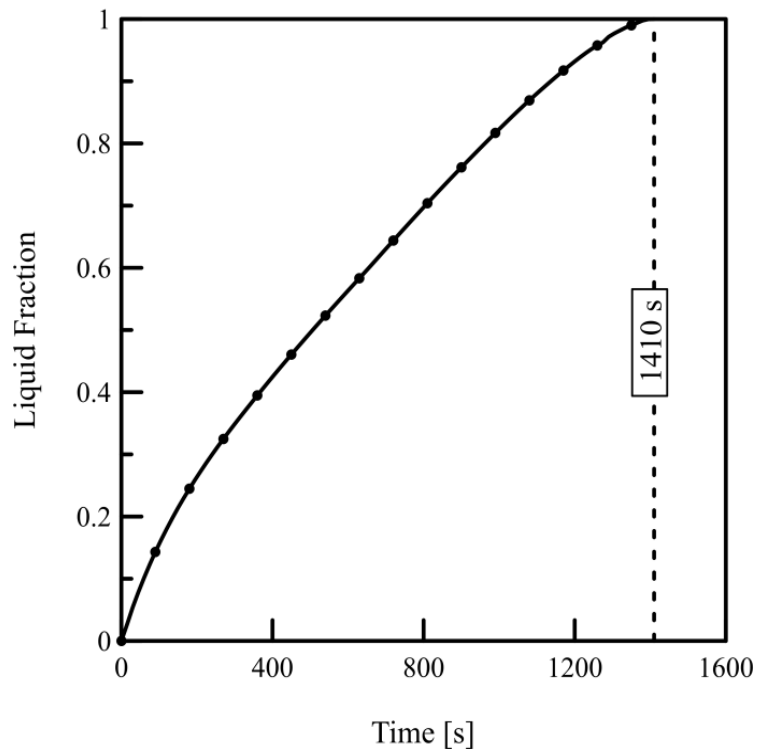


Figure 4.6: Évolution de la fraction liquide avec le temps pour $h=100 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

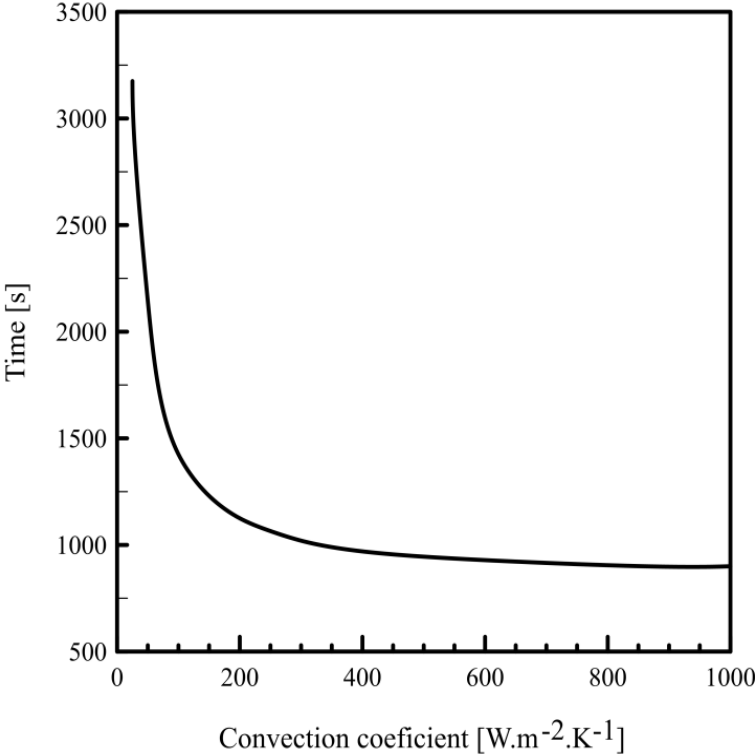


Figure 4.7: Durée de fusion complète en fonction du coefficient de convection de chaleur

4. Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié la fusion d'un MCP (n-eicosane) dans un tube horizontal d'échangeur de chaleur. Les comportements thermique et dynamique du MCP dans le tube ont été numériquement examinés lors du changement de phase solide-liquide du MCP correspondant au stockage de la chaleur latente dans l'échangeur de chaleur tubulaire. Différents taux de charge thermiques ont été simulés. Les caractéristiques thermiques et dynamiques de la fusion du n-eicosane ont été étudiées à travers la distribution des températures pendant l'évolution du processus de fusion, l'évolution avec le temps de la fraction liquide, les lignes de courants et la durée de fusion complète. Les conclusions suivantes sont tirées au terme de cette étude :

- 1) Durant le premier stade de fusion, la conduction thermique domine les transferts thermiques au sein du MCP.
- 2) Ensuite, la convection naturelle devient de plus en plus importante et domine donc le transfert thermique dans le MCP en fusion.
- 3) Au fur et à mesure, les courants de la convection naturelle dans le MCP liquide ont tendance à chauffer la partie supérieure du MCP confiné. Ce qui ralentit en conséquence le processus de fusion car une part d'énergie y est consommée. Cet inconvénient, vis-à-vis le processus de fusion, est plus prononcé pour le bas taux de charge ($h=25 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$).
- 4) A la fin du processus de fusion du MCP, une stratification thermique est observée, ce qui veut dire que le transfert de chaleur est de nouveau dominé par le mode conduction. Idem, cette stratification est plus prononcée pour le bas taux de charge ($h=25 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$).
- 5) Contrairement aux fluides caloporteurs liquides, pour ceux gazeux la durée de fusion complète est très sensible au taux de charge.

6) La durée de charge peut en fait être améliorée, il y a des solutions simples pour y arriver.

Parmi ces solutions, il y a le choix d'une géométrie plus performante que le tube à section circulaire comme par exemple le tube à section elliptique.

En effet, cette solution sera envisagée dans le chapitre suivant (5).

D'ailleurs, d'autres solutions sont en vogue comme l'insertion de nanoparticules dans le MCP pour améliorer la conductivité thermique effective du nouveau matériau composite obtenu.

Cette option sera en effet abordée dans le dernier chapitre (6).

Chapitre 5

Etude de la fusion d'un MCP dans un échangeur tubulaire à section elliptique

1. Introduction

Ce chapitre a pour objet l'étude de la fusion d'un MCP (n-eicosane) dans un tube d'échangeur de chaleur à section elliptique. Cette étude est motivée dans un objectif d'améliorer les performances thermiques des échangeurs tubulaires à chaleur latente. La fusion correspond en effet à la charge thermique de l'échangeur. Au même titre que l'investigation entamée dans le chapitre 4, un fluide caloporteur communicant avec un capteur solaire thermique représente la source de chaleur pour la fusion du MCP dans les tubes de l'échangeur. La chaleur emmagasinée est récupérée donc pour une application domestique.

La littérature indique que la section elliptique d'une cavité offre souvent une durée de charge et de décharge thermique nettement moindre à celle d'une cavité circulaire. On envisage dans cette étude la mise en évidence de l'effet en particulier de l'orientation de la section elliptique du tube d'un échangeur à chaleur latente durant la fusion du MCP. Cette étude numérique est menée pour analyser deux orientations (horizontale et verticale du tube), c'est à dire la position de l'axe majeur de l'ellipse. Donc, les résultats des deux orientations sont comparés, une configuration de base (un tube à section circulaire) sert comme configuration de référence. La configuration de référence a été en effet étudiée plus haut dans le chapitre 4. Les caractéristiques thermiques de la fusion du n-eicosane sont donc comparées pour deux tubes elliptiques (horizontal et vertical) en analysant bien entendu la distribution des températures pendant l'évolution du processus de fusion, l'évolution avec le temps de la fraction liquide pour contrôler le processus de fusion du MCP, les lignes de courants et enfin la durée de fusion complète.

Les résultats du présent chapitre ont également fait l'objet d'une publication internationale [55].

2. Modèle physique

Le problème 2D de la fusion d'un MCP (n-icosane) est considéré dans une enceinte elliptique. Le schéma de l'enceinte elliptique est illustré dans la figure 5.1. L'enveloppe de l'enceinte est supposée avoir une épaisseur négligeable. Le MCP est initialement solide à $T_i < T_f$. Les propriétés thermophysiques du n-icosane sont présentées dans le chapitre 4 (Tab 4.1). Un fluide caloporteur circule sur l'enceinte dont la température est $T_{HTF} > T_f$ et le coefficient de transfert thermique (h) est supposé constant.

Le modèle mathématique de ce problème ainsi que la procédure de solution numérique sont détaillés dans le chapitre 3.

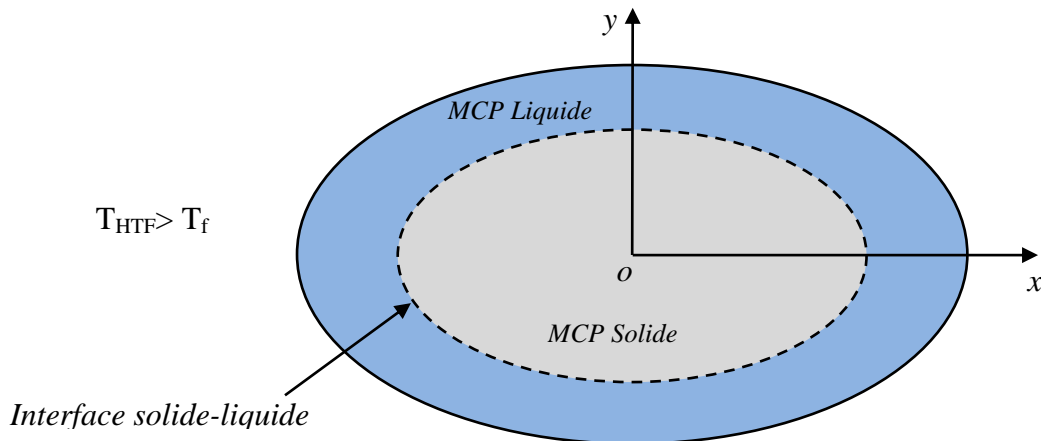


Figure 5.1: Représentation de la cavité elliptique remplie de MCP en début de fusion

3. Résultats et discussions

Les résultats de cette étude sont présentés pour la simulation numérique du processus de fusion du n-eicosane dans un tube à section elliptique d'axes mineur et majeur $a=28$ mm et $b=14$ mm, respectivement. Le processus de fusion est analysé pour deux inclinaisons du tube elliptique par rapport à la ligne horizontale (horizontale (0°) et verticale (90°)).

Le MCP est initialement solide à $T_i=290,15$ K. Sur le tube elliptique, un fluide caloporteur s'écoule à température constante $T_{HTF}=325$ K.

Les figures 5.2.a-e et 5.3.a-e illustrent, à différents instants (250, 500, 750, 1000 et 1250 s), les distributions de température, les fractions liquides et donc les lignes de courant. Deux inclinaisons (0° et 90°) sont alors examinées.

3.1. Distribution de température

Les isothermes sont parallèles à la paroi de la capsule au début du processus de fusion (250 s) pour les deux inclinaisons (0° et 90°) comme on peut le voir sur la figure 5.2.a. Le transfert de chaleur entre la source chaude et le MCP encapsulé se fait principalement par conduction. Dans le cas d'une inclinaison de 0° , la température maximale n'est pas située en haut, elle est située plutôt sur la paroi symétriquement vers le grand axe tandis que les températures plus élevées se trouvent dans la partie supérieure de l'enceinte pour l'inclinaison de l'enceinte à 90° . En haut de l'enceinte, la température est de 317 K.

A l'instant 500 s, dans les deux cas, les températures de fusion sont plus élevées dans la partie supérieure de l'enceinte (Fig. 5.2.b), la température maximale calculée en haut de l'enceinte elliptique horizontale est de 321 K alors que dans l'autre cas

(tube vertical) la température maximale est nettement supérieure à celle du tube horizontal (235 K).

Dans la masse fondue du MCP, les isothermes ne sont plus concentriques, à mesure qu'on avance dans le temps, à cause notamment de la naissance de la convection naturelle dans le MCP liquide. Au fond de l'enceinte horizontale, les isothermes sont ondulées puisque des circulations sont apparues en dessous du corps solide du MCP. La convection de type Rayleigh-Bénard devient donc importante et domine de ce fait le processus de transfert de chaleur notamment dans la partie basse du tube.

La figure 5.2.c indique qu'à 750 s, les températures sont supérieures à 294 K dans toute la cavité pour les deux cas d'inclinaison. Les températures plus élevées sont toujours observées dans la partie supérieure de l'enceinte en raison de la force de flottabilité. La température la plus élevée se situe au sommet de l'enceinte avec une valeur de 325K. En fait, cette température n'est rien d'autre que celle du fluide caloporteur.

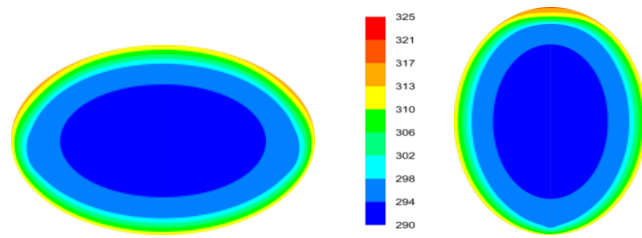
Les isothermes horizontaux quasi parallèles dans la partie supérieure des deux tubes indiquent que le transfert de chaleur est de nouveau dominé par la conduction à ce stade de fusion (750 s, Figure 5.2.c). En effet, cette stratification est également mise en évidence en chapitre 4 notamment à la fin du processus de fusion du MCP dans le cas du tube circulaire. Les plus basses températures sont d'ailleurs observées sur l'enceinte horizontale. La température maximale calculée en haut de cette enceinte est de 321 K, elle est inférieure à celle en cas du tube vertical (90°) estimée à 325,15 K.

A l'instant 1000 s (Fig. 5.2.d), on distingue clairement deux régions thermiques:

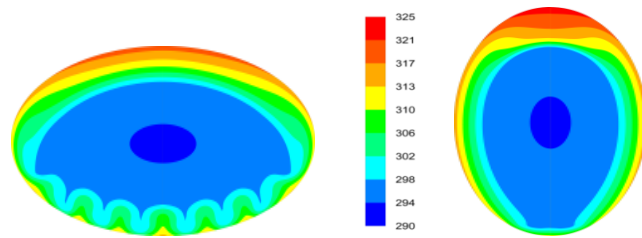
- Une partie supérieure stratifiée thermiquement du MCP liquide.

- Une partie inférieure avec des isothermes déformées. Une forte distorsion se traduit par l'apparition d'isothermes en forme de champignons au fond de l'enceinte d'inclinaison 0° qui disparaissent plus tard (1000 s). Des résultats similaires ont également été indiqués par Chunjian et al. [17] sur la fusion du chlorure de calcium hexahydraté dans un cylindre.

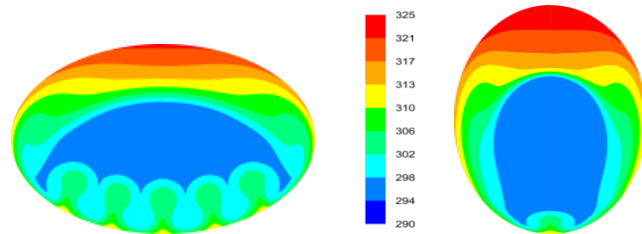
La première partie (supérieure) indique un transfert de chaleur dominé par la conduction thermique tandis que la seconde (partie inférieure) indique donc un transfert de chaleur dominé par la convection libre de type Rayleigh-Bénard dans le MCP liquide en bas de la cavité.



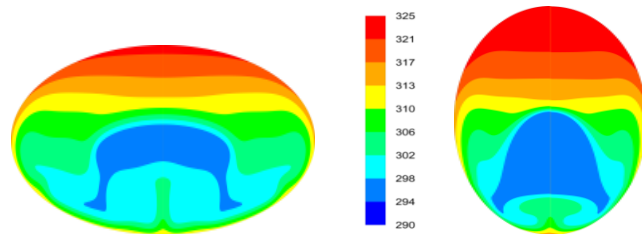
a (250 s)



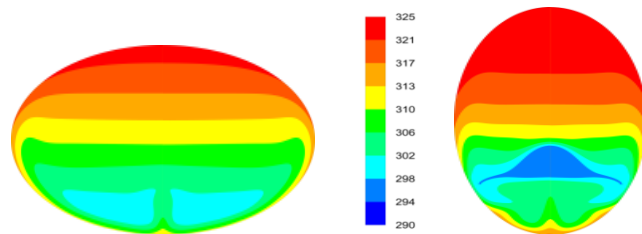
b (500 s)



c (750 s)



d (1000 s)



e (1250 s)

Figure 5.2 : Distribution de température à différents instants pour deux inclinaisons 0° et 90° du tube elliptique

3.2. Lignes de courant

Les lignes de courant sont représentées sur les figures 5.3.a-e pour les deux cas de tube examinés (0° et 90°). Les structures d'écoulement au sein du MCP liquide sont indiquées dans la moitié gauche des enceintes.

La figure 5.3 montre donc les lignes de courant à 250 s. À ce stade de la fusion du MCP, la convection libre est faible et ne peut donc pas se développer en raison des effets visqueux du MCP fondu. Par conséquent, les transferts de chaleur sont dominés par la conduction. Cette caractéristique au début du processus de fusion a été confirmée par d'autres chercheurs dans la littérature [16, 29].

Néanmoins, la convection thermique peut être faible pour les couches fondues minces, mais aussi pour les taux de chauffe inférieurs, même dans de plus grandes couches de fusion. Ces situations sont caractérisées dans la littérature par de faibles nombres de Rayleigh. Par conséquent, plusieurs chercheurs [16, 23, 48] ont indiqué que la convection naturelle n'est significative que pour $Ra > 10^4$ notamment pour la fusion du MCP dans des cylindres à section circulaire.

La figure 5.3.b montre les lignes de courant dans les deux tubes examinés (0° et 90°). A l'instant 500 s. Les structures des courants convectifs sont totalement différentes dans les deux cas. A ce stade de la fusion du MCP, deux circulations de fluide (MCP fondu), symétriques et opposées, dominent les courants convectifs dans toute l'enceinte verticale. Ainsi, la masse du MCP fondu monte le long de la paroi de la cavité chaude et descend donc le long du front de fusion (relativement plus froid). Mais, la cavité allongée horizontalement (0°) a montré en fait un écoulement convectif assez différent. La partie supérieure de la masse fondue présente d'ailleurs un écoulement symétrique bicellulaire (contrarotatif) par rapport à l'axe vertical de

l'enceinte elliptique, alors qu'en bas à ce moment-là (500 s), un flux multicellulaire est observé avec de faibles circulations.

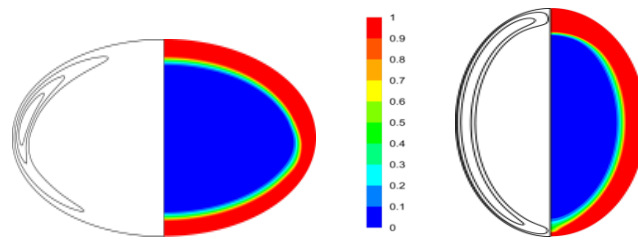
Or, le nombre de ces circulations ainsi que leurs tailles sont à priori définis par l'espace offert pour le MCP fondu, entre le front de fusion inférieur et la paroi inférieure de l'enceinte. Ces vortex sont appelés convection de Rayleigh-Bénard caractérisant ainsi une instabilité thermique. L'apparition de ce type de convection est due au fait que le MCP liquide est confiné entre une paroi plus chaude de l'enceinte et le front de fusion plus froid, ce qui peut être assimilé à deux plaques parallèles horizontales de températures différentielles dont la froide occupe évidemment le haut.

Ce type de tourbillons a également été rapporté dans la littérature. En effet, Chung et al. [16] ont indiqué ce type de rouleaux dans leur travail sur la fusion dans des cylindres circulaires. Il convient de mentionner que la présente étude ainsi que celle de Chung et al. [16] ont utilisé la même approche numérique (méthode d'enthalpie-porosité). Ces rouleaux capturés par les simulations numériques sont en outre cohérents avec d'autres travaux dans la littérature sur la convection thermique dans un anneau circulaire concentrique [24]. Les circulations de la convection de Rayleigh-Bénard contribuent de manière significative à améliorer à la fois le transfert de chaleur et le taux de fusion du MCP. Ainsi, le rôle de ces cellules convectives est important pour diminuer la durée de fusion complète.

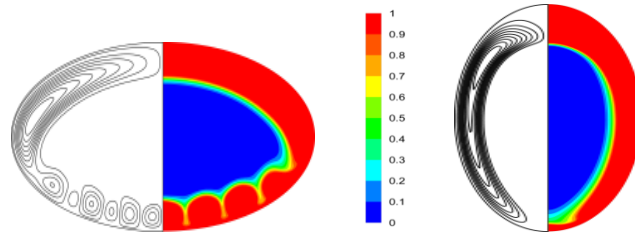
À mesure que le temps avance (750 s), les vortex deviennent alors plus prononcés (Fig. 5.3.c) tandis que dans la deuxième enceinte (c'est-à-dire une enceinte inclinée à 90°), deux cellules supplémentaires apparaissent au fond de l'enceinte. Cette transition d'écoulement est cohérente avec les résultats obtenus dans des cylindres circulaires comme indiqué dans d'autres investigations [25, 26].

Plus tard (1000 s), les cellules multiples au fond de l'enceinte (incliné à 0°) fusionnent et se retrouvent enfin sous forme de structure d'écoulement bicellulaire (Fig. 5.3.d). Les circulations sont alors plus lentes. Par conséquent, la fusion est plus faible que dans l'étape précédente de fusion. Le flux secondaire dans l'enceinte inclinée à 90° se développe en un écoulement à 4 cellules (Fig. 5.3.d) puis en une structure multicellulaire à un stade avancé du processus de la fusion du MCP, à 1250 s (Fig. 5.3.e). Ainsi, la convection thermique dans le fond de l'enceinte devient de plus en plus efficace. La progression de la fusion est alors plus rapide par rapport à celle de la zone supérieure de l'enceinte.

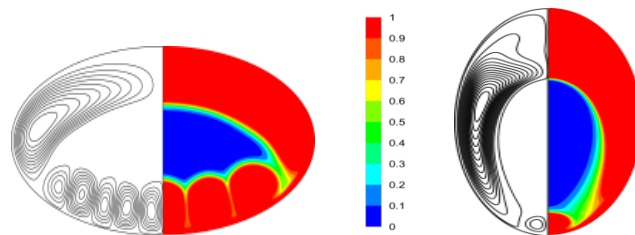
Afin de montrer l'effet d'un faible taux de chauffe sur les rouleaux de Rayleigh-Bénard, une simulation est réalisée avec un coefficient de transfert de chaleur plus faible ($h = 25 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) à la surface externe de l'enceinte. La figure 5.4 montre en effet les lignes de courant ainsi que la variation des fractions de fusion à différents instants pendant le processus de fusion du MCP. Ces circulations du fluide sont affectées par le taux de chauffe. Ainsi, des rouleaux plus faibles sont obtenus avec un taux de chauffe faible, le nombre de rouleaux diminue d'ailleurs avec le temps.



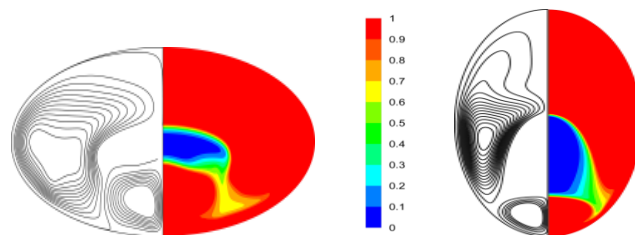
a (250 s)



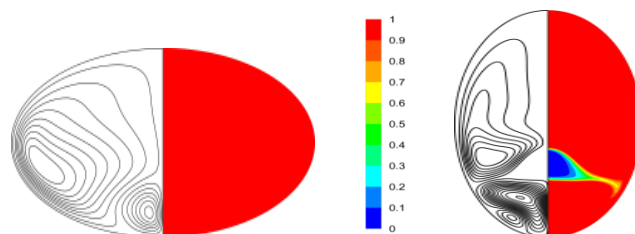
b (500 s)



c (750 s)

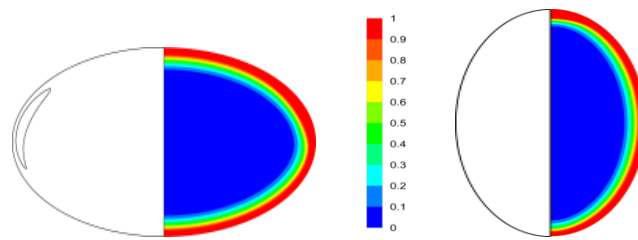


d (1000 s)

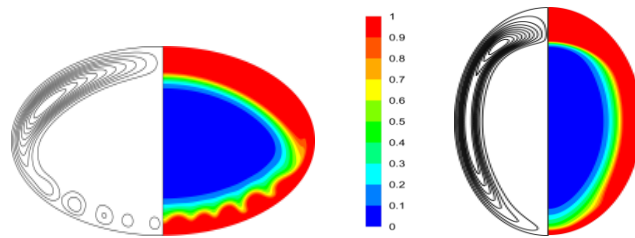


e (1250 s)

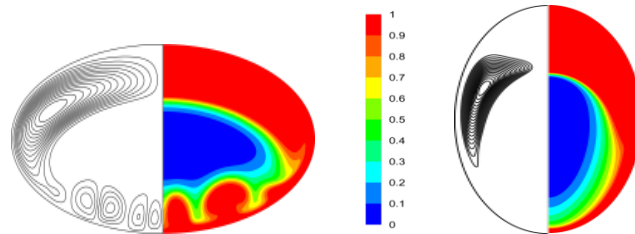
Figure 5.3: Lignes de courant et fractions liquides pour les inclinaisons de 0° et 90°



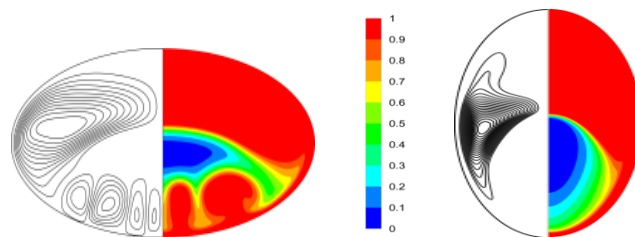
a (500 s)



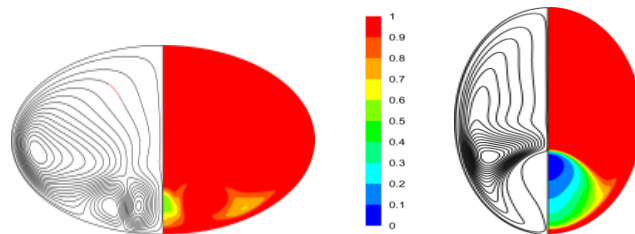
b (1000 s)



c (1500 s)



d (2000 s)



e (2500 s)

Figure 5.4 : Lignes de courant et fractions liquide à faible taux de chauffe ($h = 25 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) pour les inclinaisons de 0° et 90°

3.3. Fractions liquides

Les fractions liquides sont représentées sur le côté droit des enceintes (Fig. 5.3.a-e). La masse fondue est illustrée par la couleur rouge tandis que le MCP solide est de couleur bleue, les autres couleurs montrent la zone pâteuse (c'est-à-dire entre le rouge et le bleu).

A l'instant 250 s (Fig. 5.3.a), la couche liquide symétrique est confinée entre les limites concentriques parallèles constituées de la paroi de la cavité rigide et du front de fusion solide. Par conséquent, le front de fusion progresse uniformément. Cela signifie que la convection naturelle n'est pas encore significative. La taille de la masse fondue est approximativement la même dans les deux tubes.

Au fur et à mesure (500 s), la partie occupée par le MCP liquide devient de plus en plus grande pour les deux cas d'inclinaison (Fig. 5.3.b). Le front de fusion a alors une forme ondulée dans le fond de l'enceinte d'inclinaison 0° et ce à cause des rouleaux de convection de Rayleigh-Bénard. Cette forme ondulée du front de fusion est également rapportée par Chung et al. [16] où plusieurs cellules ont été capturées pour le problème de fusion dans un tube circulaire. Plus tard (1000 s), la forme ondulée disparaît comme le montre la figure 5.3.d. A ce moment, le MCP solide dans le tube horizontal est toujours important et occupe donc la partie inférieure de l'enceinte. La progression du front de fusion est plus rapide dans la région supérieure de l'enceinte elliptique verticale.

3.4. Durée de fusion complète

La figure 5.5 montre la durée de fusion complète en fonction du coefficient de convection thermique entre le fluide caloporteur et la paroi de l'enceinte pour donc trois cas. Le tube elliptique horizontale (cas 1), le cas de référence i.e. le tube circulaire (4 cm Ø) considéré dans le chapitre 4 (cas 2) et enfin le tube elliptique vertical(cas 3). On peut alors observer que l'augmentation de la vitesse de chauffe réduit la durée de changement de phase dans les trois cas étudiés. Pour $h = 100 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, les durées de la fusion complète du n-eicosane dans l'enceinte elliptique sont estimées à 1257s et 1425s pour les inclinaisons de 0et 90° respectivement tandis que le cas de référence(i.e. cylindre circulaire) observe une durée de fusion complète estimée à 1410 s. Le taux de fusion s'avère donc plus élevée dans le premier cas, c'est-à-dire l'enceinte horizontale. La différence relative est estimée à 10.85% entre les durées de fusion complète. Cette différence est principalement due à l'effet de la convection de Rayleigh-Bénard qui joue donc un rôle important dans la partie inférieure de l'enceinte elliptique horizontale, comme le montre donc la figure 5.5.

Pour différents taux de charge simulés en variant le coefficient d'échange thermique convectif h , les durées de fusion complète sont calculées et présentées dans la figure 5.6. Donc, pour toute la gamme de h , il est évident que le tube elliptique horizontal observe les meilleures performances en terme de durée de fusion.

En revanche, Jourabian et al. [27]ont indiqué qu'il n'y a pas de différence significative entre les temps de la fusion totale à l'intérieur des enceintes allongées horizontalement et verticalement. En fait, dans leur travail, la convection de Rayleigh-Bénard n'a pas été capturée numériquement dans le fond de l'enceinte.

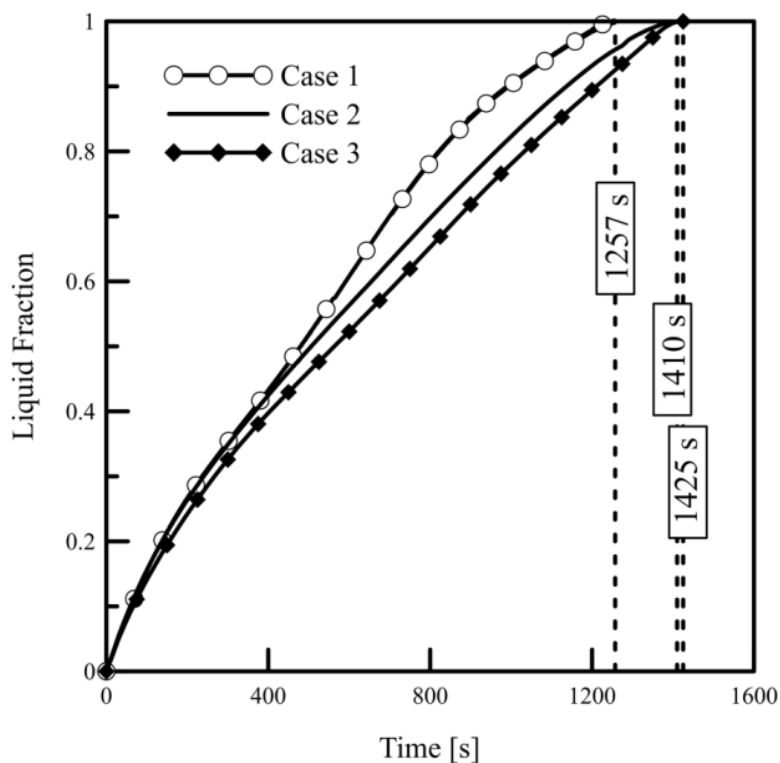


Figure 5.5 : Evolution de la fraction liquide moyenne pour $h = 100 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

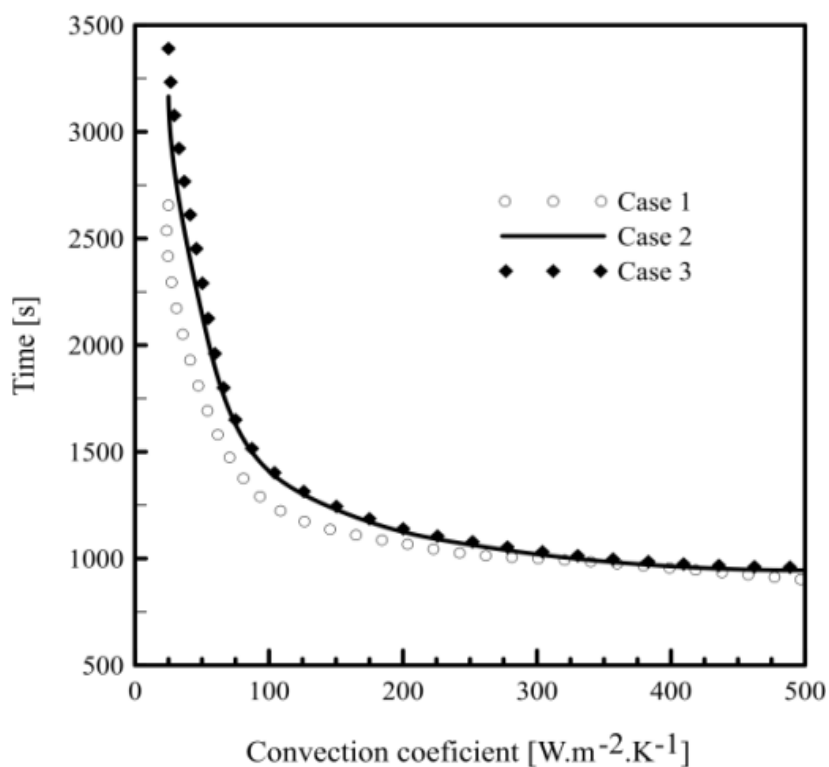


Figure 5.6 : Variation de la durée de solidification avec le coefficient d'échange thermique convectif entre le tube et le fluide caloporteur

4. Conclusion

Dans ce chapitre on a donc étudié la fusion d'un MCP (n-eicosane) dans un tube à section elliptique d'un échangeur de chaleur. L'effet de l'orientation du tube elliptique par rapport à l'horizontal est examiné par comparaison de deux orientations (horizontale et verticale). Les caractéristiques thermiques et dynamiques de la fusion du n-eicosane ont été examinées à travers la distribution des températures pendant l'évolution du processus de la fusion du MCP, l'évolution avec le temps de la fraction liquide, les lignes de courants et la durée de fusion complète.

Au terme de cette étude, les conclusions suivantes sont tirées:

- 1) les simulations numériques ont montré l'effet important de la structure des courants convectifs sur le processus de la fusion du n-eicosane.
- 2) Dans le tube horizontal, des tourbillons de types Raleigh-Bénard sont apparues.
- 3) Ces tourbillons ont accéléré le processus de fusion et de ce fait la durée de fusion complète se voit diminuée.
- 4) La durée de fusion devient moins sensible à l'orientation du tube pour des taux de charge thermique élevés.
- 5) La différence relative entre les durées de fusion des deux tubes elliptiques (0° et 90°) sont estimées par 10.85% et 27.68 % pour respectivement un taux de charge élevé ($h=100 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) et un taux bas ($h=25 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$).
- 6) Donc, le tube elliptique horizontal (0°) est recommandé pour un échangeur tubulaire elliptique à chaleur latente.

Comme perspectives donc de cette étude, on peut étudier l'effet des dimensions du tube sur les performances thermiques car la convection naturelle dépend également de la dimension de l'enceinte.

Chapitre 6

Nano-amélioration d'un échangeur tubulaire à chaleur latente

1. Introduction

Ce dernier chapitre de la thèse consiste à mettre en évidence l'effet des nanoparticules dispersées dans un MCP remplissant un tube d'échangeur de chaleur. Une étude donc est réalisée sur de la fusion aussi bien que la solidification d'un nano-MCP: NPGs- $C_{14}H_{30}O$ (nanoplaquettes de graphène/1-tetradecanol) dans un tube à section circulaire d'un échangeur de chaleur. La fusion et la solidification du nano-MCP correspondent respectivement à la charge et la décharge thermique de l'échangeur. La charge est assurée par un fluide caloporteur en communication avec un capteur solaire thermique tandis que le fluide caloporteur assurant la décharge thermique communique avec une application domestique qui peut au besoin récupérer la chaleur emmagasinée dans cet échangeur.

Donc, des simulations numériques sont menées pour étudier les comportements aussi bien thermique que dynamique du nano-MCP durant les phases de stockage et déstockage thermique dans l'échangeur tubulaire. L'étude est réalisée pour différentes concentrations de nanoparticules afin d'examiner leurs effets sur le processus de charge et de décharge thermique. Les caractéristiques de la charge/décharge thermique du nano-MCP sont examinées à travers la distribution des températures, l'évolution des fractions liquides, la durée de fusion/solidification, l'énergie stockée/libérée pour les deux modes de fonctionnement de l'échangeur (charge et décharge).

Les résultats de ce chapitre ont fait en outre l'objet d'une publication internationale [56].

2. Modèle physique

Le problème 2D du transfert de chaleur associé au changement de phase du nano-MCP confiné dans un tube à section circulaire de diamètre D est considéré dans la présente étude. La représentation de ce problème est illustrée dans la figure 6.1. Sur la paroi du tube, un fluide caloporteur circule pour transporter de la chaleur où le coefficient de transfert thermique par convection entre le fluide caloporteur et la paroi du tube h est maintenu constant. Le nano-MCP est initialement à une température constante T_i .

Le nano-MCP est supposé un matériau mono-composant et homogène dont les propriétés thermophysiques sont constantes à l'exception de la masse volumique.

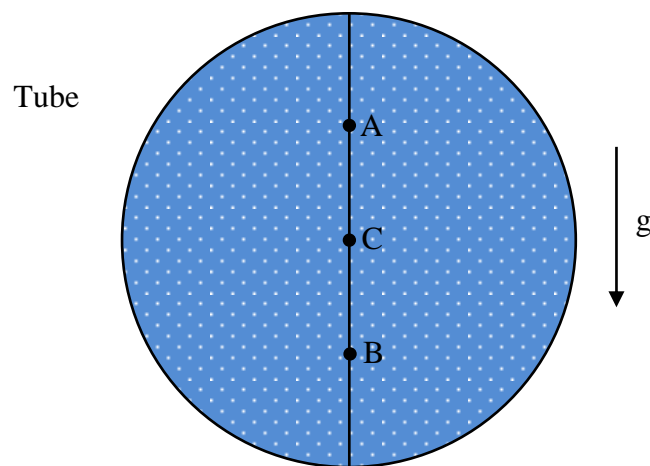


Figure 6.1: Représentation du nano-MCP encapsulé

3. Résultats et discussions

Donc, cette étude est menée sur le NPGs- C₁₄H₃₀O comme nano-MCP dont les propriétés thermophysiques sont montrées dans le tableau 6.1. Ce nanocomposite est confiné dans un tube de diamètre D= 40mm. Les processus de charge et de décharge sont simulés sur le nanocomposite de différentes concentrations en nanoparticules ($\phi = 0, 0.5, 1$ et 3 wt%). Pour le processus de charge, la température initiale des échantillons est fixée à $T_i=290$ K tandis que pour le processus de décharge, la température initiale est maintenue à $T_i= 350$ K. Le fluide caloporteur est à $T_{HTF}=350$ K et $T_{HTF}=290$ K pour respectivement la charge et la décharge. Enfin, le coefficient de transfert de chaleur par convection sur la surface externe de la sphère est fixé $h=100$ W.m⁻².K⁻¹.

Tab. 6.1: Propriétés thermophysiques du nano-MCP (NPGs- C₁₄H₃₀O) [57]

Propriété (unité)		T(°C)	0 wt%	0.5 wt%	1 wt%	3 wt%
Densité	ρ_s (kg.m ⁻³)	22.5	891.4	894.1	896.9	907.9
		27.5	887.4	890.2	892.9	903.9
	ρ_l (kg.m ⁻³)	32.5	873.4	876.1	878.9	890.1
		38.0	821.6	824.3	826.9	837.6
Conductivité thermique	K_s (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	20	0.252	0.350	0.451	0.540
	K_l (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	38	0.159	0.180	0.260	0.320
Chaleur spécifique	$C_{p,s}$ (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	20	2040	2020	1990	1910
	$C_{p,l}$ (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	38	2360	2330	2300	2190
Température de fusion	T_m (°C)		37	37	37	37
Chaleur latente de fusion	L (kJ.kg ⁻¹)		227.8	219.5	212.2	183.5
Viscosité dynamique	μ (mPa.s)	38	13.23	23.45	59.50	194.01

3.1. Mode de décharge

a. Evolution des températures

Les variations des températures en trois points différents A,B et C (Fig. 6.1) dans la cavité sont tracées sur la figure 6.2 et ce pour différents échantillons de nano-MCP de différentes concentrations massiques de nanoparticules (0, 0.5, 1 et 3 wt%). La température diminue fortement de 350K à la température de fusion (310K), puis elle se stabilise à 310K durant le processus de changement de phase pour un certain temps en fonction de l'emplacement et de la concentration des nanoparticules. Ensuite, la température commence à diminuer de nouveau.

Le taux de diminution initial de la température dépend de l'emplacement mais il est presque le même quelle que soit la concentration de nanoparticules. Or, au centre du tube, le temps écoulé pour atteindre la température de fusion est environ 800 s pour tous les cas considérés. L'effet de la fraction massique des nanoparticules devient évident pendant le processus de changement de phase (solidification). Une amélioration progressive est observée dans le taux de solidification avec l'augmentation de la concentration de nanoparticules. Par exemple, compte tenu du centre du tube, le moment où la transition de phase est terminée, c'est-à-dire que la température du MCP tombe en dessous de la température de fusion est de 3800 s, 3275 s, 2825 s et 2400 s pour les fractions massiques $\phi=0$, 0.5, 1 et 3wt%, respectivement. Cette diminution de la durée de solidification est expliquée par d'une part de la réduction de la chaleur latente de fusion et de l'amélioration du transfert de chaleur d'autre part à cause de l'augmentation de la concentration de nanoparticules. Cependant, il est évident que le temps requis pour achever le processus de changement de phase varie considérablement en fonction de l'emplacement, ce qui

implique donc que la solidification ne soit pas uniforme en raison du rôle significatif de la convection naturelle dans le MCP liquide pendant cette période. La durée de la solidification complète est beaucoup plus courte pour le point C par rapport aux points A et B, en raison en effet de l'influence de la convection libre plus significative alors dans cette région. Un examen rapide de l'évolution des courbes de températures en dessous de la température de fusion montre que l'influence des nanoparticules est plus prononcée dans le MCP solide. A titre d'exemple, au centre du tube, le MCP pur ($\phi = 0$ wt%) a besoin d'environ 7500 s pour atteindre la température ambiante (290 K) alors que ce temps est réduit à 6000, 5500 et 4500 s pour $\phi = 0.5$, 1 et 3wt%, respectivement, en raison donc de l'amélioration de la conductivité thermique du MCP par addition de nanoparticules.

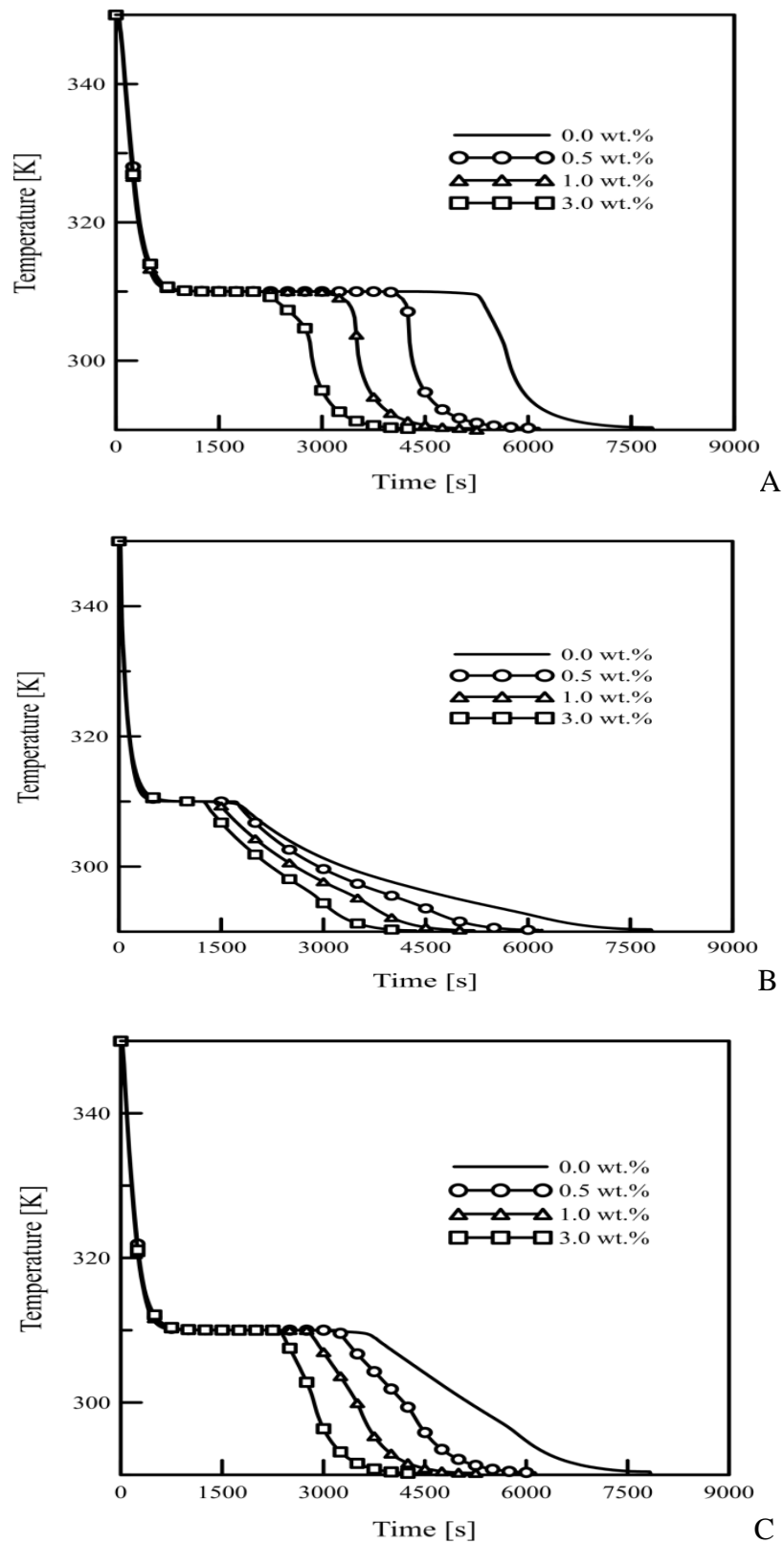


Figure 6.2 : Evolution des températures sur les points A, B et C

b. Evolutions des fractions liquides

La variation instantanée des fractions liquides durant la solidification du nano-MCP dans toute l'enceinte est illustrée dans la figure 6.3. Evidemment, la dispersion des nanoparticules dans le MCP accélère considérablement le processus de décharge thermique. Cependant, la différence entre les courbes des taux de solidification n'est guère remarquable. Au fur et à mesure, l'effet des nanoparticules devient de plus en plus prononcé. Le facteur principal d'amélioration du processus de décharge thermique est l'amélioration de la conductivité thermique. Par ailleurs, il convient de noter que la chaleur latente de fusion diminue avec l'addition des nanoparticules, ce qui favorise également le taux de solidification. La durée de solidification est de 5650 s pour le MCP pur alors que pour les autres échantillons la durée de solidification est évaluée à 4250, 3475 et 2800 s pour $\phi=0.5, 1$ et 3 wt%, respectivement.

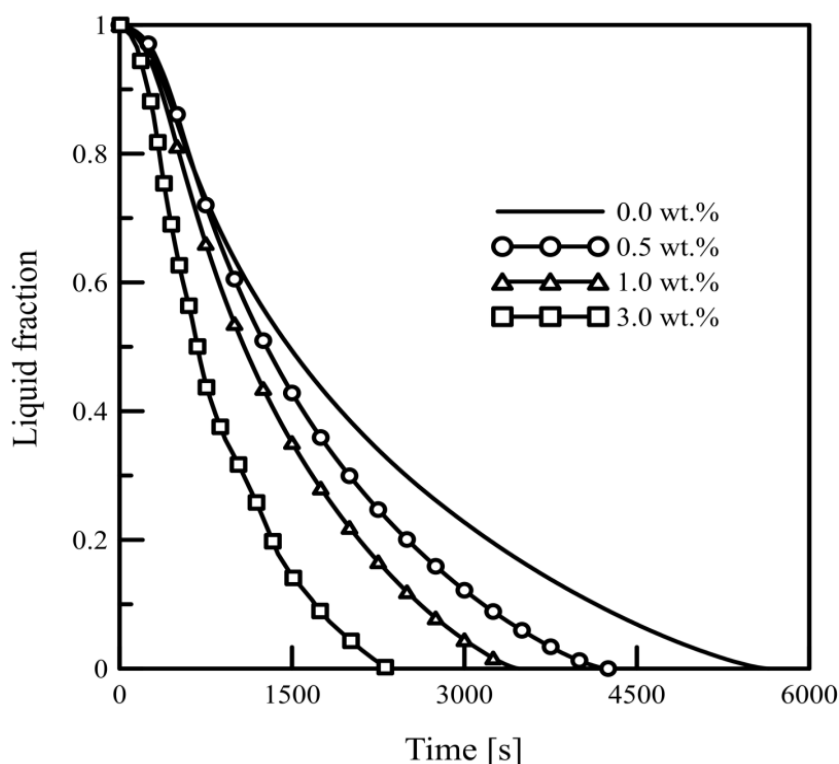


Figure 6.3 : Evolution de la fraction liquide pendant le temps de décharge

c. Durée de solidification complète

La solidification totale du nano-MCP durant le processus de décharge diminue avec l'augmentation de la concentration en nanoparticules. Ces résultats sont en bon accord avec les résultats rapportés dans la littérature [58-61]. La solidification complète du MCP de base est de 5650 s tandis que cette durée diminue à 4250, 3475 et 2800 s pour des concentrations massique de $\phi=0.5, 1$ et 3 wt%, respectivement. Ainsi, cette relation proportionnelle est attribuée à une conductivité thermique améliorée, un paramètre clé pendant le processus de décharge thermique.

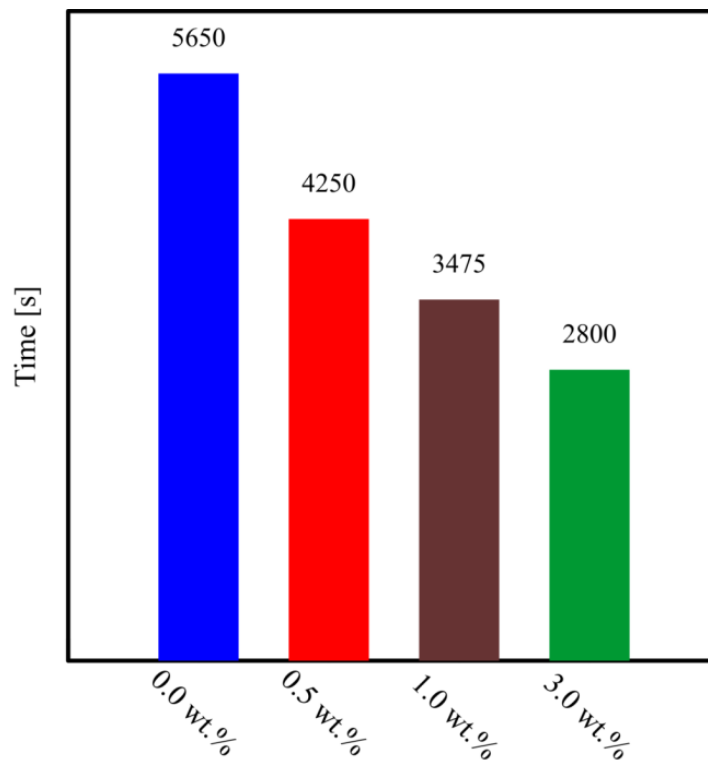


Figure 6.4 : Durée de solidification en fonction des concentrations massique des NPGs

d. Énergie libérée

La variation de l'énergie libérée durant le processus de solidification est présentée dans la figure 6.5. Comme l'ajout de nanoparticules accélère le taux de solidification, une plus grande quantité d'énergie peut être libérée pendant un temps donné avec l'augmentation de la fraction massique de nanoparticules.

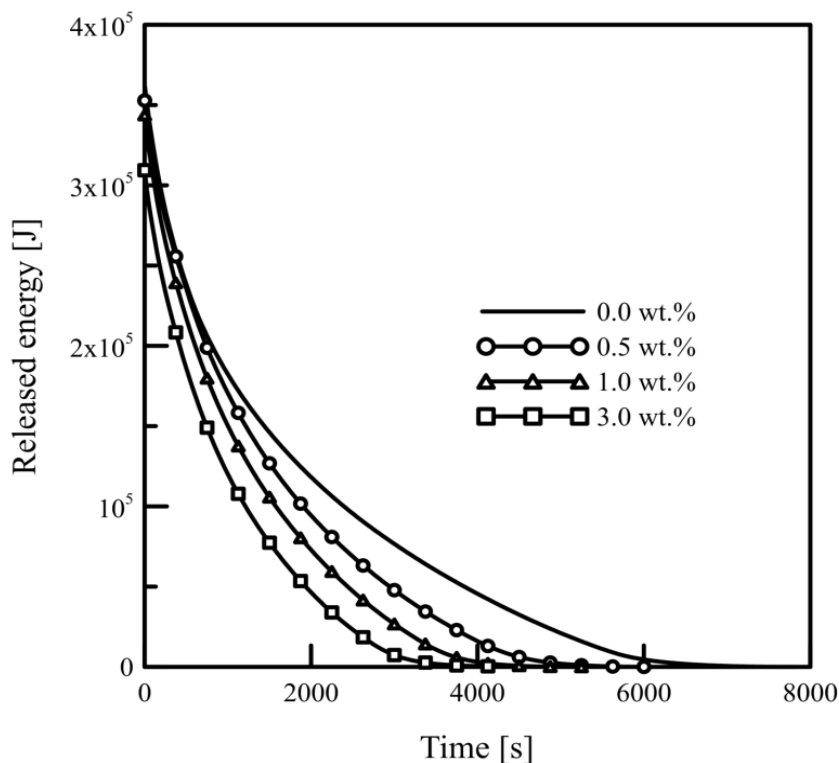


Figure 6.5 : Variation de l'énergie libérée lors de la décharge

3.2. Mode de charge

a. Evolution des températures

La figure 6.6 montre la variation des températures en fonction du temps pour trois points dans le tube A, B et C (Fig. 6.1) pour les concentrations massiques étudiées ($\phi = 0, 0.5, 1$ et 3 wt%). Comme on peut le voir sur cette figure (6.6), les températures augmentent d'abord avec le temps à mesure que la chaleur sensible est échangée entre la source chaude à la frontière de l'enceinte et le nanocomposite enfermé dans la

cavité. Plus tard, pendant le changement de phase à $T=310$ K, les températures restent constantes jusqu'au changement de phase total (fusion complète). Lorsque la fusion est terminée, les températures augmentent de nouveau jusqu'à ce que l'équilibre thermique soit établi avec la source chaude ($T = 350$ K).

On peut donc en soulever trois observations principales:

- 1) Avant changement de phase, les températures sont d'autant plus élevées que les concentrations sont élevées.
- 2) Après le changement de phase, le MCP pur observe des températures temporairement plus élevées par rapport aux échantillons nanocomposites, alors nous ne pouvons pas distinguer les profils de température des échantillons à la fin du processus de fusion. Cependant, à un autre point dans l'enceinte (A), le MCP pur fondu observe donc un niveau de température plus élevé que l'échantillon de $\phi=0.5$ wt% et nettement inférieur à ceux de $\phi=1$ wt% et $\phi=3$ wt% respectivement.
- 3) Il est à noter d'ailleurs que l'échantillon avec la concentration la plus faible (c'est-à-dire $\phi=0.5$ wt%) ainsi que le MCP pur ont montré des perturbations dans le profil de température au point B (Fig. 6.6.B). Ce comportement particulier nous a mené à observer de près les courbes de températures durant ces perturbations (Figs. 6.7 et 6.8).

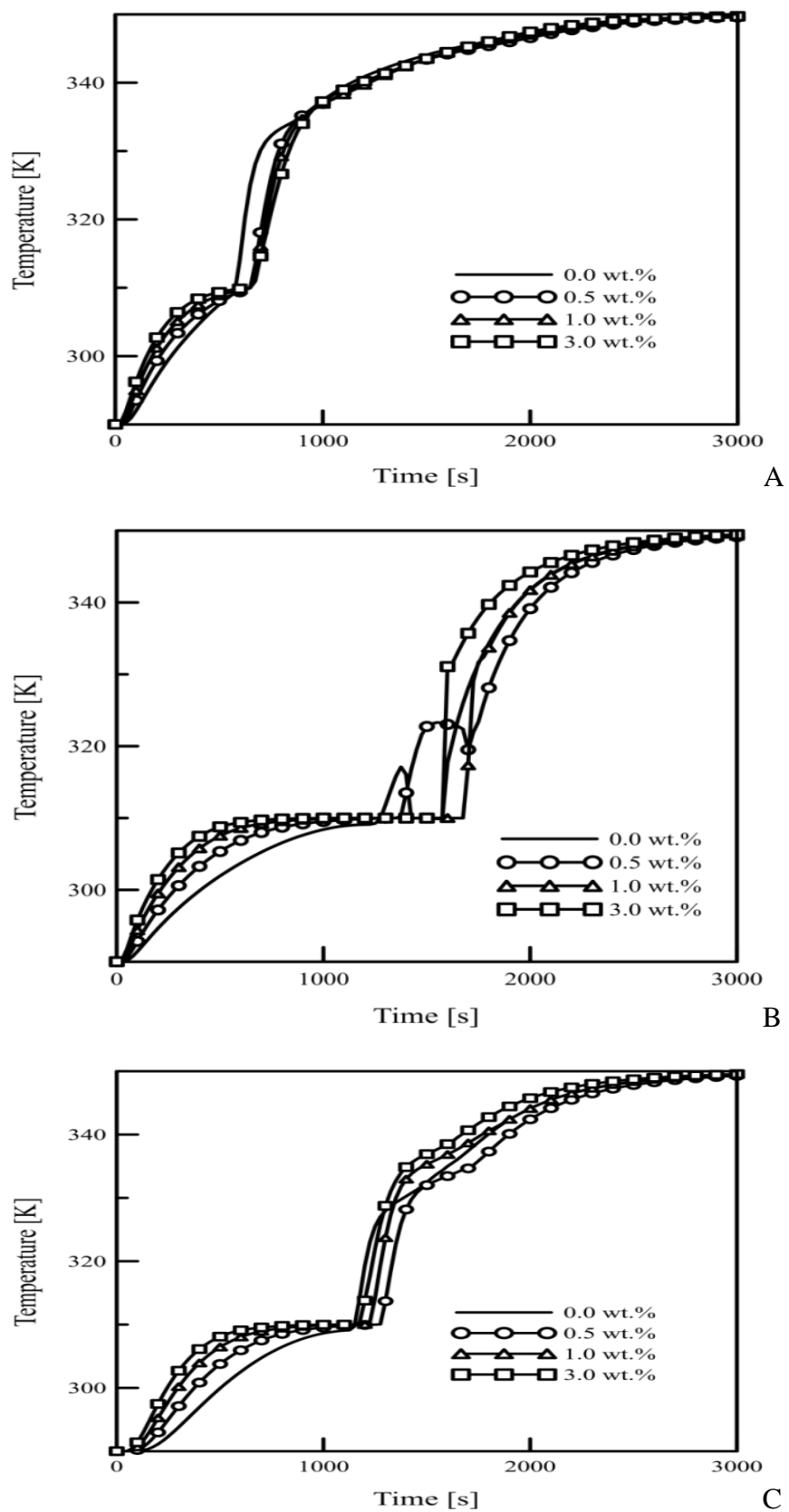


Figure 6.6 : Variations des températures sur les points sélectionnés A, B et C

– Contours de températures pour $\phi=0\text{wt}\%$

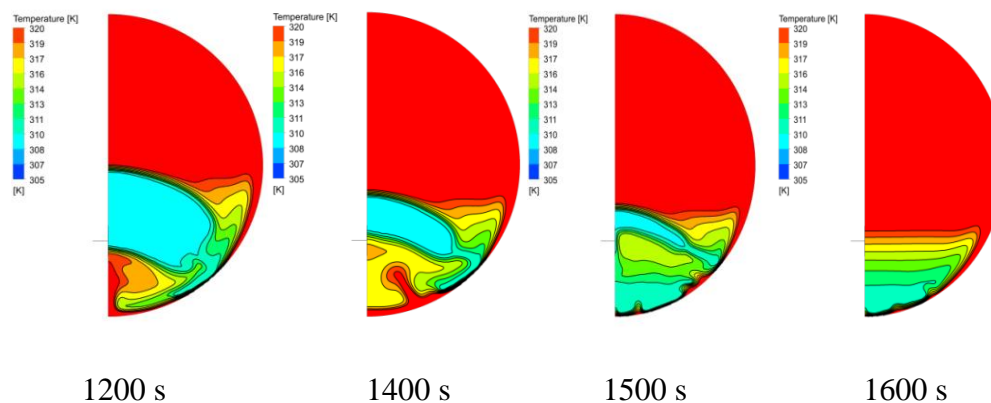


Figure 6.7 : Contours de températures pendant le processus de charge pour la concentration NPGs $\phi=0\%$

– Contours de températures $\phi=0.5\text{ wt}\%$

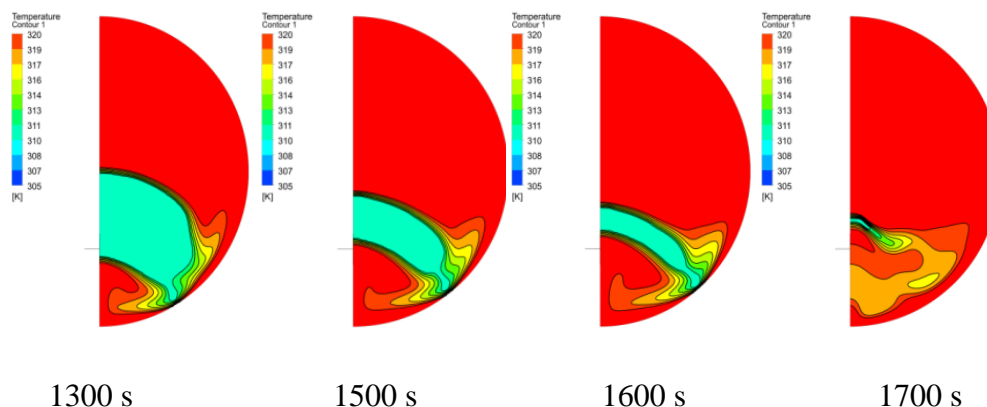


Figure 6.8 : Contours de température pendant le processus de charge pour la concentration NPGs $\phi=0.5\%$

Les contours de températures dans le nano-MCP sont montrés à différents instants (1200 s-1700 s) sur la figure 6.7 et la figure 6.8 pour les deux concentrations $\phi=0$ et $0.5\text{wt}\%$ respectives. En raison de la symétrie autour de la ligne médiane verticale, seule la moitié de l'enceinte est représentée. Comme on peut le voir sur la figure 6.7 (1200 s), le point B indiqué par un trait d'union sous le centre est occupé par un noyau MCP pur solide. Ce point est plus tard (1400 s) occupé par le MCP liquide chaud et

puis de nouveau par le noyau solide (1500 s). Ce comportement dynamique du noyau solide en raison de la convection naturelle explique ces perturbations observées dans la figure 6.6.B à cet emplacement fixe dans l'enceinte (B). Ensuite, après l'instant 1500s, le comportement typique de fusion reprend donc normalement.

Dans le cas d'une concentration de 0.5 wt%, le même comportement est observé à la différence que cette augmentation soudaine de la température au point B est tardive à un point où la masse fondue est plus chaude et plus grande. Ainsi, le noyau nano-MCP solide n'a pas la possibilité de descendre jusqu'au point B comme le cas de l'échantillon du MCP pur (0wt%).

b. Evolutions des fractions liquides

L'évolution de la fraction liquide des nanocomposite est tracée sur la figure 6.9 pour différentes concentrations de NPGs ($\phi=0, 0.5, 1$ et 3wt%). Durant les 650 premières secondes du processus de fusion, le nano-MCP de $\phi=0.5\text{wt}\%$ n'affecte pas du tout le taux de fusion. Pour les deux autres concentrations, à savoir $\phi=1$ et 3wt%, elles ont un effet croissant sur le taux de fusion. Ainsi, un gain de performance thermique évident est obtenu sur la charge thermique. Cela peut s'expliquer par l'amélioration de la conductivité thermique. En fait, aux premiers stades du processus de la fusion du nano-MCP, le transfert de chaleur se fait principalement par conduction. Ainsi, la conductivité thermique est un paramètre déterminant pour le début du processus de charge. Ensuite, pour $t > 650$ s, lorsque la convection entraînée par la force de la flottabilité devient plus forte, un taux de fusion plus élevé est observé pour le MCP pur tandis que les échantillons de nanocomposites principalement ceux de $\phi=1$ et 3 wt% montrent un taux de fusion plus faible. Cette décélération du processus de la fusion peut être attribuée à l'effet de la viscosité plus élevée causée par des concentrations de nanoparticules plus élevées. Par conséquent,

une viscosité plus élevée a tendance à ralentir le mouvement convectif du nanocomposite, c'est-à-dire une convection entraînée par une faible flottabilité. En conséquence, un transfert de chaleur plus faible est obtenu. En outre, un phénomène d'inversion est observé à $t=1250$ s où la fraction liquide du MCP pur commence à être supérieure à celle du nanocomposite de $\phi=1$ wt%. À la fin du processus de fusion, le MCP pur et le nanocomposite de $\phi=3$ wt% présentent une légère différence de la durée de fusion de seulement 25s.

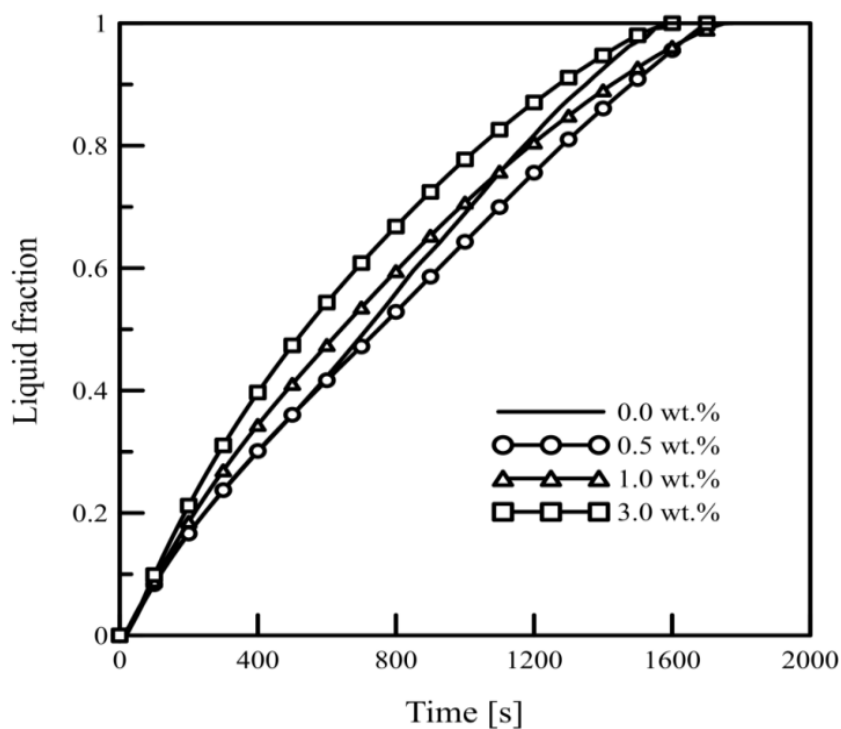


Figure 6.9 : Fraction liquide en fonction du temps pour les différentes concentrations

c. Durée de charge

Le temps requis pour la fusion complète des nanocomposites de différentes concentrations de nanoparticules ($\phi=0, 0.5, 1$ et $3\text{wt}\%$) est représenté en histogramme sur la figure 6.10. La dispersion d'une petite quantité de nanoparticules $\phi=0.5\text{wt}\%$ augmente en fait la durée de fusion de 1625s à 1725s soit par 6.15% . Pour $\phi=0.1\text{wt}\%$ la durée de fusion augmente davantage de 1725s à 1775s soit de 10.94% . Mais, pour $\phi=3\text{wt}\%$ de nanoparticules, la durée de fusion diminue à 1600s , c'est-à-dire de 4.69 par rapport au MCP pur. La durée donc de fusion augmente avec l'insertion de la charge en NPGs à l'exception de l'échantillon de $\phi=3\text{wt}\%$. En fait, cette tendance indésirable, c'est-à-dire l'augmentation de la durée de fusion complète révélée par la présente étude, a également été signalée dans des études antérieures [43, 46, 47]. Donc, le processus de fusion à l'intérieur d'une enceinte à section circulaire est beaucoup plus compliqué. Parmi les phénomènes d'influence, il y a la convection entraînée par la flottabilité, la différence entre les densités liquide et solide ainsi que la géométrie de l'enceinte et bien entendu l'emplacement de la source de chaleur. Par ailleurs, les propriétés thermophysiques varient de différentes manières en raison de l'insertion de nanoparticules. Cependant, la dispersion de NPGs conduit généralement à l'augmentation de la conductivité thermique effective du nanocomposite, ce qui entraîne donc une amélioration du transfert de chaleur par conduction, ce mode de transfert domine le premier stade du processus de fusion. D'autre part, l'augmentation de la teneur en NPGs contribue à augmenter la viscosité du nanocomposite qui à son tour conduit à affaiblir en fait la convection naturelle dans le nanocomposite liquide, le mode de transfert de chaleur principal qui est censé d'améliorer à la fois le transfert de chaleur et le taux de fusion. Par conséquent, la concentration de NPGs doit être

choisie judicieusement pour donc espérer l'amélioration attendue des performances thermiques du nanocomposite.

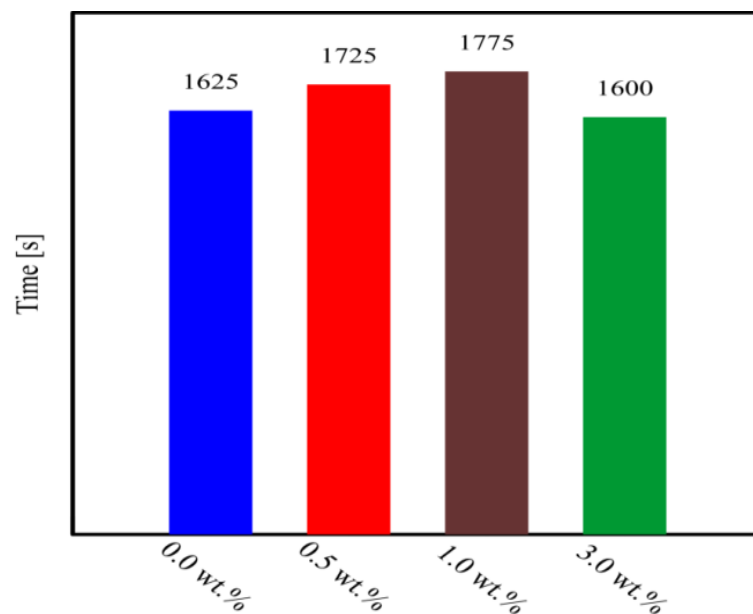


Figure 6.10 : Durée de charge pour les différentes concentrations

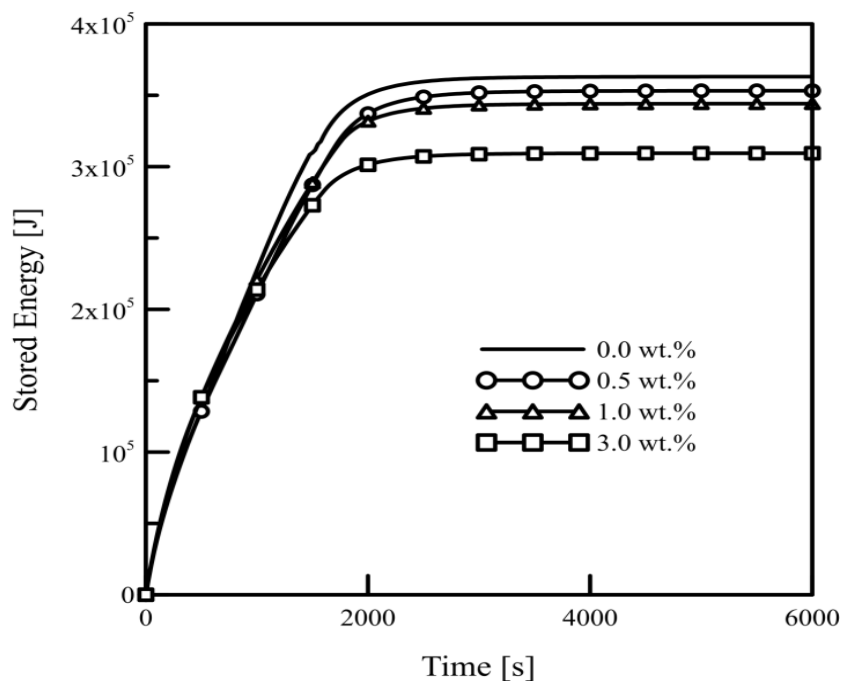


Figure 6.11 : Evolution de l'énergie stockée en fonction du temps pour les échantillons nano-MCP pendant le processus de charge

d. Energie stockée

La figure 6.11 montre l'évolution de l'énergie stockée avec le temps pour les échantillons du nano-MCP étudié durant le processus de charge. Comme on peut le voir sur cette figure, une charge thermique rapide est obtenue pour tous les échantillons. Ensuite, l'énergie stockée se stabilise au même moment pour tous les nanocomposites. De toute évidence, l'influence des nanoparticules est moins efficace pendant les premiers stades de la charge.

L'analyse de cette figure montre en outre qu'une concentration plus élevée de nanoparticules entraîne une baisse de l'énergie stockée. L'énergie stockée est alors inversement proportionnelle au contenu en NPGs. L'explication derrière cette diminution de l'énergie stockée est que les nanoparticules de capacité thermique limitée remplacent une quantité du MCP, connue pour sa capacité de stockage thermique plus élevée lors du changement de phase (chaleur latente). Il s'agit alors d'un petit sacrifice contre l'amélioration globale attendue des caractéristiques thermiques du nanocomposite. Cette tendance est également rapportée dans la littérature [44, 45].

4. Conclusion

L'amélioration des performances thermiques d'un tube d'échangeur à chaleur latente est examinée numériquement via l'insertion de nanoparticules (nanoplaquettes de graphène) dans une paraffine (1-tétradécanol). L'effet de la concentration massique des nanoparticules (0, 0.5, 1 et 3 wt%) sur les caractéristiques de charge et décharge thermiques ont été examinés. Les conclusions de cette étude sont résumées :

- 1) L'addition de nanoparticules à la paraffine contribue à la diminution de l'énergie stockée/libérée.
- 2) Un gain de performance thermique est obtenu durant la décharge thermique.
- 3) La durée de décharge est diminuée jusqu'à 50%.
- 4) Cependant, la charge thermique est améliorée seulement durant la dominance de la conduction thermique autrement dit au premier stade de la fusion du nano-MCP.
- 5) A l'exception de la concentration de 3 wt% qui a donné une légère diminution de la durée de fusion du nano-MCP, les autres concentrations examinées (0.5 et 1 wt%) ont montré une augmentation de la durée de fusion du nano-MCP.
- 6) Le choix donc de la concentration des nanoparticules devrait être soigneusement fait pour espérer une nette amélioration des performances thermique du nano-MCP.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'étude de cette thèse est menée donc dans l'objectif d'explorer deux possibilités d'amélioration des caractéristiques thermiques d'un échangeur tubulaire à chaleur latente. L'objectif est donc double, d'une part est d'examiner l'effet de la géométrie elliptique des tubes de l'échangeur à chaleur latente et d'autre part l'effet de l'insertion des nanoparticules sur les performances thermiques de l'échangeur.

Des simulations numériques sont réalisées à l'aide d'un code de calcul (Ansys Fluent).

Les conclusions tirées au terme de cette investigation sont donc résumées :

- 1) Les simulations numériques ont montré l'effet significatif des courants convectifs de flottabilité notamment sur le processus de fusion du MCP.
- 2) Dans le cas du tube elliptique horizontal, des tourbillons de type Raleigh-Bénard sont capturés, elles ont tendance à accélérer le processus de fusion du MCP et diminuer en conséquence la durée de la fusion complète du MCP.
- 3) La durée de fusion du MCP est moins sensible à l'orientation du tube elliptique pour des taux élevés de charge thermique alors qu'en général une position horizontale du tube elliptique favorise une fusion plus rapide du MCP.
- 4) Par l'insertion de nanoparticules (NPGs), un gain de performance thermique est obtenu durant la décharge thermique. La durée de décharge est donc réduite jusqu'à 50%
- 5) L'effet des nanoparticules n'est pas le même pour la charge thermique, une amélioration est obtenue seulement au premier stage de la fusion du nano-MCP durant la dominance de la conduction thermique.

Conclusion générale

- 6) A l'exception de la concentration de 3 wt% qui a donné une légère diminution de la durée de fusion du nano-MCP, les autres concentrations examinées (0.5 et 1 wt%) ont montré une augmentation de la durée de fusion du nano-MCP.
- 7) Le choix donc de la concentration des nanoparticules devrait être soigneusement fait pour assurer donc une nette amélioration des performances thermiques du nano-MCP.

Enfin, parmi les perspectives de cette étude, on peut citer l'effet des dimensions du tube sur les performances thermiques de l'échangeur et l'exploration également de l'effet de nanoparticules hydriques.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

1. Jegadheeswaran, S. and S.D. Pohekar, *Performance enhancement in latent heat thermal storage system: a review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009. **13**(9): p. 2225-2244.
2. Ismail, K. and R. Moraes, *A numerical and experimental investigation of different containers and PCM options for cold storage modular units for domestic applications*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009. **52**(19-20): p. 4195-4202.
3. Teggur, M., et al., *Comparative study of heat transfer during solidification of phase change materials inside three different capsules*. International Journal of Heat and Technology, 2010. **28**(2): p. 19-24.
4. Jesumathy, S., M. Udayakumar, and S. Suresh, *Experimental study of enhanced heat transfer by addition of CuO nanoparticle*. Heat and Mass Transfer, 2012. **48**(6): p. 965-978.
5. Karunamurthy, K., K. Murugumohankumar, and S. Suresh, *Use of CuO nano-material for the improvement of thermal conductivity and performance of low temperature energy storage system of solar pond*. Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, 2012. **7**(4): p. 1833-1841.
6. Arasu, A., A. Sasmito, and A. Mujumdar, *Thermal performance enhancement of paraffin wax with Al₂O₃ and CuO nanoparticles—a numerical study*. Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT), 2012. **2**(4).
7. Karthikeyan, S., *Numerical and experimental investigations on a packed bed latent heat storage system for low temperature air heating applications*. 2014.
8. Dincer, I., *On thermal energy storage systems and applications in buildings*. Energy and buildings, 2002. **34**(4): p. 377-388.
9. Schmit, H., et al., *Critical review on measured phase transition enthalpies of salt hydrates in the context of solid-liquid phase change materials*. Thermochimica acta, 2020. **683**: p. 178477.
10. Drissi, S., T.-C. Ling, and K.H. Mo, *Thermal efficiency and durability performances of paraffinic phase change materials with enhanced thermal conductivity—a review*. Thermochimica acta, 2019.
11. Agyenim, F., et al. *Numerical and experimental development of medium temperature thermal energy storage (Erythritol) system for the hot side of LiBr/H₂O air conditioning applications*. in World renewable energy congress. 2008.
12. De Gracia, A., et al., *Thermal analysis of including phase change material in a domestic hot water cylinder*. Applied thermal engineering, 2011. **31**(17-18): p. 3938-3945.
13. <https://www.rubitherm.eu/en/index.php/applications/automotive>, 2020.
14. Faden, M., et al., *An implicit algorithm for melting and settling of phase change material inside macrocapsules*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018. **117**: p. 757-767.
15. Lee, Y.F. and B. Boley, *Melting of an infinite solid with a spherical cavity*. International Journal of Engineering Science, 1973. **11**(12): p. 1277-1295.
16. Chung, J.D., J.S. Lee, and H. Yoo, *Thermal instability during the melting process in an isothermally heated horizontal cylinder*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1997. **40**(16): p. 3899-3907.
17. Pan, C., et al., *Experimental, numerical and analytic study of unconstrained melting in a vertical cylinder with a focus on mushy region effects*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018. **124**: p. 1015-1024.
18. Assis, E., et al., *Numerical and experimental study of melting in a spherical shell*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007. **50**(9-10): p. 1790-1804.

Références bibliographiques

19. Hlimi, M., et al., *Melting inside a horizontal cylindrical capsule*. Case Studies in Thermal Engineering, 2016. **8**: p. 359-369.
20. Stewart Jr, W. and K. Smith, *Experimental inward solidification of initially superheated water in a cylinder*. International communications in heat and mass transfer, 1987. **14**(1): p. 21-31.
21. Ismail, K.A., et al., *Experimentally validated two dimensional numerical model for the solidification of PCM along a horizontal long tube*. International Journal of Thermal Sciences, 2014. **75**: p. 184-193.
22. Yang, X., et al., *Thermal performance of a shell-and-tube latent heat thermal energy storage unit: Role of annular fins*. Applied energy, 2017. **202**: p. 558-570.
23. Hirata, T. and K. Nishida, *An analysis of heat transfer using equivalent thermal conductivity of liquid phase during melting inside an isothermally heated horizontal cylinder*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1989. **32**(9): p. 1663-1670.
24. Darzi, A.R., M. Farhadi, and K. Sedighi, *Numerical study of melting inside concentric and eccentric horizontal annulus*. Applied Mathematical Modelling, 2012. **36**(9): p. 4080-4086.
25. Park, C.E., S.S. Kim, and K.-S. Chang, *Branching solutions to inward melting problem in a horizontal tube*. International communications in heat and mass transfer, 1991. **18**(3): p. 343-350.
26. Ho, C.-J. and R. Viskanta, *Heat transfer during inward melting in a horizontal tube*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1984. **27**(5): p. 705-716.
27. Jourabian, M., M. Farhadi, and A.A.R. Darzi, *Heat transfer enhancement of PCM melting in 2D horizontal elliptical tube using metallic porous matrix*. Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 2016. **30**(6): p. 579-603.
28. Gong, M., et al., *Analysis of contact melting around a horizontal elliptical cylinder heat source*. Progress in Natural Science, 2008. **18**(4): p. 441-446.
29. Chen, W., et al., *An analytical solution of the heat transfer process during contact melting of phase change material inside a horizontal elliptical tube*. International journal of energy research, 1998. **22**(2): p. 131-140.
30. Dheep, G.R. and A. Sreekumar, *Influence of nanomaterials on properties of latent heat solar thermal energy storage materials—A review*. Energy conversion and management, 2014. **83**: p. 133-148.
31. Hosseinizadeh, S., A.R. Darzi, and F. Tan, *Numerical investigations of unconstrained melting of nano-enhanced phase change material (NEPCM) inside a spherical container*. International Journal of Thermal Sciences, 2012. **51**: p. 77-83.
32. Kaviarasu, C. and D. Prakash, *Review on Phase Change Materials with Nanoparticle in Engineering Applications*. Journal of Engineering Science & Technology Review, 2016. **9**(4).
33. Teng, T.-P. and C.-C. Yu, *Characteristics of phase-change materials containing oxide nano-additives for thermal storage*. Nanoscale research letters, 2012. **7**(1): p. 611.
34. Allahbakhsh, A. and M. Arjmand, *Graphene-based phase change composites for energy harvesting and storage: state of the art and future prospects*. Carbon, 2019.
35. Chavan, S. and V. Gumtapure, *Numerical and experimental analysis on thermal energy storage of polyethylene/functionalized graphene composite phase change materials*. Journal of Energy Storage, 2020. **27**: p. 101045.
36. Dhaidan, N.S., et al., *Experimental and numerical investigation of melting of NePCM inside an annular container under a constant heat flux including the effect of eccentricity*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013. **67**: p. 455-468.
37. Dhaidan, N.S., et al., *Experimental and numerical study of constrained melting of n-octadecane with CuO nanoparticle dispersions in a horizontal cylindrical capsule*

- subjected to a constant heat flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013. **67**: p. 523-534.
38. Zeng, Y., et al., *An experimental investigation of melting of nanoparticle-enhanced phase change materials (NePCMs) in a bottom-heated vertical cylindrical cavity*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013. **66**: p. 111-117.
39. Ahmed, S.F., et al., *Recent progress in solar thermal energy storage using nanomaterials*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017. **67**: p. 450-460.
40. Kibria, M., et al., *A review on thermophysical properties of nanoparticle dispersed phase change materials*. *Energy conversion and management*, 2015. **95**: p. 69-89.
41. Akhmetov, B., et al., *Numerical study of integrated latent heat thermal energy storage devices using nanoparticle-enhanced phase change materials*. *Solar Energy*, 2019. **194**: p. 724-741.
42. Arıcı, M., E. Tütüncü, and A. Campo, *Numerical investigation of melting of paraffin wax dispersed with CuO nanoparticles inside a square enclosure*. *Heat Transfer Research*, 2018. **49**: p. 847-863.
43. Ho, C.-J. and J. Gao, *An experimental study on melting heat transfer of paraffin dispersed with Al₂O₃ nanoparticles in a vertical enclosure*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013. **62**: p. 2-8.
44. Zabalegui, A., D. Lokapur, and H. Lee, *Nanofluid PCMs for thermal energy storage: Latent heat reduction mechanisms and a numerical study of effective thermal storage performance*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014. **78**: p. 1145-1154.
45. Seeniraj, R., R. Velraj, and N. Lakshmi Narasimhan, *Heat transfer enhancement study of a LH₂ unit containing dispersed high conductivity particles*. *J. Sol. Energy Eng.*, 2002. **124**(3): p. 243-249.
46. Fan, L.-W., et al., *Unconstrained melting heat transfer in a spherical container revisited in the presence of nano-enhanced phase change materials (NePCM)*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016. **95**: p. 1057-1069.
47. Fan, L.-W., et al., *Heat transfer during melting of graphene-based composite phase change materials heated from below*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014. **79**: p. 94-104.
48. Jourabian, M., et al., *Melting of NEPCM within a cylindrical tube: numerical study using the lattice Boltzmann method*. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2012. **61**(12): p. 929-948.
49. Brent, A., V.R. Voller, and K. Reid, *Enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: application to the melting of a pure metal*. *Numerical Heat Transfer, Part A Applications*, 1988. **13**(3): p. 297-318.
50. Inc, A., *ANSYS FLUENT theory guide*, 2013, Cannonsburg, PA, USA: ANSYS, Inc.
51. Hannoun, N., V. Alexiades, and T. Mai, *A reference solution for phase change with convection*. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2005. **48**(11): p. 1283-1308.
52. Benbrika, M., et al., *Numerical Study of N-Eicosane Melting Inside a Horizontal Cylinder for Different Loading Rates Numerical Study of N-Eicosane Melting Inside a Horizontal Cylinder for Different Loading Rates*. *International Journal of Heat and Technology*, 2020.
53. Dhaidan, N.S., et al., *Experimental and numerical investigation of melting of phase change material/nanoparticle suspensions in a square container subjected to a constant heat flux*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013. **66**: p. 672-683.
54. Āzisik, M.N., M.N. Özisik, and M.N. Özisik, *Heat conduction* 1993: John Wiley & Sons.

Références bibliographiques

55. Benbrika, M., et al., *Effect of orientation of elliptic enclosure on the charging process of latent thermal storage systems*. Journal of Thermal Engineering.
56. Benbrika, M., et al., *Investigation of Charging and Discharging Processes of a NePCM inside a Spherical Enclosure for Thermal Storage*.
57. Zhu, Z.-Q., et al., *Inward solidification heat transfer of nano-enhanced phase change materials in a spherical capsule: an experimental study*. Journal of Heat Transfer, 2018. **140**(2).
58. Nabavitatabayyi, M., et al., *Numerical analysis of a thermally enhanced domestic hot water tank*. Applied energy, 2014. **129**: p. 253-260.
59. Parameshwaran, R., R. Jayavel, and S. Kalaiselvam, *Study on thermal properties of organic ester phase-change material embedded with silver nanoparticles*. Journal of thermal analysis and calorimetry, 2013. **114**(2): p. 845-858.
60. Harikrishnan, S. and S. Kalaiselvam, *Preparation and thermal characteristics of CuO–oleic acid nanofluids as a phase change material*. Thermochimica acta, 2012. **533**: p. 46-55.
61. Xia, L. and P. Zhang, *Thermal property measurement and heat transfer analysis of acetamide and acetamide/expanded graphite composite phase change material for solar heat storage*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2011. **95**(8): p. 2246-2254.