

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Présenté par :

DRAOU Fadia

et

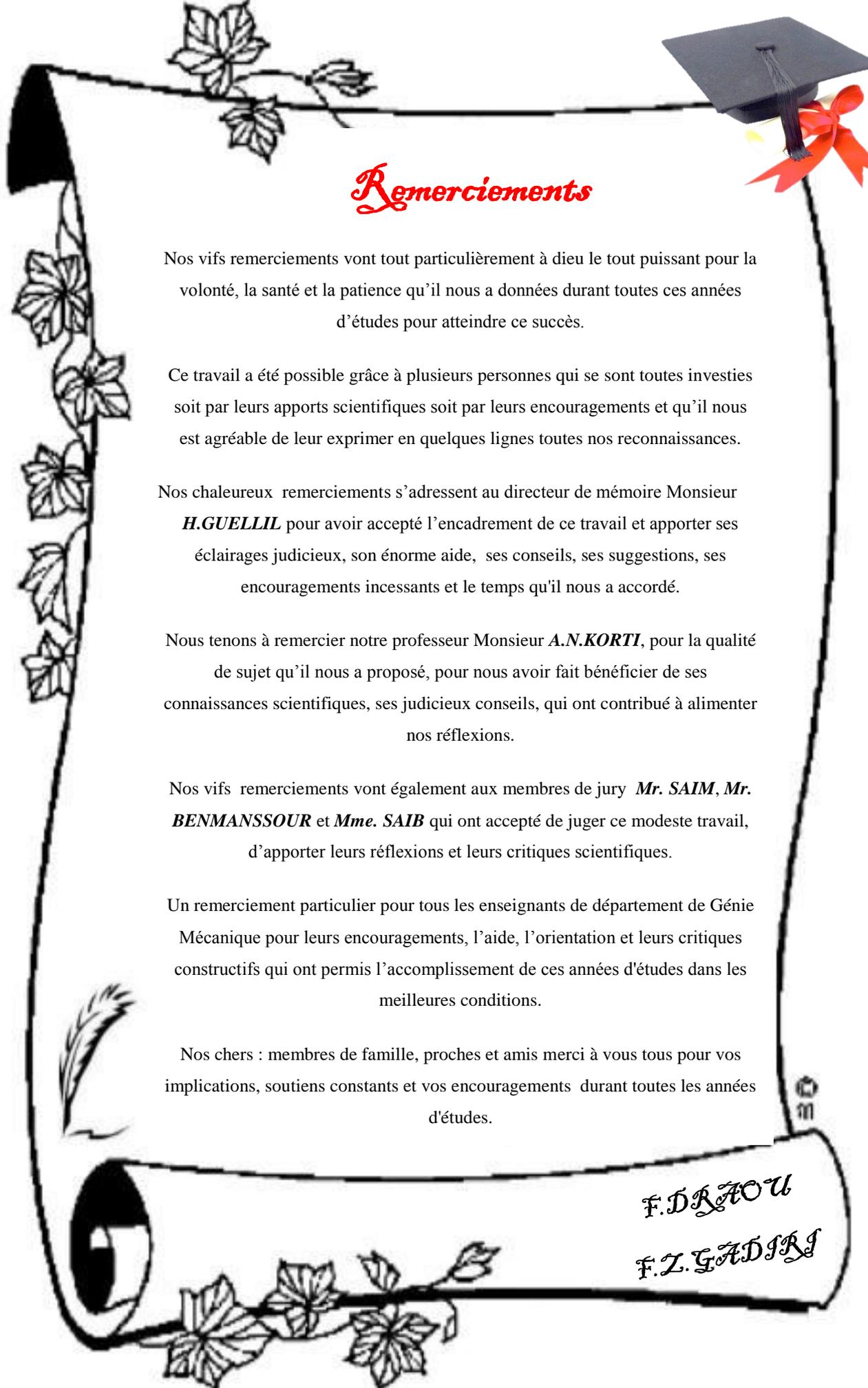
GADIRI Fatima Zahra

Sujet

Effet de l'inclinaison sur le processus de la fusion de la paraffine dans une cavité carrée

Soutenu publiquement, le 25 / 06 / 2019, devant le jury composé de :

M. SAIM. R	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
M. GUELLIL. H	MAA	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
M. KORTI. A. N	Professeur	Univ. Tlemcen	Co- Directeur de mémoire
Mme. SAIB. H	MAA	Univ. Tlemcen	Examineur 1
M. BENMANSOUR. A	MCB	Univ. Tlemcen	Examineur 2



Remerciements

Nos vifs remerciements vont tout particulièrement à dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a données durant toutes ces années d'études pour atteindre ce succès.

Ce travail a été possible grâce à plusieurs personnes qui se sont toutes investies soit par leurs apports scientifiques soit par leurs encouragements et qu'il nous est agréable de leur exprimer en quelques lignes toutes nos reconnaissances.

Nos chaleureux remerciements s'adressent au directeur de mémoire Monsieur **H.GUELLIL** pour avoir accepté l'encadrement de ce travail et apporter ses éclairages judicieux, son énorme aide, ses conseils, ses suggestions, ses encouragements incessants et le temps qu'il nous a accordé.

Nous tenons à remercier notre professeur Monsieur **A.N.KORTI**, pour la qualité de sujet qu'il nous a proposé, pour nous avoir fait bénéficier de ses connaissances scientifiques, ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter nos réflexions.

Nos vifs remerciements vont également aux membres de jury **Mr. SAIM, Mr. BENMANSSOUR** et **Mme. SAIB** qui ont accepté de juger ce modeste travail, d'apporter leurs réflexions et leurs critiques scientifiques.

Un remerciement particulier pour tous les enseignants de département de Génie Mécanique pour leurs encouragements, l'aide, l'orientation et leurs critiques constructifs qui ont permis l'accomplissement de ces années d'études dans les meilleures conditions.

Nos chers : membres de famille, proches et amis merci à vous tous pour vos implications, soutiens constants et vos encouragements durant toutes les années d'études.

F. DRABOU
F. Z. GADRI

Dédicaces

À mon cher papa

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour toi. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien-être. Ce travail est le fruit des sacrifices que tu as consenti à faire pour mon éducation et ma formation toutes ces années. C'est aussi grâce à toi que j'en suis là aujourd'hui...

À ma chère maman

Merci pour sa motivation, sa patience, sa contribution et sa présence quotidienne, ses conseils, merci d'avoir toujours respecté mes choix, d'avoir toujours cru en moi, de m'avoir toujours soutenu et aidé durant ces longues années d'études. C'est aussi grâce à elle que j'en suis là aujourd'hui...

À ma famille

À mon frère Mohamed puisse Dieu, le tout puissant, qui est toujours présent à mes pensées, qui me manque énormément, je dédie cette recherche à ton âme mon cher.

Mes chers frères et sœurs pour leurs encouragements constants et leur soutien moral. Que dieu les protèges et leurs offre la chance et le bonheur.

A mes beaux-frères, mes belles sœurs qui ne cessent pas de m'encourager et me conseiller. Cette humble dédicace ne saurait exprimer le grand respect et la profonde estime que j'ai pour vous.

A mes neveux et mes nièces. Que dieu les protèges et leurs offre la chance et le bonheur

À mes proches

Mon cher ami **K. Abderrahim** pour son encouragement constant, de m'avoir toujours soutenu et aidé dans les moments durs. Que dieu protège notre amitié.

Mon binôme et ma sœur **G. Fatima Zahra**, avec qui je partage des moments de ma vie au fil du temps, merci pour ton encouragement, soutien moral et ta présence constante. Que dieu protège notre amitié

A tous les membres de ma promotion. A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études. A tous ceux qui me sont chers et que j'ai omis de citer.

Merci infiniment

Fadia

Dédicaces

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut...
Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour,
Le respect, la reconnaissance...
Aussi, c'est tout simplement que
Je dédie ce mémoire

À la mémoire de mon père 'Salah Eddine'

À celui qui m'a appris le succès et la patience, À celui qui me manque infiniment.
À Celui qui me donne de l'énergie même dans son absence. À la force et la douceur tout en un. À la
raison de ma vie..... Mon père le défunt.
Soyez fière, ta petite « *Tou Tou Ya* » a enfin réalisé ses rêves et elle est fière d'être là
Paix à ton âme mon cher

À ma très chère mère 'Fatima'

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les
sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.
Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que
votre bénédiction m'accompagne toujours.
Que ce modeste soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices.
Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie.
En ce jour mémorable, pour moi ainsi que pour toi, reçoit ce travail en signe de ma vive reconnaissance et
ma profonde estime.

À mes frères

Je ne peux pas exprimer à travers ces lignes tous mes sentiments d'amour et de tendresse envers vous,
mes chers.
Je vous souhaite la réussite dans vos vies avec tout le bonheur qu'il faut pour vous combler.
À vous mes frères je dédie ce mémoire.

À ma sœur

Tu es pour moi une sœur et une amie plus qu'un binôme. Ma paire « *Fadia* » qui m'accompagne dans ce
mémoire et dans ma vie privée, nous avons partagé ensemble beaucoup de moments de joie et de
frustration qu'on a pu surmonter ensemble. On était, on est et on sera toujours ensemble dans la joie
comme dans le mal.

*À tous ceux et celles qui me sont chers et que j'ai omis
involontairement de citer.*

Fatima Zahra

ملخص

تقدم هذه المذكرة عملاً تجريبياً لغرفة حرارية مصنوع من الزجاج لفهم وتصوير السلوك الحراري لمواد تغيير الطور (البارافين) أثناء الذوبان. ويتناول هذا البحث الدراسة الحرارية لتأثير ميل الغرفة على مرحلة عملية التغيير. تم تطوير واجهة بواسطة برنامج LabVIEW للحصول على بيانات رقمية لتطور درجة الحرارة في مواقع مختلفة. تم تدعيم العمل بواسطة كاميرا الأشعة تحت الحمراء ، واستخدمت لالتقاط الخريطة الحرارية لسلوك البارافين. تم الحصول على مكسب قدره 3 ساعات في حالة التسخين من الاسفل بالنسبة لحالة التسخين من الجانب.

الكلمات المفتاحية: الانصهار ، البارافين ، الحمل الحراري ، تغيير المرحلة ، لافيو.

Résumé

Ce manuscrit présente un travail expérimental d'une cavité thermique fabriquée en verre dans le but de comprendre et visualiser le comportement thermique d'un matériau à changement de phase (paraffine) lors de la fusion. Le mémoire porte sur l'étude thermique de l'effet de l'inclinaison de la cavité sur le processus de changement de phase. Une interface a été développée par le logiciel LabVIEW afin d'acquérir les données numériques de l'évolution des températures à différentes positions. Le travail est renforcé par une caméra infra-rouge, utilisée pour capturer la carte thermique du comportement de la paraffine. Un gain de 3h a été obtenu dans le cas d'un chauffage par le bas par rapport à un chauffage par le côté.

Mots clés : fusion, paraffine, convection, MCP, changement de phase, LabView.

Abstract

This manuscript presents an experimental work of a thermal cavity made of glass in order to understand and visualize the thermal behavior of a phase change material (paraffin) during melting. The present paper deals with the thermal study of the effect of the cavity's inclination on the change process phase. An interface has been developed by LabVIEW software to acquire numerical data of temperature evolution at different positions. The work is reinforced by an infra-red camera, used to capture the thermal map of paraffin behavior. A gain of 3h was obtained in the case of a bottom heating compared to a heating by the side.

Keywords: fusion, paraffin, convection, PCM, phase change, LabView.

Sommaire

Résumé	i
Sommaire	ii
Liste des figures	iii
Liste des tableaux	iv
Nomenclature et abréviation	vi

<i>Introduction générale</i>	1
---	---

Chapitre I : Matériaux à changement de phase

I.1.	Introduction.....	5
I.1.1.	Matériaux à changement de phase pour le stockage d'énergie thermique	5
I.2.	Matériaux à changement de phase.....	6
I.2.1.	Historique des MCP	7
I.2.2.	Classification des types des matériaux à changement de phase.....	8
I.3.	Phénomènes physiques lors du changement de phase	2
I.3.1.	Interface mobile solide-liquide.....	13
I.3.2.	Changement de densité lors du changement de phase	14
I.3.3.	Effet de flottabilité dans la région de fusion	14
I.3.4.	Changement de phase sur une large plage de température.....	14
I.3.5.	Hystérésis d'enthalpie	15
I.4.	Structures d'échange thermique.....	15
I.4.1.	Choix d'une structure adaptée	15
I.4.2.	Structures possibles	17
I.5.	Applications MCP.....	21

Sommaire

Chapitre II : Revue bibliographique

II.1.	Introduction.....	23
II.2.	Travaux antérieurs	23

Chapitre III : Procédure expérimentale

III.1.	Introduction.....	42
III.2.	Description de l'installation.....	42
III.3.	Etalonnage, précision et sensibilité des capteurs	44
III.4.	Méthodes de réalisation	46
III.4.1.	Réalisation de l'enceinte MCP	46
III.5.	Logiciel utilisé.....	50
III.5.1.	LabVIEW	50
III.5.1.1.	Description du logiciel	50
III.5.1.2.	Etapas de création d'une interface LabVIEW	50
III.5.1.3.	Présentation de l'interface LabVIEW	55
III.5.2.	IRSoft Testo i875	56
III.5.2.1.	Description du logiciel	56
III.5.2.2.	Présentation de l'interface IRSOFT Testo i875	56
III.5.2.3.	Analyse des images	58
III.5.2.4.	Représentation de l'image.....	59
III.6.	Expériences menées	59

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1.	Introduction.....	62
IV.2.	Fusion de la paraffine chauffée par le côté	62
IV.2.1.	Evolution du front de la fusion de la paraffine chauffée par le côté.....	62
IV.2.2.	Evolution des isothermes	67
IV.2.3.	Evolution temporelle de la température de la paraffine.....	69

Sommaire

IV.3. Fusion de la paraffine chauffée par le bas	70
IV.3.1. Evolution du front de la fusion de la paraffine chauffée par le bas	70
IV.3.2. Evolution des isothermes.....	73
IV.3.3. Evolution temporelle de la température de la paraffine	75
IV.4. Fusion de la paraffine dans une cavité inclinée de 45 °	76
IV.4.1. Evolution du front de la fusion de la paraffine dans une cavité inclinée	76
IV.4.2. Evolution des isothermes.....	79
IV.4.3. Evolution temporelle de la température de la paraffine	81
IV.5. Evolution de la fraction volumique du liquide	82
<i>Conclusion générale et perspectives</i>	85
<i>Références bibliographiques</i>	88

Liste des figures

Chapitre I : Matériaux à changement de phase

Fig. I.1. Comparaison entre la capacité de stockage de chaleur d'une sélection des MCP commerciaux avec des matériaux de construction typiques [16].	6
Fig. I.2. Classification des matériaux à changement de phase [17].	8
Fig. I.3. Présentation graphique de la conductivité thermique en fonction de la chaleur spécifique et de la masse volumique pour différentes familles de matériaux [21].	16
Fig. I.4. Schéma illustrant les échanges thermiques dans des cylindres en simple flux à gauche, et en double flux à droite [21].	17
Fig. I.5. Présentation des structures à ailettes dans des surfaces multiples planes à gauche, cylindrique à droite [22].	18
Fig. I.6. Structure filaire [22].	19
Fig. I.7. Présentation de la structure en nid d'abeille [22].	19
Fig. I.8. Illustration de trois échantillons de mousse en aluminium. (A) mousse seule, (B) mousse imprégnée de paraffine et (C) mousse imprégnée d'acide stéarique (MCP) [23].	20

Chapitre II :Revue bibliographique

Fig. II.1. Distribution de flux (à gauche) et les isothermes (à droite) dans la zone de fusion de la cire de paraffine avec l'aluminium [5].	25
Fig. II.2. Contours de l'interface solide-liquide et lignes de courant pour un chauffage par le côté gauche pour $t= 3h30$ min et $5h54$ min [6].	26
Fig. II.3. Contours de l'interface solide-liquide dans une cavité inclinée pour $t=1h38$ min, $3h3$ min et $5h54$ min [6].	27
Fig. II.4. Contours de l'interface solide-liquide et lignes de courant pour un chauffage par le bas pour $t=1h38$ min, $3h3$ min et $4h20$ min [6].	28
Fig. II.5. Evolution de la fusion du MCP pendant le processus de charge pour un débit volumique de 25 l/h [7].	30

Liste des figures

Fig. II.6. Evolution de la solidification du MCP au cours du processus de décharge pour un débit volumique de 25 l/h [7].	30
Fig. II.7. Procédé de fusion de MCP pour différents angles d'inclinaison [8].	31
Fig. II.8. Isothermes pour plusieurs angles d'inclinaison $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$, pour plusieurs rapports de forme ($1 \leq A \leq 5$) et pour $Ra = 10^4$ [9].	32
Fig. II.9. Lignes de courant pour plusieurs angles d'inclinaison $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$, pour plusieurs rapports de forme ($1 \leq A \leq 5$) et pour $Ra = 10^4$ [9].	33
Fig. II.10. Isothermes et lignes de courant pour 1 cm de côté. (A) $T_h = 50^\circ\text{C}$ et (B) $T_h = 100^\circ\text{C}$ [10].	34
Fig. II.11. Isothermes et lignes de courant pour 2 cm de côté. (A) $T_h = 50^\circ\text{C}$ et (B) $T_h = 100^\circ\text{C}$ [10].	35
Fig. II.12. Images du régime linéaire à différents moments $t = 50; 100; 300; 400$ s pour les isothermes et les lignes de courant pour $L = 0.01$ m [11].	36
Fig. II.13. Evolution temporelle de la fusion du Tétracosane en maintenant la paroi inférieure à une température constante de $T_w = 80^\circ\text{C}$ [12]	37
Fig. II.14. Evolution des lignes de courant durant la fusion du Tétracosane en maintenant la paroi inférieure est maintenue à une température constante de $T_w = 80^\circ\text{C}$ [12].	38
Fig. II.15. Evolution temporelle de la fusion de la paraffine avec une grille en Zamak [13].	39
Fig. II.16. Evolution temporelle de la fusion de la paraffine avec une grille en l'aluminium [13].	40

Chapitre III : Procédure expérimentale

Fig. III.1. Différents matériels et accessoires de l'installation	42
Fig. III.2. Régulateur de puissance.	43
Fig. III.3. Outils et méthodes de perçage.	44
Fig. III.4. Différents capteurs utilisés	45
Fig. III.5. Pliage et soudage des tôles en Cu.	46
Fig. III.6. Assemblage des tôles en cuivre avec la cavité thermique en verre.	46

Liste des figures

Fig. III.7. Résistance électrique et son emplacement à l'intérieure de la cavité en cuivre.	47
Fig. III.8. Emplacement des thermocouples y compris joints toriques.	47
Fig. III.9. Position des capteurs à l'arrière de la cavité thermique calorifugée par la laine de roche.	48
Fig. III.10. Méthode de chauffage de la paraffine.	49
Fig. III.11. Chaîne d'acquisition y compris les modules.	49
Fig. III.12. Création de la boucle While (While Loop)	51
Fig. III.13. Temps de contrôle	52
Fig. III.14. Présentation de la fonction Temps écoulé.....	52
Fig. III.15. Création de DAQ Assistant.....	53
Fig. III.16. Affichage de DAQ Assistant.....	53
Fig. III.17. Création du graphe	54
Fig. III.18. Création d'un tableau de données	54
Fig. III.19. Création d'un fichier d'enregistrement des mesures.....	55
Fig. III.20. Interface LabVIEW.	55
Fig. III.21. Interface IRSofT Testo i875.	56
Fig. III.22. Espace de travail.....	57
Fig. III.23. Différentes positions utilisées dans les expériences.....	60

Chapitre IV : Résultats et discussions

Fig. IV.1. Evolution de l'interface solide/liquide durant la fusion de la paraffine chauffée par le côté. (A) Processus de la fusion de la paraffine, (B) Forme du front de la fusion en (cm)	65
Fig. IV.2. Evolution temporelle de la position et de la forme de l'interface solide-liquide.....	66
Fig. IV.3. Représentation de la poche d'air formée par la paraffine après la solidification.	66
Fig. IV.4. Evolution des isothermes durant la fusion de la paraffine chauffée par le côté.....	68

Liste des figures

Fig. IV.5. Evolution temporelle de la température de la paraffine.	69
Fig. IV.6. Evolution de l'interface solide/liquide durant la fusion de la paraffine chauffée par le bas. (A) Processus de la fusion de la paraffine, (B) Forme du front de la fusion en (cm)	72
Fig. IV.7. Evolution temporelle de la position et de la forme de l'interface solide-liquide.....	73
Fig. IV.8. Evolution des isothermes durant la fusion de la paraffine chauffée par le bas	74
Fig. IV.9. Evolution temporelle de la température de la paraffine	75
Fig. IV.10. Evolution de l'interface solide/liquide durant la fusion de la paraffine chauffée par une source de chaleur inclinée de 45°. (A) Processus de la fusion de la paraffine, (B) Forme du front de la fusion en (cm).	78
Fig. IV.11. Evolution temporelle de la position et de la forme de l'interface solide-liquide.....	79
Fig. IV.12. Evolution des isothermes durant la fusion de la paraffine dans une cavité inclinée de 45°	80
Fig. IV.13. Evolution temporelle de la température de la paraffine	81
Fig. IV.14. Evolution de la fraction volumique du liquide	82

Liste des tableaux

Chapitre I : Matériaux à changement de phase

Tab. I.1. Résumé de la comparaison entre les MCP organiques et inorganiques..... 12

Chapitre III : Procédure expérimentale

Tab. III.1. Propriétés thermophysiques du tétracosane[2].....48

Nomenclature et abréviation

Abréviation

MCP Matériaux à changement de phase

Symboles

ρ_s Masse volumique de la paraffine à l'état solide (Kg/m^3)

ρ_L Masse volumique de la paraffine à l'état liquide (Kg/m^3)

L_f Chaleur latente (Kj/Kg)

λ Conductivité thermique ($W/m.K$)

C_p Chaleur spécifique à pression constante ($Kj/Kg.K$)

T Température ($^{\circ}C$)

l_f Fraction volumique (%)

t Temps (min)



Introduction

générale



Introduction générale

Depuis plus d'un siècle, la température moyenne terrestre s'est vue considérablement modifiée. Les progrès techniques liés à un siècle et demi d'industrialisation ont un impact majeur sur l'environnement. L'utilisation accrue de combustibles fossiles, la déforestation ainsi que les pratiques agricoles intensives entraînent une augmentation des émissions de GES (gaz à effet de serre), qui a pour conséquence directe l'augmentation de la température moyenne terrestre. Les prévisions pour l'an 2100 indiquent une hausse de 1,4 à 5,8 degrés Celsius. En prenant en compte l'estimation minimale, cette hausse est supérieure à tout autre réchauffement sur 100 ans. Ce changement brusque ne sera pas sans conséquence négative sur l'environnement et ses populations.

L'augmentation des émissions de GES est liée à l'augmentation de la consommation énergétique. La demande d'énergie primaire mondiale pourrait augmenter de 40 % d'ici 2030. La hausse de la consommation d'énergie secondaire, c'est-à-dire celle utilisée pour chauffer, climatiser ou équiper les habitations et les institutions, est une des causes de l'augmentation des émissions de GES. Partant de ce constat, l'efficacité énergétique devient une priorité pour les pays qui visent à limiter la consommation des ressources en assurant une meilleure utilisation de l'énergie par des solutions techniques. Des chercheurs estiment que l'on pourrait réduire de 73% l'énergie mondiale consommée en utilisant les techniques d'efficacité énergétique. Le chauffage et le refroidissement représentent une part importante des applications liées à l'efficacité énergétique. Pour répondre à la demande croissante d'énergie, des solutions innovantes de stockage d'énergie thermique apparaissent. C'est dans ce contexte que s'inscrivent les matériaux à changement de phase (MCP) comme l'une des solutions partielles. Ces matériaux ont la capacité de stocker et de libérer d'importantes quantités de chaleur lors du passage d'une phase à une autre.

Les MCP ont suscités un intérêt croissant dans la recherche en énergétique, en raison de leur rôle important dans la réalisation des économies d'énergie dans

diverses applications. Parmi le nombre important de MCP étudiés dans la littérature, les paraffines sont considérées comme prometteuses pour le stockage par chaleur latente en raison de leurs propriétés thermiques appropriées, de leur stabilité chimique et thermique, de leur comportement non corrosif et non toxique. Cependant, elles posent des problèmes thermiques lors du changement de phase qui ont suscités un intérêt particulier des ingénieurs et des mathématiciens pour répondre à ce genre de problèmes rencontrés dans plusieurs processus industriels et des sciences appliquées. Parmi ces phénomènes, on peut citer la mobilité de l'interface solide-liquide, le changement de densité, l'effet de la flottabilité dans la région de fusion,....etc.

Des études numériques et expérimentales sont réalisées depuis les périodes de **Clapeyron (1831)** et de **Stefan (1891)** jusqu'à ce moment sur le phénomène de changement de phase. Ces travaux essaient de maîtriser les mécanismes qui se déroulent lors de la fusion des MCP afin d'accélérer le processus de transfert de chaleur et d'améliorer leurs faible conductivité thermique (surtout les paraffines). L'intérêt de ce travail est de réaliser un banc expérimental pour visualiser le processus de changement de phase dans une enceinte thermique et étudier l'effet de l'inclinaison de cette enceinte. Le but est d'améliorer le processus de fusion de la paraffine sans influencer les propriétés thermophysiques du MCP utilisé (Paraffine).

Pour atteindre les objectifs fixés à cette étude, on a subdivisé ce mémoire en quatre chapitres :

- ❖ Le premier chapitre est une revue bibliographique consacrée à l'exposé des travaux de recherche sur les phénomènes de fusion des matériaux à changement de phase (MCP). Pour ce faire, une littérature riche portant sur plusieurs références bibliographiques a été consultée et exploitée.
- ❖ Le deuxième chapitre porte sur l'étude théorique des MCP basée sur les connaissances les plus récentes. Des phénomènes physiques sont présentés et caractérisés lors de processus de changement de phase. Des structures sont prises en compte, à savoir le type de la géométrie et la nature de matériau afin

d'améliorer le transfert thermique. De plus, les différentes applications des MCP sont citées pour différents domaines.

- ❖ Le troisième chapitre présente l'ensemble du dispositif expérimental y compris les matériels de mesure utilisés pour étudier les phénomènes d'un MCP (Paraffine) dans une cavité transparente. De plus, une interface créée par le logiciel LabVIEW permet de suivre et d'enregistrer l'évolution de température à l'intérieur de la paraffine durant le processus de la fusion.
- ❖ Le quatrième chapitre présente les résultats de l'ensemble des essais expérimentaux traités dans une cavité carrée pour différentes inclinaisons variable et chauffée par l'un de ses côtés. Ainsi, comprendre le comportement thermique du MCP utilisé (Paraffine) lors de la fusion et sélectionner la meilleure position pour un bon comportement.

Enfin cette étude est achevée par une conclusion générale regroupant les résultats les plus marquants de ce travail en donnant des perspectives pour la suite des travaux.



Chapitre I

Matériaux à changement de phase



I.1. Introduction

L'utilisation des MCP est devenue un domaine clé de recherche au cours des trois dernières décennies. Pendant le processus de changement de phase des MCP (solide-liquide, solide-gaz, liquide-gaz), de grandes quantités de chaleur peuvent être stockées ou libérées (Au-delà d'une certaine température caractéristique de chaque matériau, ils se liquéfient en absorbant la chaleur et les restituent lorsque la température baisse). Les MCP peuvent jouer un rôle important dans ces circonstances, car l'énergie excédentaire disponible en période creuse peut être stockée dans des dispositifs à MCP pour une utilisation ultérieure. En raison des avantages de la durabilité des propriétés physiques et chimiques et du phénomène de refroidissement, les MCP organiques ont été choisis couramment pour l'application du stockage d'énergie à changement de phase dans les travaux précédents. Cependant, la plupart des MCP organiques ont une conductivité thermique médiocre, ceci retarde la durée de la charge et de la décharge thermique. Les chercheurs ont exploité différentes méthodes pour résoudre ce problème, notamment l'ajout des tubes à ailettes de différentes configurations, l'insertion d'une matrice métallique dans le MCP, l'injection des nano conducteurs, la répartition de différents matériaux à conductivité élevée et la micro-encapsulation du MCP et multitubes [1].

I.1.1. Matériaux à changement de phase pour le stockage d'énergie thermique

L'énergie thermique peut être stockée sous forme d'énergie sensible ou latente en chauffant ou en refroidissant une masse de matériau. Cette énergie devient alors disponible lorsque le processus inverse est appliqué. Les matériaux à changement de phase (MCP) sont largement utilisés pour stocker de l'énergie thermique à une température fixe en exploitant leur chaleur latente (chaleur de fusion) lors du changement de phase. La température de fusion varie dans un large intervalle pour différents MCP, par exemple les paraffines fabriquée par la société allemande

Rubitherm [2] qui fournit même des paraffines avec des points de fusion négatifs, les acides gras, les alcools de sucre, les hydrates de sel, etc.

I.2. Matériaux à changement de phase

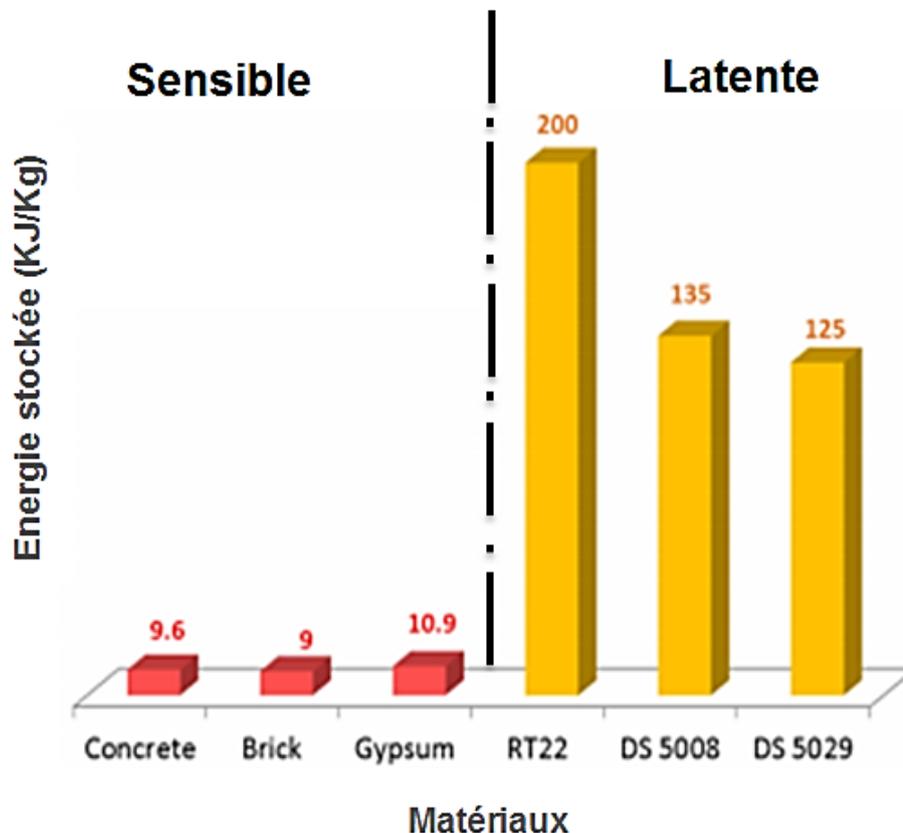


Fig. I.1. Comparaison entre la capacité de stockage de chaleur d'une sélection des MCP commerciaux avec des matériaux de construction typiques [3].

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont des matériaux dont l'utilité pratique repose sur l'existence d'une ou plusieurs transition de phase en stockant ou en libérant une quantité importante d'énergie lors du changement de phase. Cela est dû au fait que les MCP ont de fortes densités de stockage (quantité d'énergie stockée par unité de masse).

En outre, ces matériaux peuvent être appliqués dans plusieurs domaines à cause de leur capacité de stockage qui est considérablement plus grande par rapport aux matériaux conventionnels [3], comme on peut le constater sur la Fig. I.1.

I.2.1. Historique des MCP

Depuis le premier choc pétrolier des années 70, des études sur les MCP ont été entreprises avec les sels hydratés. Ils étaient testés au début pour stocker l'énergie solaire. Or, de nombreux problèmes se sont présentés et la communauté scientifique se rendit rapidement compte que ce type de MCP ne pouvait être utilisé à cause des principaux problèmes rencontrés [4] :

- Une mauvaise transition de phase.
- La surfusion.
- Un mauvais conditionnement (poches, capsules, barres ...).
- La durée de vie très faible (limitation du nombre de cycles).

Beaucoup de ces inconvénients ont mis à l'écart l'étude de ces matériaux. Ce n'est que dans le cadre du « Grenelle de l'Environnement » qu'un intérêt nouveau s'est manifesté, avec de nouvelles substances et de nouveaux modes de conditionnement. En effet, l'apparition de nouveaux MCP solide/liquide à forme stabilisée a permis de relancer les applications dans de nombreux domaines. La majorité des MCP à forme stabilisée sont des composites comportant une matrice solide inerte dont la porosité est remplie par le MCP. Cette matrice inerte assure la stabilité structurelle de l'ensemble et évite l'écoulement de la phase liquide du MCP à travers le conteneur. A basse température ($< 120^{\circ}\text{C}$), les développements suivants sont rencontrés :

- La micro-encapsulation de la paraffine dans les polymères.
- Des matrices inertes qui sont imbibées de paraffine pour améliorer la conductivité thermique du MCP.
- Des matériaux polymères/MCP obtenus par la fusion et par un mélange d'un polymère (exemple: polyéthylène à haute densité) et des paraffines.
- L'intégration des paraffines micro-encapsulées dans des composites en utilisant des procédés d'imprégnation et d'imbibition.

I.2.2. Classification des types des matériaux à changement de phase

Une classification des différents types de matériaux à changement de phase est illustrée sur la Fig. I.2.

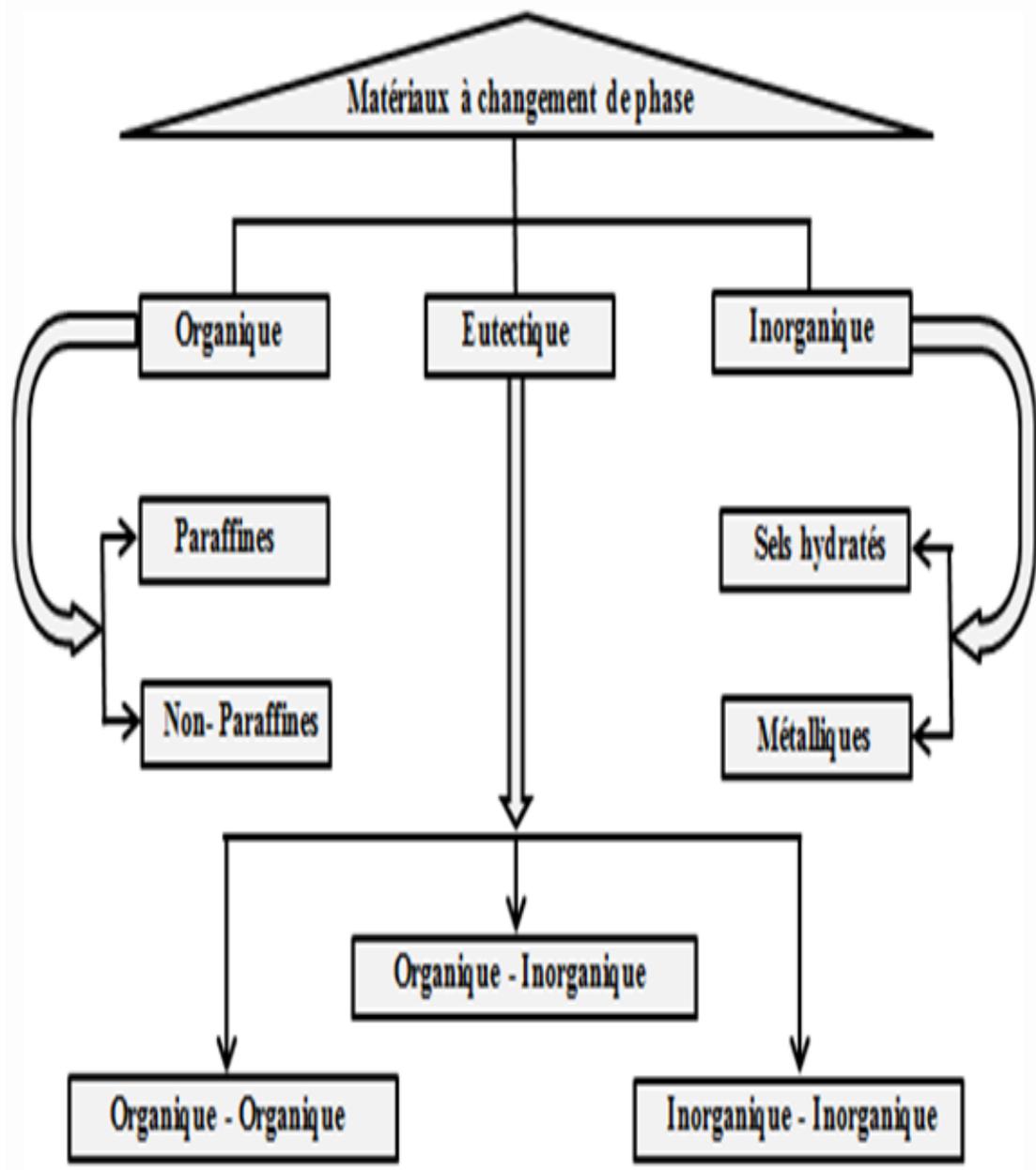


Fig. I.2. Classification des matériaux à changement de phase [4].

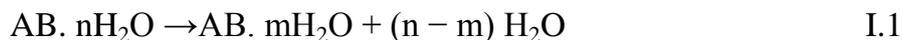
Deux types principaux sont les plus largement utilisés : les hydrates de sel (composés inorganiques) et les paraffines (composés organiques).

a. Composés inorganiques

Parmi les matériaux inorganiques les plus utilisés on trouve :

Hydrates de sels

Les hydrates de sel sont des sels inorganiques qui contiennent de l'eau et dont la formule générale est $AB \cdot nH_2O$. Pendant la charge, la déshydratation du sel aura lieu. Le produit de cette déshydratation peut être un hydrate de sel avec moins molécules d'eau selon la formule :



Ou bien le même sel sous sa forme anhydre :



Le sel hydraté le plus utilisé par son faible coût est le $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ ($T_{\text{fusion}} = 28-30 \text{ }^\circ\text{C}$). On peut citer aussi le $Mn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ pour les applications de climatisation, et un nouveau matériau obtenu à partir d' $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ utilisé avec des additifs pour des applications industrielles autour de 100°C . On trouve aussi la bischofite comme exemple d'un mélange d'hydrates de sels composée à 95 % massique de $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ et à 5 % massique de $KMgCl_3 \cdot 6H_2O$, $Li_2SO_4 \cdot H_2O$ et autres sels ioniques tels que $NaCl$ et KCl et ayant une température de fusion autour de $98.9 \text{ }^\circ\text{C}$ [5].

Avantages

Les hydrates de sel sont appropriés pour leur utilisation dans le stockage thermique parce qu'ils présentent une grande chaleur latente ($\approx 100-300 \text{ KJ/Kg}$), une température de fusion adaptée aux applications à basse température ($\approx 8-100 \text{ }^\circ\text{C}$) et sont largement compétitifs en termes de coût et de rentabilité. Ils sont en effet déjà commercialisés pour servir comme matériaux de stockage et disponibles en gros volume. Par ailleurs, ils présentent une conductivité thermique plus élevée que les paraffines (environ $0,5 \text{ W/m. K}$) [5].

Inconvénients

Le principal problème qui se pose lors de l'utilisation des hydrates de sels est leur fusion non congruente, ce qui veut dire que le sel n'est pas totalement soluble dans l'eau d'hydratation au niveau du point de fusion. Ainsi, au moment de la fusion, il peut se former une solution aqueuse saturée en sel et le surplus de solide peut se déposer au fond du container par sa différence de masse volumique, ce qui empêche la solidification. Différentes solutions ont été proposées, comme par exemple : l'agitation mécanique, l'encapsulation du MCP, l'utilisation d'un excès d'eau pour éviter la saturation de la solution ou encore l'ajout d'additifs.

Un autre inconvénient des hydrates de sel est la surfusion. Pour résoudre ce problème, un agent de nucléation peut être ajouté. Il permet de fournir un noyau où la cristallisation peut commencer. Une autre option est la rétention dans une petite région froide de cristaux qui serviront comme noyaux.

Pour éviter ces problèmes, les chercheurs se sont donc tournés vers les substances organiques telles que la paraffine.

b. Composés organiques

On trouve dans les composés organiques principalement le matériau le plus utilisé et le plus étudié dans la littérature :

Paraffines

Les paraffines sont une famille d'hydrocarbures saturés de formule brute C_nH_{2n+2} , aux propriétés très similaires. Parmi les MCP solide-liquide, elles sont les plus utilisées, surtout pour les applications à basse température (de -10 à 100 °C) car elles offrent l'avantage d'avoir une chaleur latente qui dépend de la masse molaire et des températures de changement de phase variables, donnant de la flexibilité pour choisir le MCP approprié à chaque application [5].

Avantages

Parmi les avantages des paraffines on distingue :

- La masse volumique de la phase liquide des paraffines varie de 750 à 850 Kg/m^3 , et celle de la phase solide est de 800 à 900 Kg/m^3 . La dilatation volumique est donc environ 15 % pendant le processus de changement de phase.
- L'enthalpie de fusion varie entre 180 et 230 KJ/Kg . Cette valeur est grande par rapport à celle des autres matériaux organiques dont la capacité thermique massique est de 2,1 KJ/Kg. K . En tenant compte des deux valeurs (chaleur sensible et chaleur latente), on obtient une densité importante d'énergie de stockage.
- Les cires paraffiniques ne présentent aucun danger écologique. Elles n'ont pas d'effets négatifs sur les plantes, les animaux, l'eau ou les micro-organismes. Elles sont non – toxiques et 100% recyclables.
- Quelques paraffines commerciales sont adaptées aux applications de l'énergie solaire. Pour les applications dans les bâtiments, une paroi contenant 3 cm d'épaisseur de paraffine est l'équivalent thermique d'une paroi en béton de 40 cm.
- Les paraffines ordinaires sont souvent des mélanges d'hydrocarbures et ont un prix raisonnable. En fonction de leur composition, elles présentent des points de fusion variés. Par contre les cires paraffiniques pures sont très coûteuses.

Inconvénients

- Les cires paraffiniques présentent une très faible conductivité thermique (0,18 – 0,25 W/m K), la moitié de celle des hydrates salins. Cette propriété diminue le taux de stockage /déstockage de la chaleur pendant les cycles fusion/solidification. Cette faible conductivité thermique qui est habituellement un handicap, bien que dans le transport de nourriture elle soit un avantage, peut être compensée par une grande surface d'échange ou par un conditionnement adapté.

- Les cires paraffiniques sont facilement inflammables

c. Comparaison entre les MCP organiques et inorganiques

Une comparaison entre les MCP organiques et inorganiques est résumée dans le tableau I.1. Chaque type a ses avantages qui représentent une solution efficace et ses inconvénients qui limitent ses performances.

Tab. I.1. Résumé de la comparaison entre les MCP organiques et inorganiques.

Inorganique	Organique
<ul style="list-style-type: none"> • Coût modéré • Capacité de stockage de chaleur supérieure par unité de volume • Tendance à la surfusion et à la fusion non congruente, pouvant conduire à la ségrégation • Haute densité de stockage volumétrique • Conductivité thermique relativement élevée 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût élevé • Capacité de stockage de chaleur inférieure par unité de volume • Bonne stabilité physique et chimique • Bon comportement thermique • Zone de transition réglable

I.3. Phénomènes physiques lors du changement de phase

En étudiant la fusion et la solidification, le changement de phase pose un problème complexe, dû à la présence de plusieurs phases, créant une frontière entre elles, variable dans le temps et dans l'espace. Si l'objectif est de faciliter la conception et l'utilisation des systèmes MCP, les utilisateurs perfectionnent des outils qui, malgré la complexité du processus, peuvent prédire de manière acceptable le comportement et les performances sans passer par des méthodes fastidieuses. Pour y parvenir, une compréhension profonde des phénomènes est indispensable afin de pouvoir les simplifier sans affecter leur effet sur le changement de phase [6].

Selon **Regin** [7], l'analyse du transfert de chaleur du problème de changement de phase est beaucoup plus compliquée que les problèmes monophasés en raison de:

- La non-linéarité du problème résultant du mouvement de l'interface solide-liquide lors du changement de phase.
- Connaissance insuffisante du processus de transfert de chaleur à l'interface solide-liquide, en raison de la convection naturelle induite par la flottabilité dans le MCP liquide.
- Incertitude de la résistance thermique de l'interface entre le conteneur et le MCP solide.
- Changement de volume avec le changement de phase (après retrait).
- La présence de vides dans le MCP solide.

Plusieurs phénomènes physiques sont inhérents au MCP lors de la fusion et de la solidification. Leurs effets sur les changements de phase et par conséquent, sur la modélisation de ses processus varient en fonction des conditions spécifiques du problème, telles que la forme épousée, le matériau de stockage, la disposition géométrique, les applications thermiques, entre autres, ce qui conduit à conserver ou à éliminer de tels phénomènes. Dans certaines circonstances, nous mentionnons ici brièvement les phénomènes les plus importants à retenir.

I.3.1. Interface mobile solide-liquide

La position de l'interface solide-liquide distingue non seulement une phase de l'autre, mais elle reflète également la quantité de MCP qui est déjà fondue ou s'est solidifiée à un moment donné. Cette mesure est d'une grande importance car elle peut révéler la quantité de chaleur stockée ou évacuée du MCP. C'est probablement la caractéristique la plus importante à déterminer lors du changement de phase, nécessitant une prévision de ce paramètre aussi précise que possible.

I.3.2. Changement de densité lors du changement de phase

Au cours du changement de phase, nous pouvons identifier deux types de changements de densité dans le matériau,

1. En raison du changement de température dans une phase, car la densité dépend de la température.
2. En raison de la différence de densité entre le solide et le liquide à la température de fusion.

Lors de la fusion, le MCP occupe plus de volume, ce qui augmente la pression sur le récipient, tandis que pour la solidification, lorsque le retrait se produit, le MCP occupe moins de volume, sous-pressurant le récipient. Ce dernier implique la formation de vides (bulles ou espaces à partir de la vapeur du matériau et d'autres gaz) au sein du MCP. Ces vides sont plus susceptibles de se former entre le MCP et le stockeur puisque les forces d'adhérence les plus faibles sont exercées entre eux.

I.3.3. Effet de flottabilité dans la région de fusion

La différence de température non seulement entraîne une modification de la densité du MCP, mais elle induit également des écoulements dans le MCP liquide en raison de la présence de la gravité, ce qui favorise la convection naturelle. Ces interactions d'écoulement avec le solide restant créent des modèles de fusion 2D [6]. Ces modèles sont liés à la quantité de MCP restant dans le processus à un instant donné par conséquent, il devrait être abordé lors de l'étude du changement de phase. Le rôle de la convection naturelle dans la solidification est beaucoup moins important et peut être écarté.

I.3.4. Changement de phase sur une large plage de température

Les substances pures offrent une température de changement de phase nette et bien définie, ce qui est souhaitable pour la plupart des applications thermiques, car la température de fonctionnement peut être bien prédite. Cependant, ces matériaux présentent un coût élevé, ce qui en fait des solutions peu pratiques en tant que matériau de stockage. Néanmoins, il existe des MCP commerciaux présentant des

plages de température attractives. Dans les deux cas, ce paramètre doit être pris en compte lors de la conception et de la modélisation des systèmes MCP.

I.3.5. Hystérésis d'enthalpie

Certains MCP peuvent présenter des effets de sous-refroidissement ou de surchauffe lors du changement de phase, ce changement ne se produit pas à la température souhaitée.

I.4. Structures d'échange thermique

I.4.1. Choisir une structure adaptée

Certains critères optimaux doivent être respectés pour la réalisation d'une bonne structure d'échange. Pour cela, deux aspects doivent être pris en compte : la géométrie de la structure interne et la nature du matériau [8].

Du point de vue géométrique, la structure doit avoir une porosité maximale pour garantir la meilleure densité énergétique possible par unité de volume. Ensuite, sa géométrie et sa nature doivent permettre un transfert thermique suffisant pour la viabilité du système de stockage. Ce transfert thermique s'effectuera par conductivité ou par diffusivité thermique à travers la structure puis à travers le MCP, mais aussi par convection naturelle du MCP en phase liquide si la géométrie de la structure le permet. Enfin, pour ce qui est uniquement relatif à la nature du matériau, la structure ne doit pas réagir avec le MCP (réaction chimique, infiltration, dégradation...) et ne doit pas être utilisée dans des gammes proches de ses températures de changement d'état.

Pour sélectionner les matériaux qui seront les plus adaptés, il est intéressant de regarder la conductivité thermique de ces derniers, représentée en fonction du produit de leur masse volumique et de leur chaleur spécifique (Fig. I.3). Dans ce type d'application, la conductivité thermique de la structure doit être élevée pour garantir un bon transfert de chaleur à travers toute la structure jusqu'au MCP. En ce sens, seuls les matériaux ayant une conductivité plus de 20 fois supérieure à la

paraffine ont été retenus. De plus, la masse volumique doit être faible pour garantir un poids total raisonnable (plus ou moins intéressant selon l'application finale). Enfin, la chaleur spécifique doit également être faible pour garantir une rétention de chaleur interne à la structure peu élevée et ainsi transférer au maximum la chaleur reçue vers la paraffine.

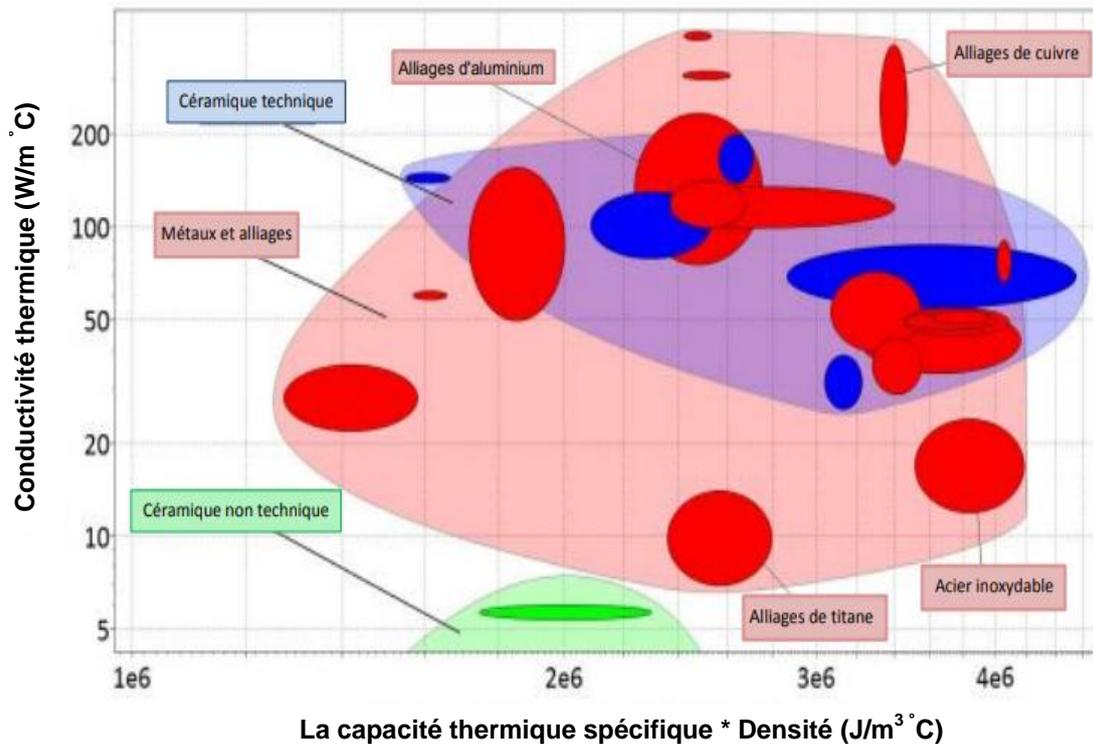


Fig. I.3. Présentation graphique de la conductivité thermique en fonction de la chaleur spécifique et de la masse volumique pour différentes familles de matériaux [8].

D'après la Fig. I.3 les familles de matériaux les plus prometteuses sont les métaux et alliages, ainsi que les céramiques techniques. En plus des critères de sélection spécifiques de ces structures, il faut également tenir compte des critères plus généraux tels que la facilité d'élaboration, le coût, ou la disponibilité.

I.4.2. Structures possibles

a. Structures simples

Les structures d'échange de chaleur sont souvent choisies selon le type d'échange. Ce dernier peut être gaz/gaz, gaz/liquide, liquide/liquide, liquide/solide, ou gaz/solide (plus rarement solide/solide).

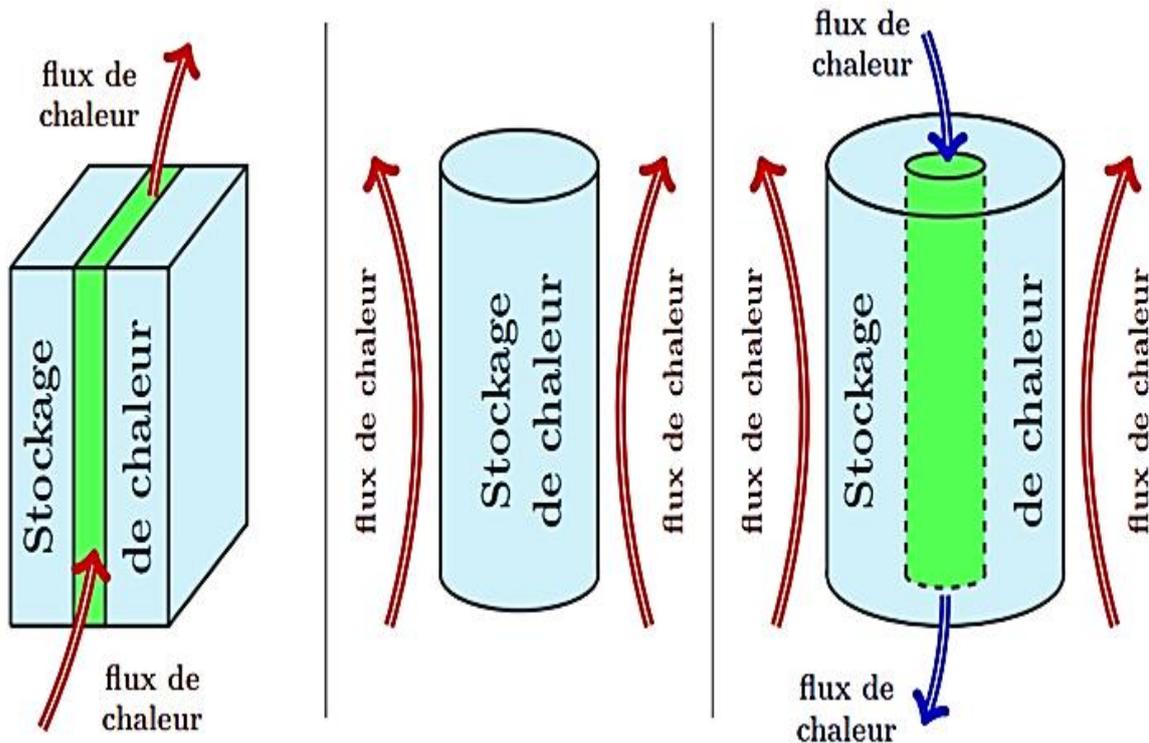


Fig. I.4. Schéma illustrant les échanges thermiques dans des cylindres en simple flux à gauche, et en double flux à droite [8].

Parmi les structures les plus courantes, il y a tout d'abord les structures cylindriques simples et double flux comme illustré sur la Fig. I.4. Dans le premier cas, la chaleur est stockée dans de petits cylindres agencés entre lesquels circule un fluide caloporteur (air, eau...). Dans le second cas, la chaleur est stockée dans un cylindre plus large au centre duquel se trouve un cylindre plus petit. Ce dernier servira à faire passer un second fluide caloporteur qui permettra un stockage plus rapide et/ou une restitution plus facile. Pour la structure plane représentée sur la Fig. I.4, la chaleur est stockée dans des plaques superposées entre lesquelles circule le

fluide caloporteur permettant d'amener ou de récupérer la chaleur. L'élaboration, la mise en place et l'entretien de ces trois structures constituent un grand avantage.

La structure à ailettes (Fig. I.5) est la plus répandue, notamment pour ce qui est de la dissipation de chaleur (moteur thermique, circuit électrique, compresseur...). Hors ces avantages évidents d'élaboration pour un ordre de grandeurs allant du millimètre au décimètre et de manutention, elle peut facilement s'adapter à des espaces restreints et à des surfaces multiples (plan, cylindre...). Aussi, les structures à ailettes peuvent plus ou moins favoriser (selon l'orientation) le transfert thermique par échanges convectifs (naturels et forcés).

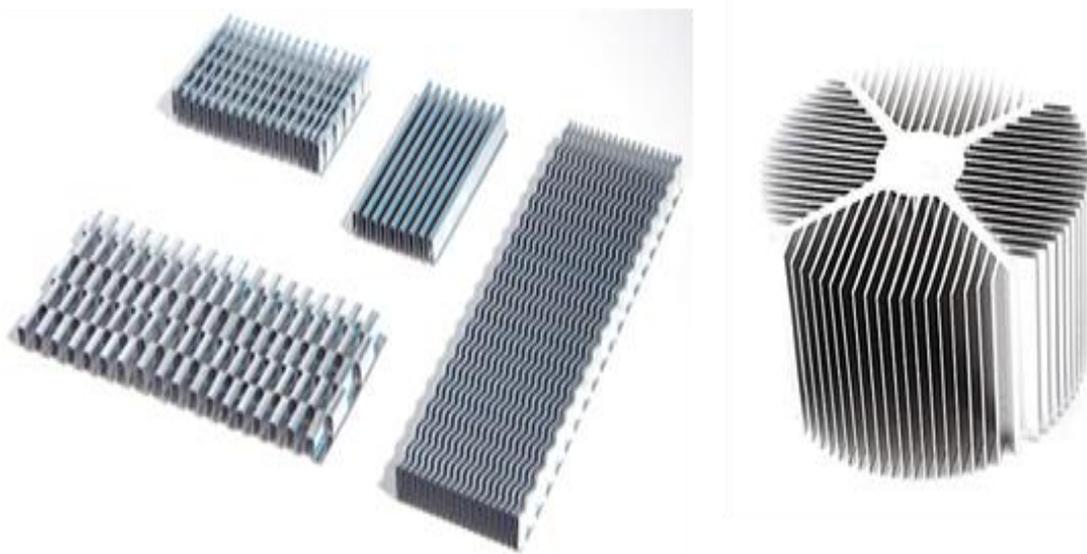


Fig. I.5. Présentation des structures à ailettes dans des surfaces multiples planes à gauche, cylindrique à droite [9].

La structure filaire (trié soudé) est voisine de celle à ailette. Cependant, elle est plus complexe à mettre en œuvre (structure aléatoire ou ordonnée) et ne favorise pas autant la convection. Néanmoins, elle présente une plus grande surface spécifique à même densité et favorise ainsi la conduction thermique entre la structure et le MCP.

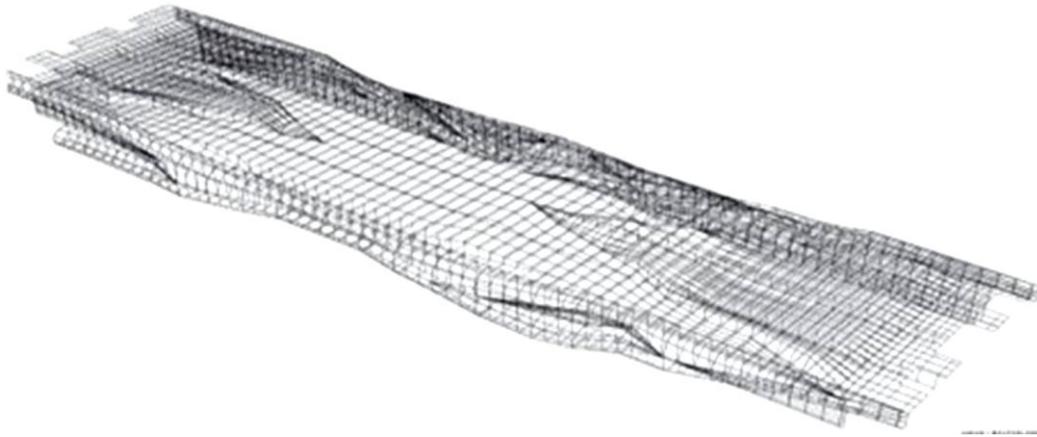


Fig. I.6. Structure filaire [9].

Enfin, la structure en nid d'abeille (Fig. I.7) est aussi assez répandue mais plus connue pour ses qualités mécaniques. Cependant, cette structure peut s'adapter de façon efficace au stockage de chaleur du fait de sa géométrie répétitive qui lui donne une surface spécifique importante tout en limitant la distance moyenne entre le contenu (MCP) et les parois du contenant (structure en nid d'abeille).

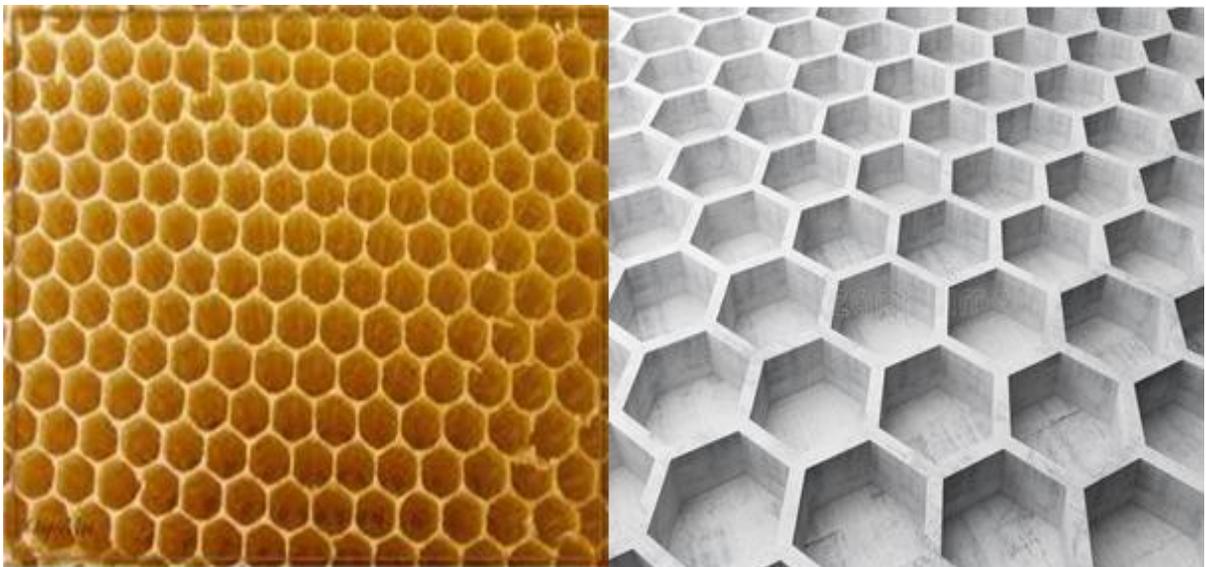


Fig. I.7. Présentation de la structure en nid d'abeille [9].

b. Structures complexes

Au-delà des structures simples précédentes, de nombreuses études récentes ont porté sur de nouvelles structures plus adaptables et potentiellement plus efficaces. Les matériaux poreux, par exemple, sont beaucoup étudiés. Ainsi, **J. Jiang et al. [10]** ont mené des recherches sur l'infiltration de MCP dans des structures poreuses en aluminium illustrées sur la Fig. I.8. Leurs avantages notables se basent sur une grande diffusivité thermique et une élaboration relativement facile. Cependant, elles présentent généralement des porosités peu élevées et donc un stockage de chaleur volumique (et massique) peu compétitif.

Une solution proche des matériaux poreux est la structure mousse qui possède des porosités plus importantes. Elle peut être ouverte (permettant d'avoir une seule et unique zone pour le contenant), fermée (le contenant est alors isolé dans de multiples porosités fermées), ou mixte. Au contraire d'une structure poreuse, les mousses peuvent atteindre des porosités très élevées tout en garantissant une bonne diffusivité thermique interne. Les mousses ouvertes peuvent, en plus, favoriser le transfert de chaleur par convection du fait de leur ouverture totale.



Fig. I.8. Illustration de trois échantillons de mousse en aluminium. (A) mousse seule, (B) mousse imprégnée de paraffine et (C) mousse imprégnée d'acide stéarique (MCP) [10].

Chacune de ces structures présentent des avantages et des inconvénients. La difficulté réside dans le choix de/ou des structures à plus fort potentiel et/ou les plus adaptées pour un cas donné. Le choix de leur matériau de conception et l'optimisation de leur géométrie représentent ainsi les clés pour trouver la structure optimale à chaque cas d'étude.

I.5. Applications MCP

Les points ci-dessous répertorient certaines des différentes applications trouvées dans la littérature. Ces applications peuvent être divisées en deux groupes principaux: la protection thermique ou l'inertie et le stockage. Une différence entre ces deux domaines d'application importants concerne la conductivité thermique de la substance. Dans certains cas de protection thermique, il convient d'avoir des valeurs de conductivité faibles, alors que dans les systèmes de stockage, ces valeurs faibles peuvent poser un sérieux problème car il peut y avoir une quantité d'énergie stockée suffisante, mais une capacité insuffisante pour l'éliminer suffisamment rapidement [7].

1. Stockage thermique de l'énergie solaire : Centrales solaires
2. Stockage passif dans un bâtiment bioclimatique / architecture
3. Protection thermique des aliments: transports, hôtellerie, glaces, etc.
4. Protection thermique des appareils électroniques (intégrée à l'appareil)
5. Applications médicales: transport de sang, tables d'opération, thérapies à chaud et à froid
6. Confort thermique dans les véhicules : refroidissement des moteurs (électriques et à combustion).



Chapitre II

Revue bibliographique



II.1. Introduction

Beaucoup de problèmes surviennent dans lesquels le transfert de chaleur est accompagné par un changement de phase et où l'énergie thermique est absorbée ou libérée. Les exemples les plus remarquables sont les processus de fusion et de solidification dans lesquels une interface mobile sépare deux régions de propriétés thermophysiques différentes, à savoir les phases solide et liquide.

Les études effectuées dans le domaine de la fusion d'un matériau à changement de phase peuvent être classées en trois axes de recherche : travaux expérimentaux, numériques et analytiques. La littérature révèle que la plupart des travaux réalisés sur les problèmes de changement de phase solide-liquide (expérimentaux ou numériques) étudie la fusion et la solidification de la paraffine comme MCP, qui possède une température de fusion peu élevée.

Plusieurs travaux ont été entamés dans ce contexte où **Stefan** en **1889** est le premier à étudier les problèmes de changement de phase. Vus leurs intérêts industriels et leurs applications, plusieurs chercheurs se sont intéressés par la suite à l'étude de ce phénomène.

II.2. Travaux antérieurs

Hale et Viskanta [11] ont étudié expérimentalement et analytiquement le transfert thermique associé au changement de phase solide-liquide dans différents matériaux susceptibles qui sont utilisés dans le stockage de l'énergie thermique afin de déterminer le mouvement de l'interface solide-liquide pendant la fusion et la solidification dans une cellule rectangulaire. Ils ont constaté que la convection naturelle dans le liquide doit être considérée dans la prévision du mouvement de la frontière pour les situations instables qui apparaissent pendant la fusion à partir du bas et la solidification à partir du haut.

Webb et Viskanta [12] ont étudié expérimentalement le transfert thermique lors de la fusion dans une enceinte rectangulaire inclinée. L'effet de l'inclinaison est d'établir un mouvement tridimensionnel de convection naturelle qui s'intensifie lorsque l'angle d'inclinaison à partir de la verticale augmente. La tridimensionnalité

du champ d'écoulement provoque une fusion non uniforme du solide. La morphologie de l'interface est utilisée pour inférer la structure de l'écoulement et le transfert tridimensionnel d'énergie. Les configurations d'écoulement dépendent de l'angle d'inclinaison et du sous-refroidissement initial du solide. Ils ont pu trouver une formule pour décrire l'effet de l'inclinaison et de la fraction liquide en fonction du temps.

Dans une approche analytique, **Hamdan et Elwerr [13]** ont étudié le processus de la fusion bidimensionnel d'un matériau à changement de phase. Le matériau est enfermé dans une enceinte rectangulaire chauffée d'un seul côté, tandis que tous les autres côtés sont supposés adiabatiques. Le mode convectif est considéré être le mode dominant lors du processus de transfert de chaleur à l'intérieur de la zone de fusion, sauf dans la région très proche de la surface solide au fond, où le mode de conduction était uniquement pris en compte. Ils ont constaté que cette analyse a été utilisée pour prédire la fraction fondue du matériau à changement de phase et donc la quantité d'énergie stockée.

Binet [14] a étudié numériquement la fusion régie par la convection naturelle d'un matériau à changement de phase dans une enceinte rectangulaire chauffée à l'aide de sources de chaleur discrètes réparties le long des parois latérales conductrices. Un modèle numérique reposant sur les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie est exposé. Une méthode de volume de contrôle couplée à une formulation enthalpique pour le changement de phase est adoptée. Aussi, l'effet de la dimension, de l'espacement, de la puissance et du nombre de sources de chaleur sur le phénomène de fusion sont examinés. Les résultats montrent qu'il est avantageux d'utiliser un chauffage discret plutôt qu'uniforme du point de vue de la durée de la fusion et de la température des sources de chaleur.

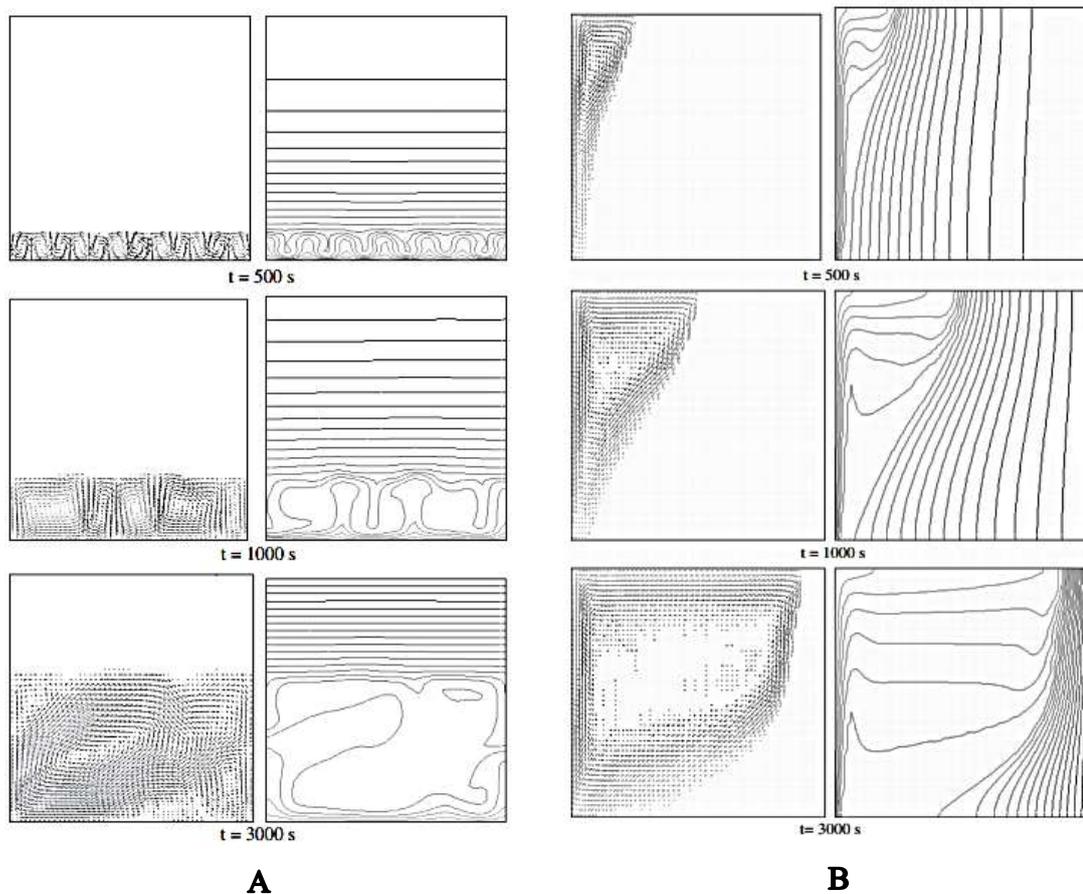
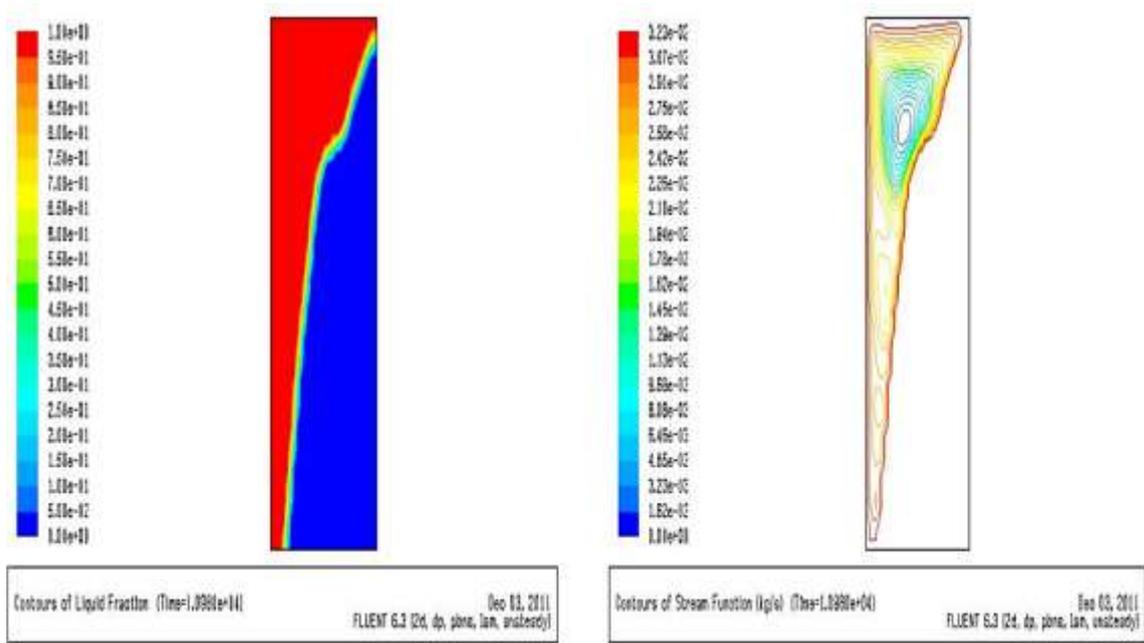


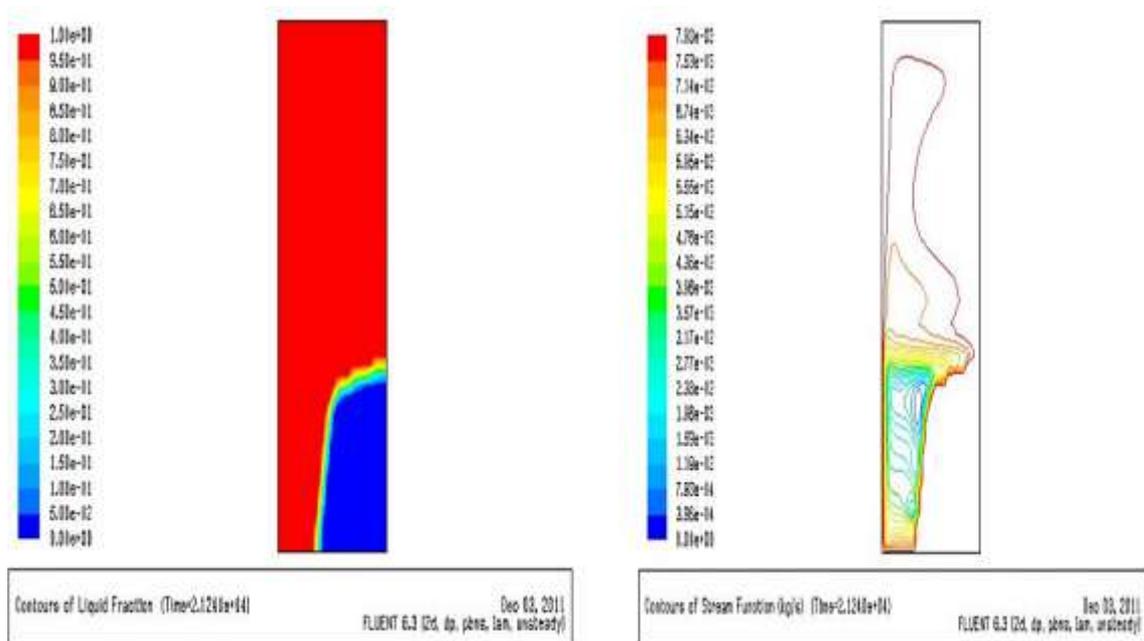
Fig. II.1. Distribution de flux (à gauche) et les isothermes (à droite) dans la zone de fusion de la cire de paraffine avec l'aluminium [15].

Arasu et Mujumdar [15] ont présenté une étude numérique de la fusion d'un nano MCP (cire de paraffine avec alumine) dans une enceinte carrée de dimensions (25 mm × 25 mm) chauffée (A) par bas et (B) par la gauche à l'aide de formulation enthalpie-porosité. À partir des observations marquées dans cette étude, ils ont constaté que la forme de l'interface dépend de l'épaisseur de la couche de liquide au cours de la fusion, des modèles d'écoulement multicellulaires dans le chauffage de la paroi inférieure horizontale et il n'y a qu'un seul modèle d'écoulement de cellules dans le chauffage mural vertical. Le taux décroît avec l'augmentation de la composition volumétrique de l'alumine (Al_2O_3) pour les systèmes de chauffage à paroi horizontale et verticale. De plus, le taux de fusion et l'énergie emmagasinée sont plus importants pour le chauffage mural vertical que pour le chauffage mural

horizontal dans une enceinte carrée pour améliorer l'effet de la convection naturelle (Fig. II.1).



t= 3h30min



t= 5h54min

Fig. II.2. Contours de l'interface solide-liquide et lignes de courant pour un chauffage par le côté gauche pour t= 3h30 min et 5h54min [16].

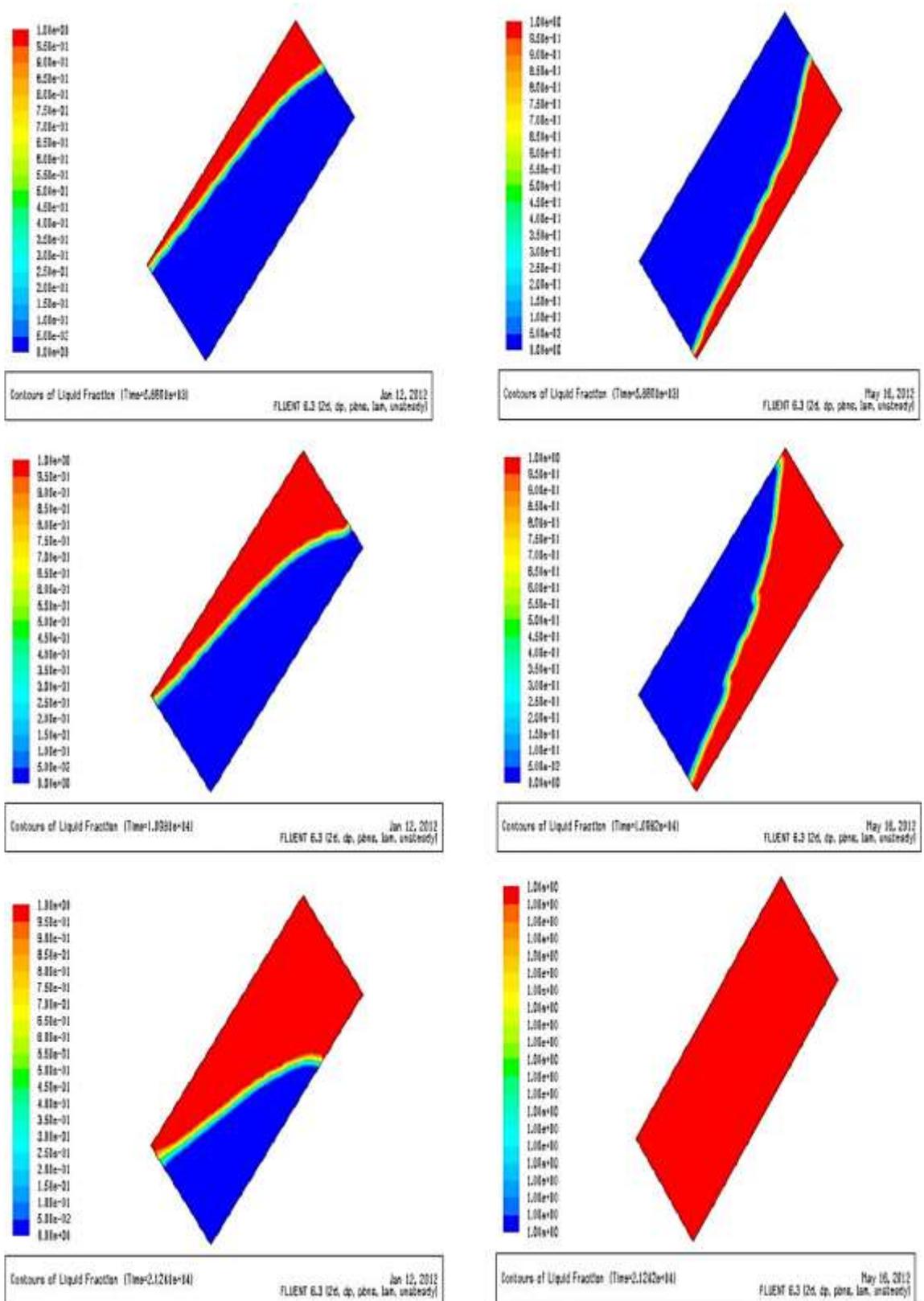


Fig. II.3. Contours de l'interface solide-liquide dans une cavité inclinée pour $t=1h38min, 3h3min$ et $5h54min$ [16].

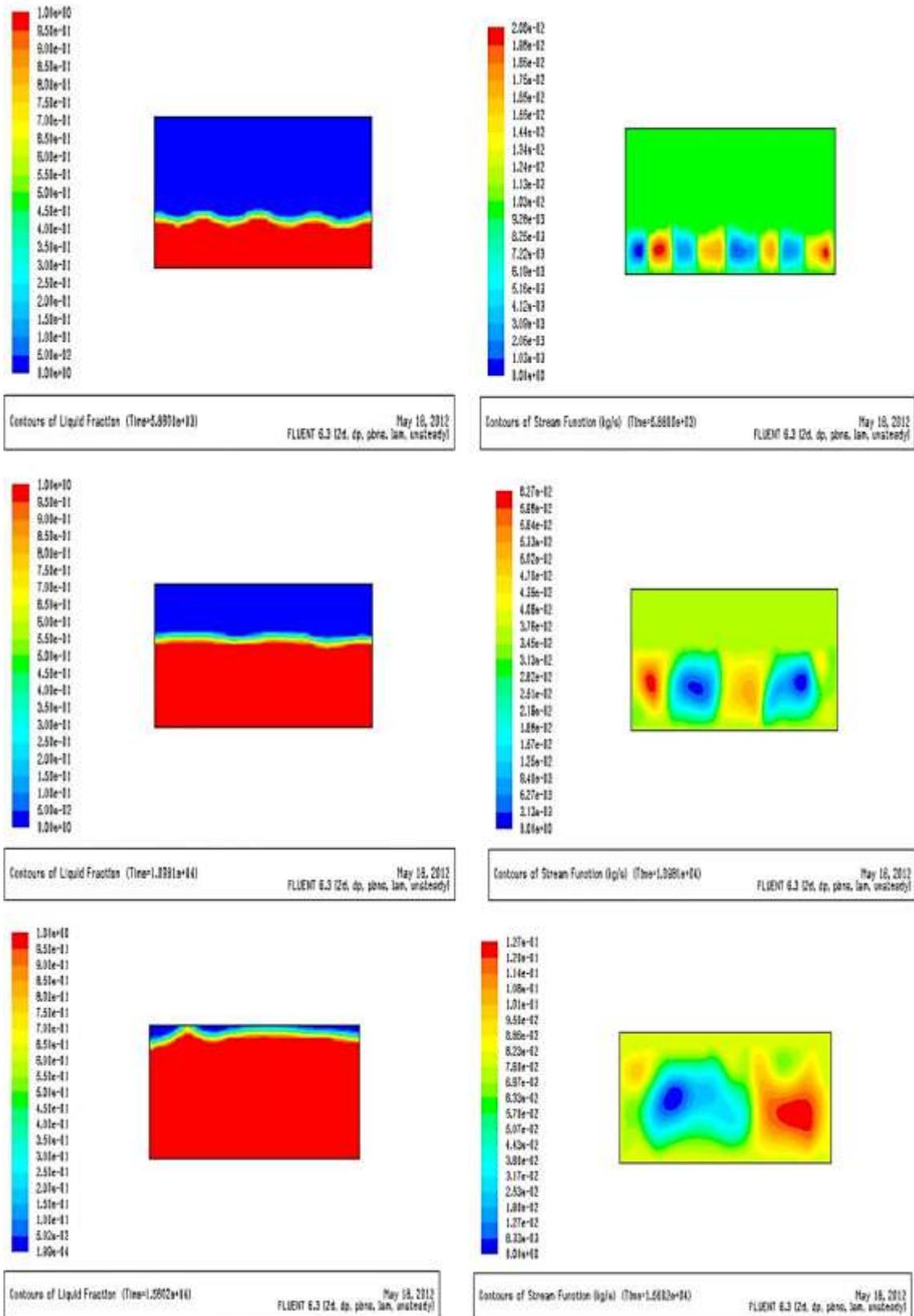


Fig. II.4. Contours de l'interface solide-liquide et lignes de courant pour un chauffage par le bas pour $t=1h38min$, $3h3min$ et $4h20min$ [16].

Serradj [16] a fait une étude numérique bidimensionnelle du processus de la fusion d'un matériau à changement de phase placé à l'intérieur d'une enceinte rectangulaire, dont toutes les faces sont isolées thermiquement à l'exception de la face verticale avant qui est chauffée de manière isotherme. Il a considéré que la conduction est le mode de transfert de chaleur qui régit le processus au début de la fusion, suivie par une courte période de transition avant que la convection naturelle devient le mode de transfert de chaleur dominant dans la phase liquide. Les résultats obtenus concernant la position, l'inclinaison et la propagation de l'interface solide-liquide ainsi que la fraction fondue sont comparés et trouvés en bon accord avec les résultats expérimentaux et numériques existants.

Korti et Tlemsani [17] ont étudié expérimentalement le processus de la charge et de la décharge des matériaux à changement de phase dans une unité pour stocker l'énergie calorifique par chaleur latente. L'étude a été faite avec trois différents types de paraffines en tant que matériau à changement de phase (MCP) et l'eau est utilisée en tant que fluide caloporteur (HTF). Ils ont traité les effets de la température d'entrée HTF, du débit et du type de MCP durant les deux processus (charge et décharge). Ils ont constaté que : la température d'entrée a un effet significatif sur les performances de l'échangeur et qu'elle peut accélérer la phase de charge de 54,5% et retarder la phase de décharge de 48,5%. Le débit volumique de 15 l/h assure un meilleur processus de charge et de décharge. L'ajout d'un moteur à huile à la paraffine peut améliorer la vitesse du processus de charge et de décharge respectivement de 42,4 et de 66%, ce qui réduit considérablement la chaleur latente du MCP.

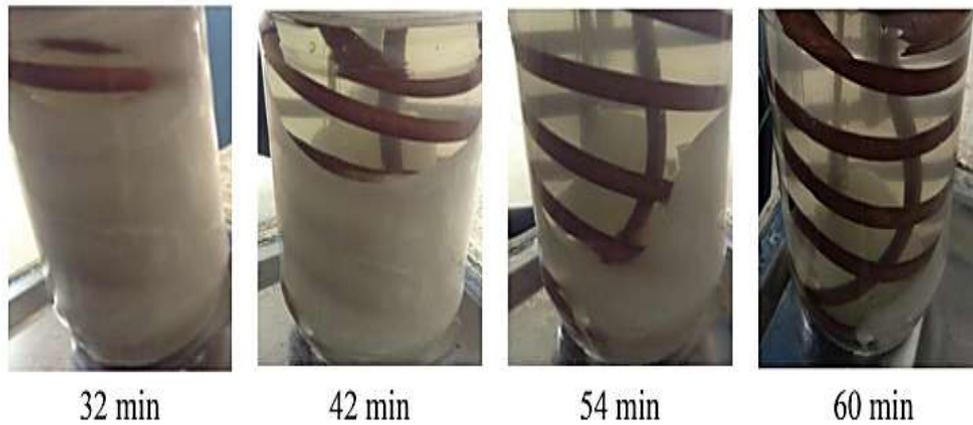


Fig. II.5. Evolution de la fusion du MCP pendant le processus de charge pour un débit volumique de 25 l/h [17].

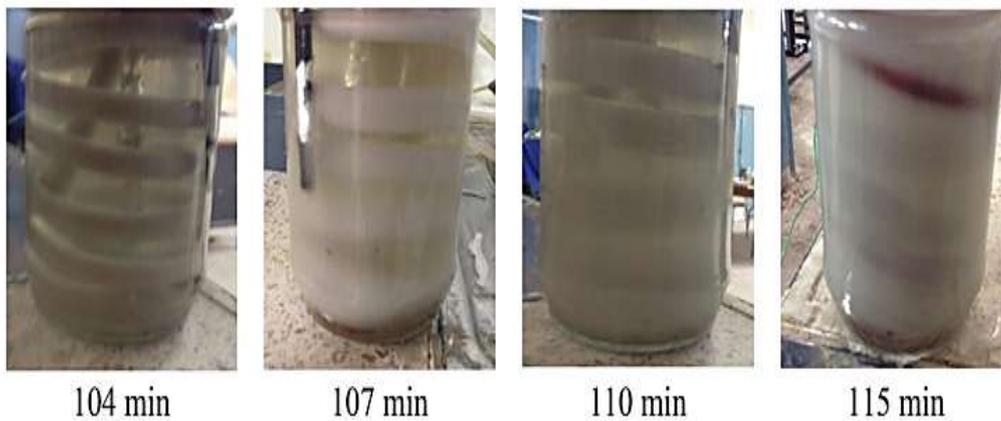


Fig. II.6. Evolution de la solidification du MCP au cours du processus de décharge pour un débit volumique de 25 l/h [17].

Senthil et Cheralathan [18] ont fait une étude numérique en utilisant l'approche enthalpie-porosité pour traiter le comportement thermique du MCP dans une cavité d'un quadrant à différentes inclinaisons de 0, 45, 135, 180 et 225°. Ils ont constaté que le temps de fusion de l'enceinte horizontale est inférieur de la moitié que celle de l'enceinte verticale. La convection naturelle s'est avérée plus faible pour 45° que pour les autres angles. En effet, la chaleur est transférée de haut en bas. L'inclinaison à 225° prenait le temps le plus court pour une fusion complète. Par conséquent, l'orientation de système peut modifier les taux de fusion. La convection naturelle dans le MCP liquide dépend fortement de l'emplacement de la source chaude. La fraction liquide pour une orientation horizontale est supérieure à celle de l'orientation verticale.

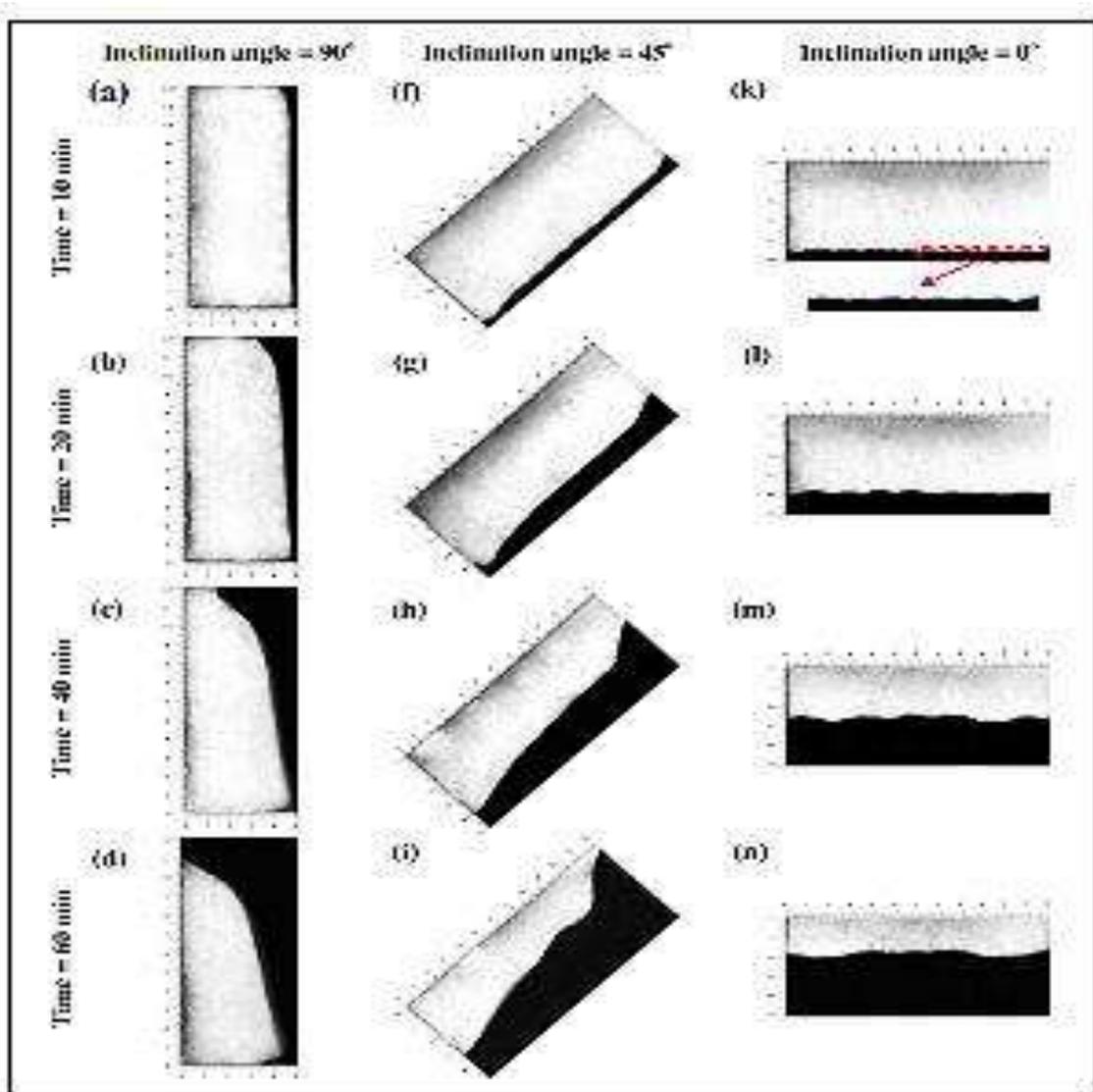


Fig. II.7. Procédé de fusion de MCP pour différents angles d'inclinaison [18].

Zarrit et al. [19] ont fait une étude numérique sur le transfert de chaleur par convection naturelle instationnaire et laminaire dans une enceinte fermée, inclinée et chauffée différentiellement. Ils ont varié le nombre de Rayleigh entre 10^3 et 10^4 , le rapport de forme ($1 \leq A \leq 6$) et l'angle d'inclinaison θ comprise entre 0 et 180° . Ils ont calculé et mis en évidence l'influence de l'angle d'inclinaison et le rapport de forme sur la structure de l'écoulement et sur le transfert de chaleur. Les résultats trouvés révèlent l'existence d'un angle critique θ_{cr} dépendant du rapport de forme A et du nombre de Rayleigh Ra. Ils ont constaté que pour $\theta \approx 0^\circ$, l'écoulement est multicellulaire (rouleaux longitudinaux formant des cellules contrarotatives) et pour

$\theta > \theta_{cr}$, l'écoulement est monocellulaire. Dans le cas où $\theta \approx 180^\circ$, le fluide stagne et une stratification thermique est bien claire.

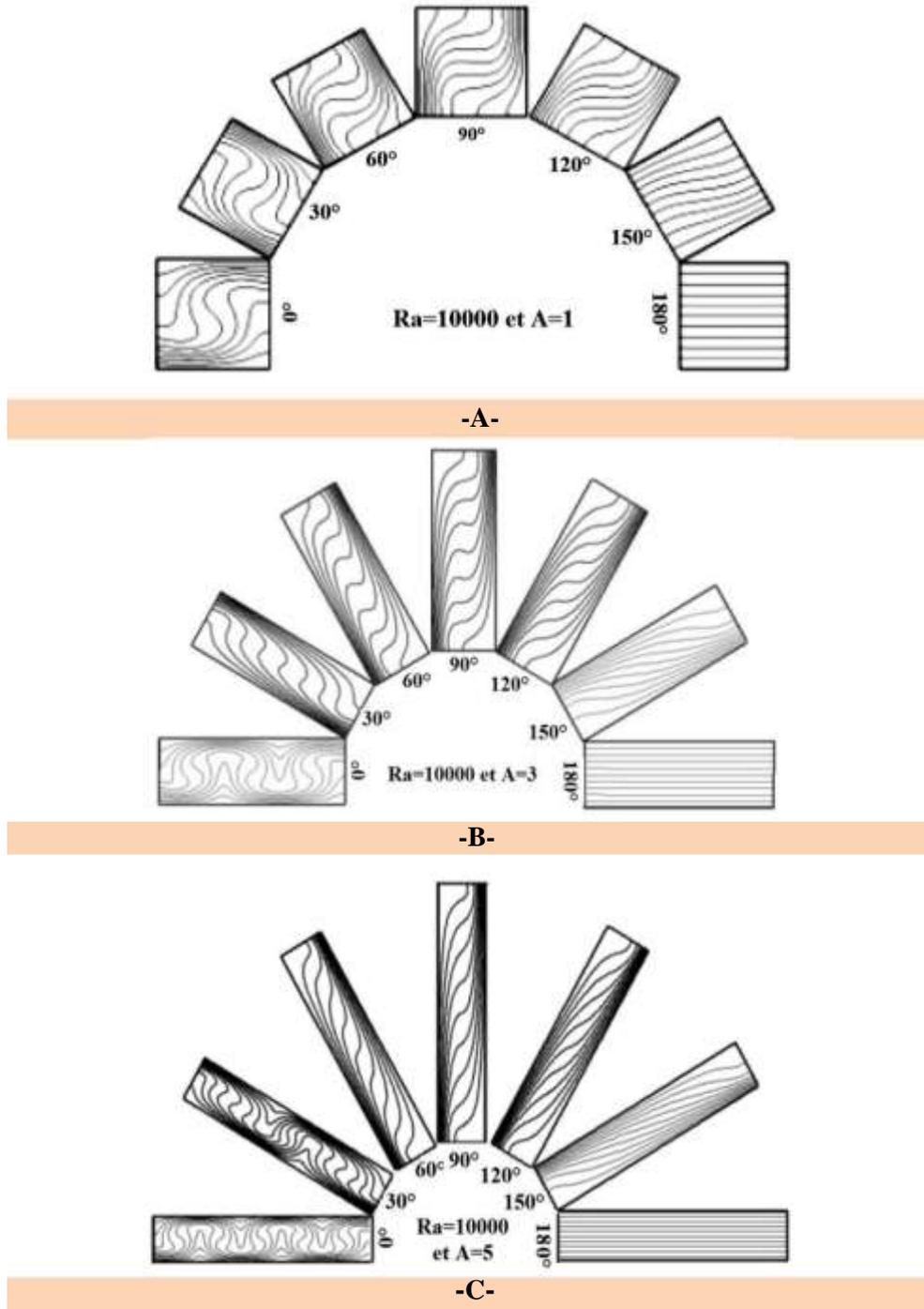
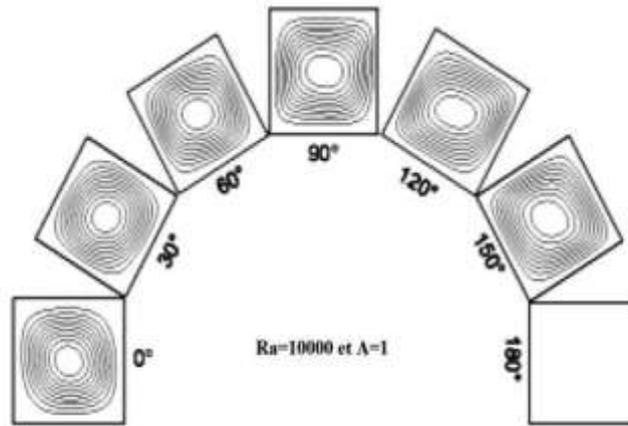
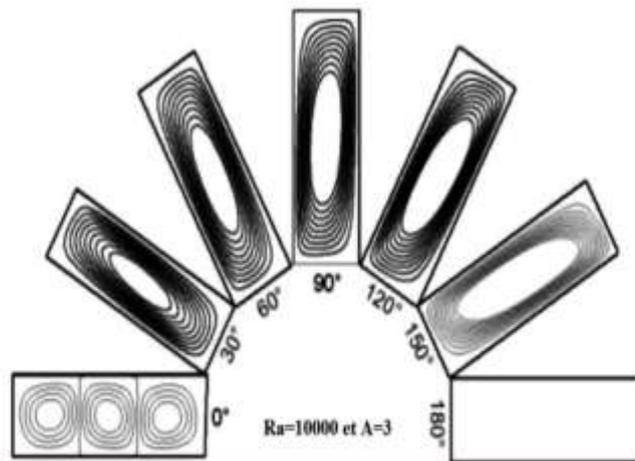


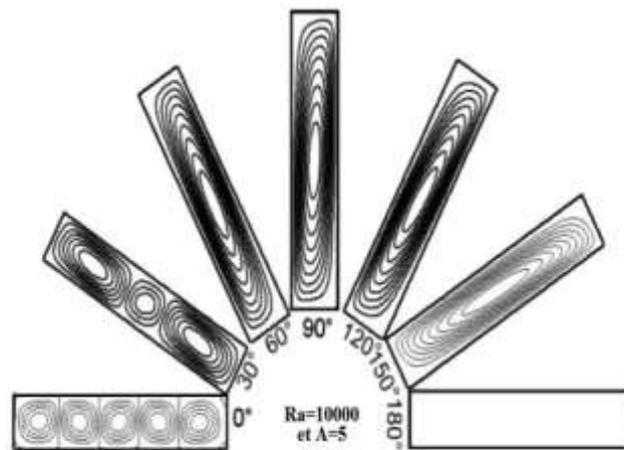
Fig. II.8. Isothermes pour plusieurs angles d'inclinaison $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$, pour plusieurs rapports de forme ($1 \leq A \leq 5$) et pour $Ra = 10^4$ [19].



-A-



-B-



-C-

Fig. II.9. Lignes de courant pour plusieurs angles d'inclinaison $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$, pour plusieurs rapports de forme ($1 \leq A \leq 5$) et pour $Ra = 10^4$ [19].

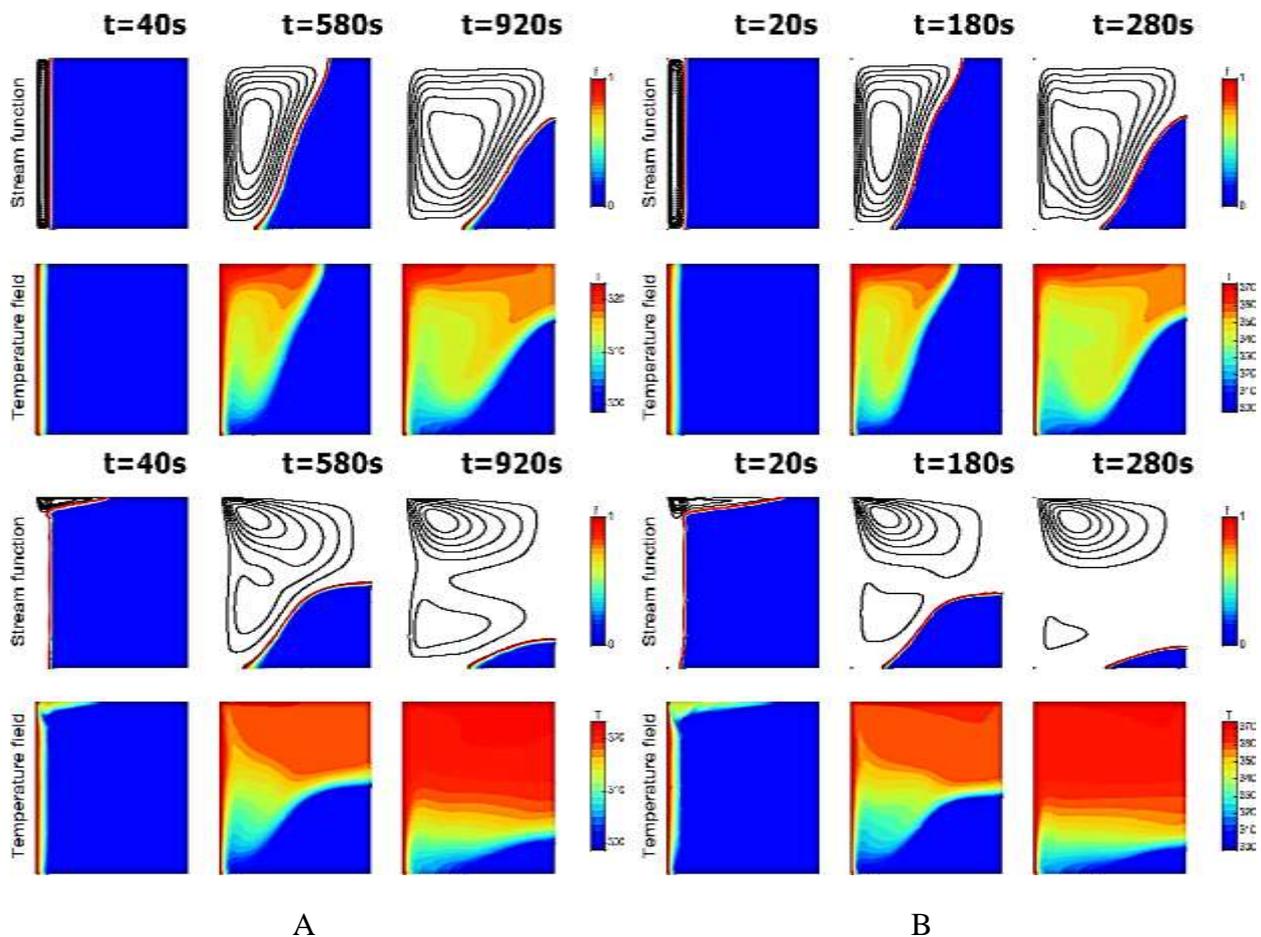


Fig. II.10. Isothermes et lignes de courant pour 1 cm de côté. (A) $T_h = 50\text{ °C}$ et (B) $T_h = 100\text{ °C}$ [20].

Madruza et **Mendoza** [20] ont simulé la dynamique de fusion du matériau à changement de phase n-octadécane sur deux géométries carrées de 1 et 2 cm soumises à un chauffage latéral. Ils ont calculé le taux global de la fraction liquide lorsque les mouvements convectifs ne sont provoqués que par la flottabilité et lorsque les flux thermo-capillaires sont inclus. Les fonctions de flux et des champs de température ont permis de suivre les évolutions dynamiques de la fusion. Ils ont constaté que l'évolution globale de l'interface solide/liquide est similaire pour les deux géométries et les températures extérieures imposées pour la flottabilité conduite par la convection. La même chose se produit lorsque la conduite thermo-capillaire est superposée. Le dernier cas produit un très rapide détachement du front solide/liquide de la surface libre supérieure. D'après les résultats, ils ont conclu que les effets thermo-capillaires ont un mécanisme très pertinent pour améliorer le taux

de transfert de chaleur sur le n-octadécane, en particulier lorsqu'il est soumis à des températures extérieures élevées.

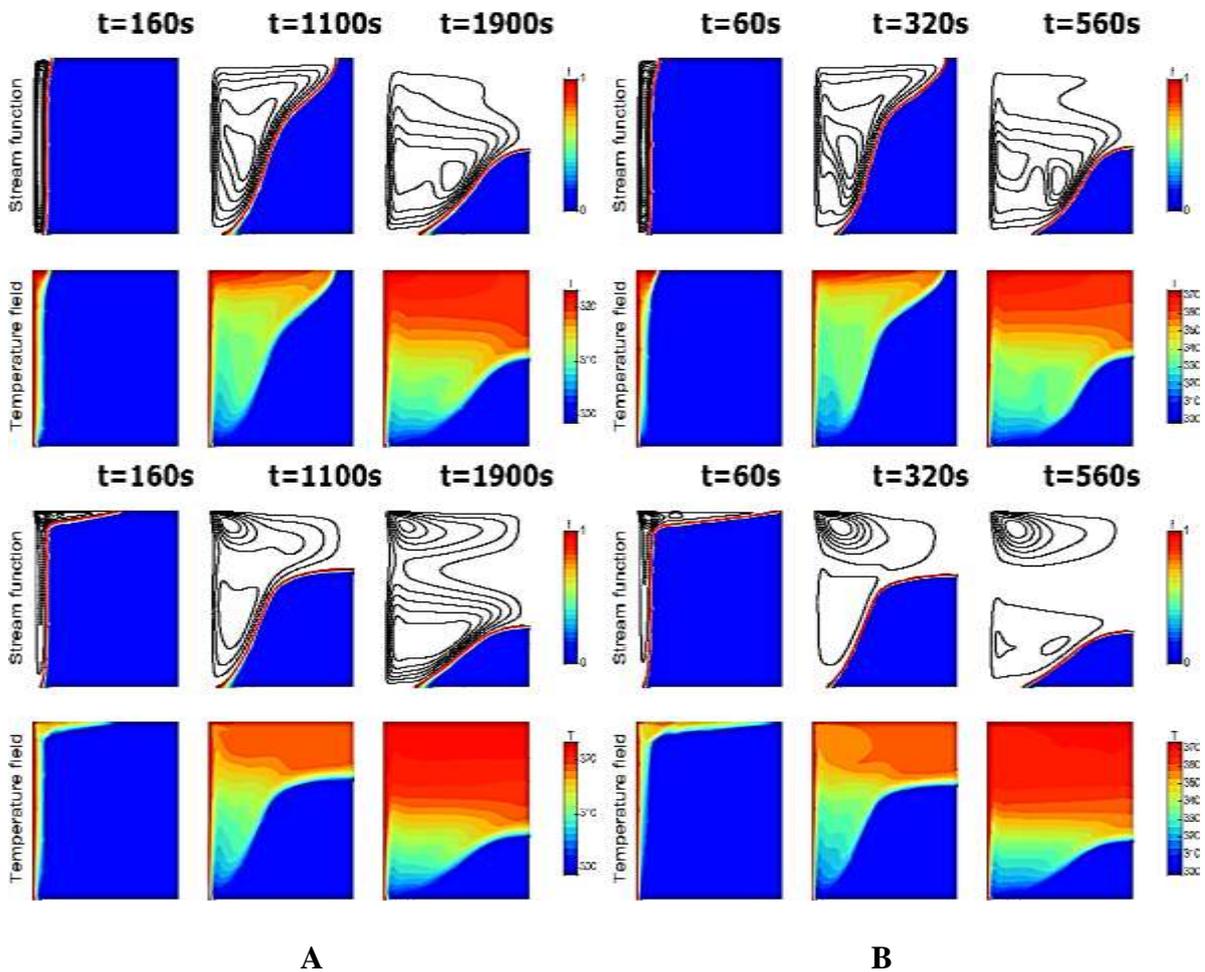


Fig. II.11. Isothermes et lignes de courant pour 2 cm de côté. (A) $T_h = 50\text{ }^\circ\text{C}$ et (B) $T_h = 100\text{ }^\circ\text{C}$ [20].

Madruaga et Curbelo [21] ont étudié numériquement le comportement dynamique lors de la fusion du n-octadécane dans une cavité chauffée par le bas à travers des longueurs variantes allant de 0,005 à 0,2 m. Ils ont identifié avec l'évolution du temps quatre régimes différents: (i) un régime conducteur, (ii) un régime linéaire, (iii) un régime transitoire (grossier) et (iv) un régime turbulent. Ils ont constaté que la conduction génère un front dont la forme est dictée par la géométrie. Le second régime conduit à une instabilité linéaire de Rayleigh Bénard qui crée un réseau de cellules convectives symétriques à rotation opposée dont les pics correspondent à la position des panaches sous forme des champignons. Le

régime transitoire induit l'élargissement et la forme de la tête qui sont responsables de créer une interface solide/liquide incurvée. Enfin, le régime turbulent conduit à une très irrégulière interface solide/liquide avec de fortes fluctuations de l'amplitude. Aussi ils ont conclu que la séparation entre les panaches est déterminée par le nombre d'ondes critique de l'instabilité primaire de Rayleigh-Bénard. En conséquence, ce nombre d'onde détermine la distance entre les pics du front de fusion.

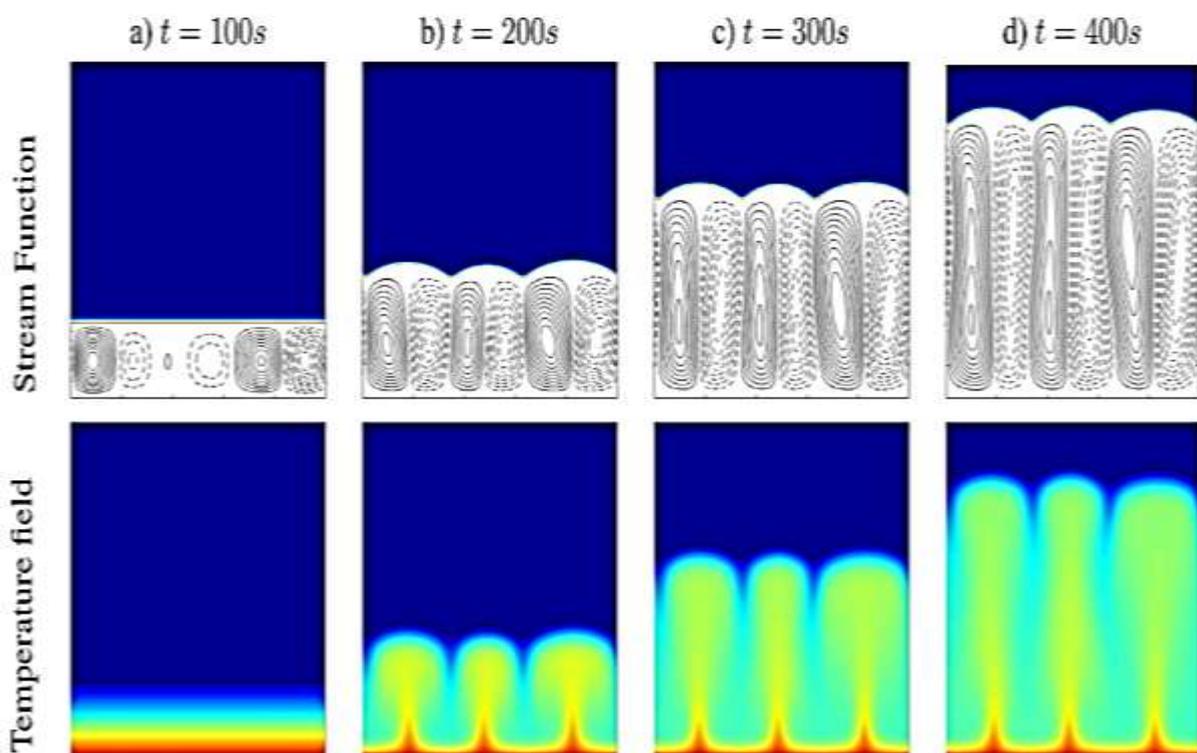


Fig. II.12. Images du régime linéaire à différents moments $t = 50; 100; 300; 400$ s pour les isothermes et les lignes de courant pour $L = 0.01$ m [21].

Madruza et al. [22] ont effectué une analyse comparative des résultats expérimentaux et des simulations numériques de fusion du matériau à changement de phase tétracosane contenu dans un cube et chauffé par le bas, tandis que tous les autres côtés sont supposés adiabatiques. Les simulations montrent des régimes distincts du processus de fusion: (i) régime conducteur, (ii) régime linéaire, (iii) régime grossier (transitoire), (iv) régime turbulent. Ils ont observé le comportement de l'interface solide/liquide durant toute l'expérience et qui est caractérisée par une forme irrégulière. Ils ont visualisé le comportement des isothermes, ainsi que le

champ de vitesses correspondant au régime turbulent. Ainsi l'observation de l'interface solide/liquide est une mesure utile pour identifier l'état global de la fusion en terme thermique (panaches) et en termes de vitesses (cellules convectives).

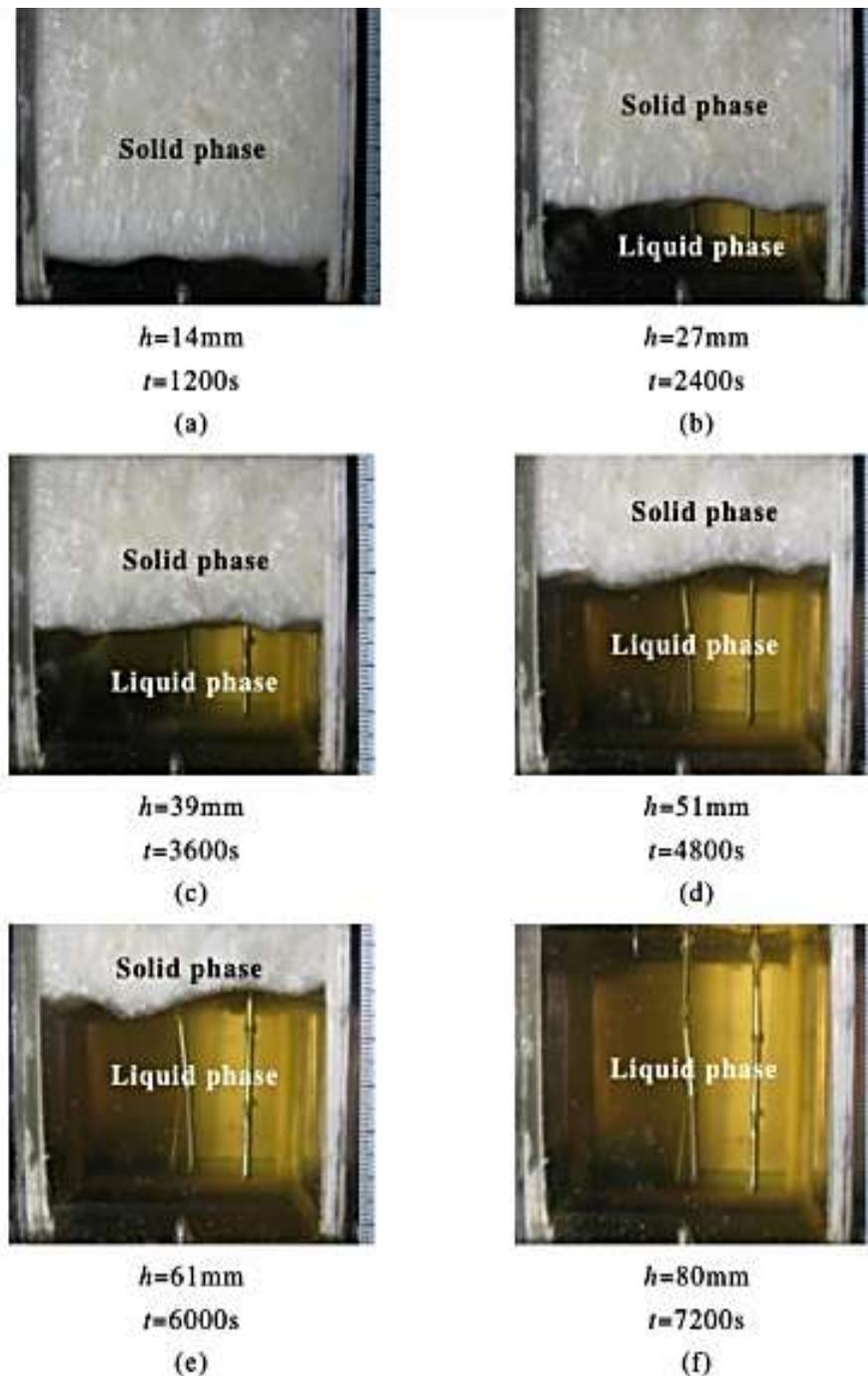


Fig. II.13. Evolution temporelle de la fusion du Tétracosane en maintenant la paroi inférieure à une température constante de $T_w = 80\text{ °C}$ [22].

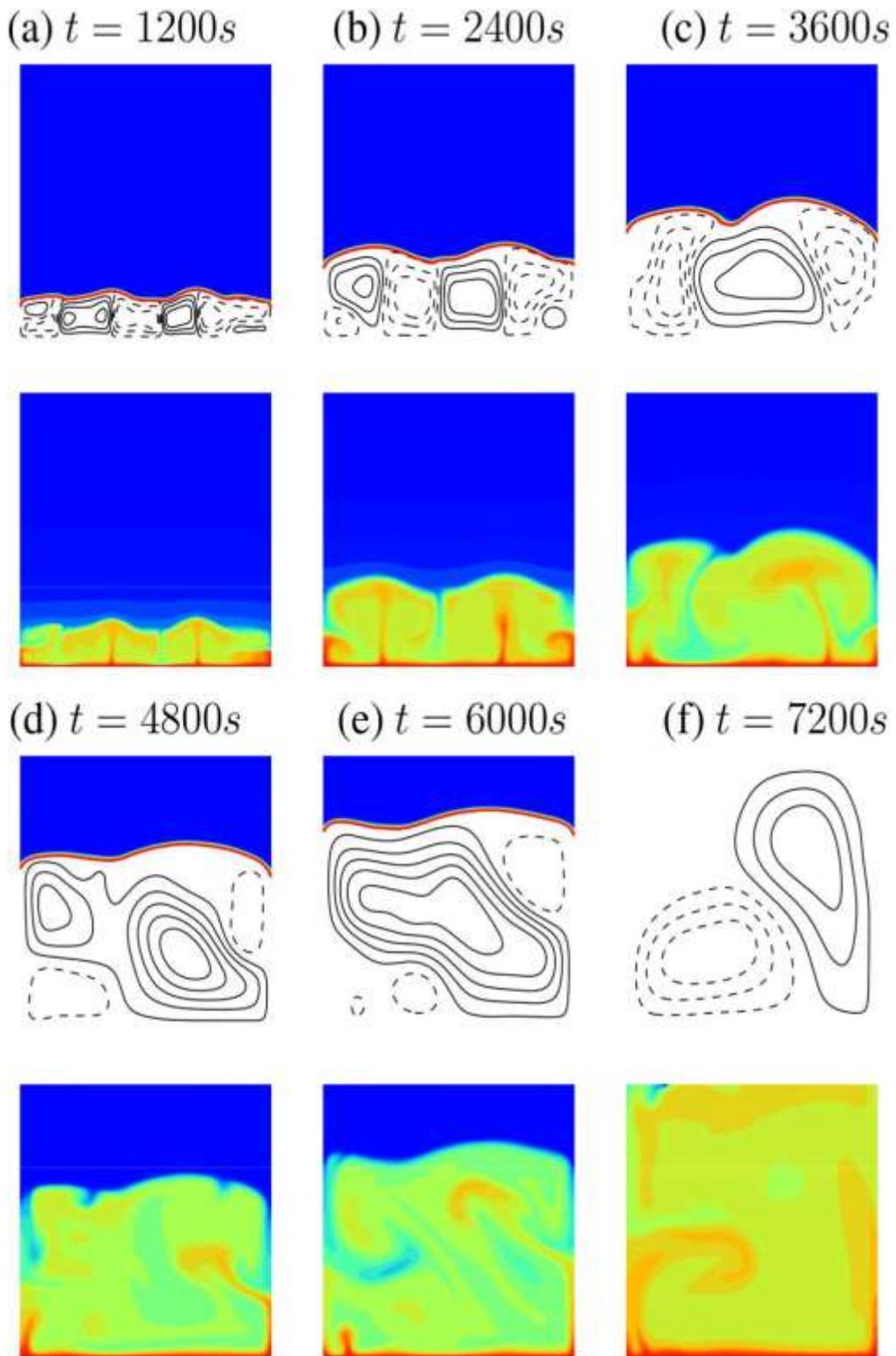


Fig. II.14. Evolution des lignes de courant durant la fusion du Tétracosane en maintenant la paroi inférieure est maintenue à une température constante de $T_w = 80\text{ °C}$ [22].

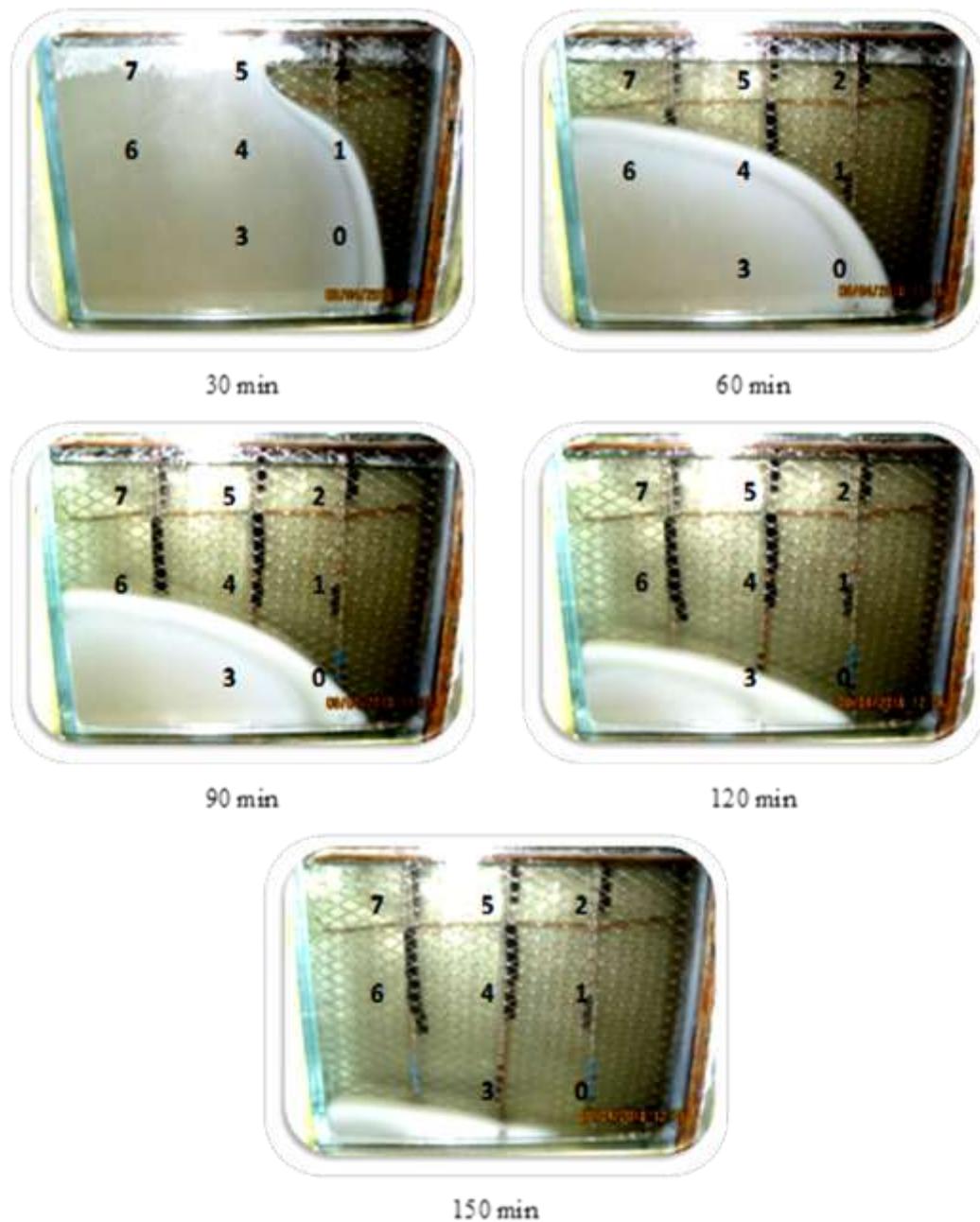


Fig. II.15. Evolution temporelle de la fusion de la paraffine avec une grille en Zamak [23].

Missoum [23] a étudié expérimentalement le processus de la fusion de la paraffine dans une cavité carrée fabriquée en verre pour permettre la visualisation de l'interface solide-liquide. L'étude a été faite au début sur la paraffine seule, puis elle a ajouté des matériaux de conductivité thermique peu élevée (Zamak et Aluminium) afin d'améliorer la conductivité thermique de la paraffine. Les

résultats montrent que le Zamak n'a pas amélioré la fusion de la paraffine par contre l'aluminium a amélioré significativement sa conductivité thermique. Elle a conclu que plus la conductivité thermique de matériaux ajoutés est importante, plus l'accélération du processus est assez importante.



Fig. II.16. Evolution temporelle de la fusion de la paraffine avec une grille en l'aluminium [23].



Chapitre III

Procédure expérimentale



III.1. Introduction

Nous discutons dans ce chapitre l'ensemble des expériences ainsi que le dispositif expérimental y compris le matériel de mesure utilisés pour étudier les phénomènes de changement de phase d'un matériau à changement de phase (MCP) dans une cavité transparente fabriquée en verre. Les expériences ont été réalisées durant les mois de février et de mars 2019 au niveau du laboratoire de recherche ETAP de l'université de Tlemcen, faculté de technologie.

III.2. Description de l'installation

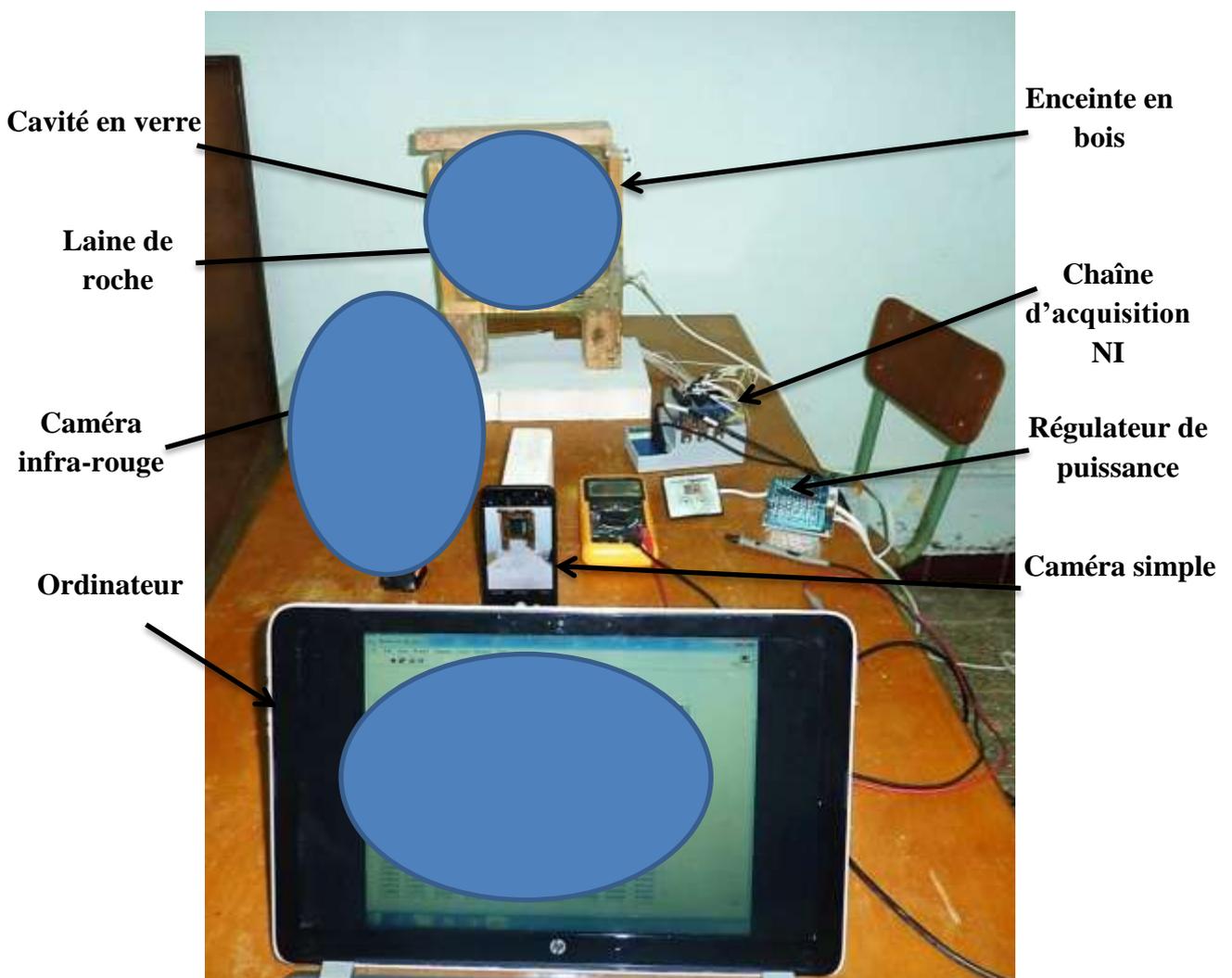


Fig. III.1. Différents matériels et accessoires de l'installation.

Le MCP (paraffine) est contenu dans une cavité thermique de forme cubique de dimensions $12 \times 12 \times 4,5$ cm pour permettre par une caméra simple et une autre placées en face. Les parties latérales sont isolées par la laine de roche, utilisée pour diminuer au maximum les pertes thermiques. Le tout (cavité et isolation) est refermé dans une enceinte en bois. Le MCP est chauffé par.....variée par un de puissance (Fig. III.2.). La face arrière de la cavité est d'une (Fig. III.3.). Les trous sont répartis sur espacés uniformément et dans lesquels sont placés (en résine et (Fig. III.7.)) des thermocouples de type K reliés directement à la de (Fig. III.10.) (National Instruments) qui, elle-même reliée à l'ordinateur (PC) par un câble USB. Une interface (Fig. III.11) est développée à l'aide du logicielpour l'acquisition numérique des températures.

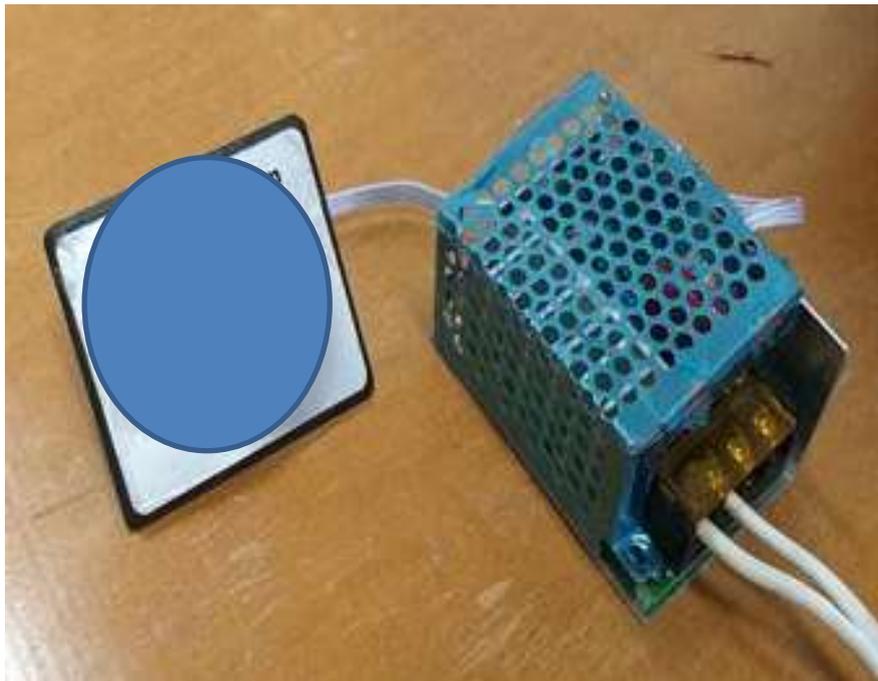


Fig. III.2. Régulateur de puissance.



a. Mèches

b. Perçage

c. Face arrière percée

Fig. III.3. Outils et méthodes de perçage.

III.3. Etalonnage, précision et sensibilité des capteurs

Il existe au laboratoire de l'université une unité de mesure de température, utilisée pour tester la précision et la sensibilité des capteurs de température (Fig. III.4.a). Or, cette unité ne peut pas être utilisée dans le cas de nos capteurs à cause des broches qui ne sont pas adaptables sur l'unité (Fig. III.4.c). Des méthodes simples existent pour diminuer l'erreur des mesures.



a. Capteur type K avec têtes arrondies adaptables à l'unité de mesure.



b. Capteurs type K avec têtes plates utilisées aux expériences.

III.4. Méthodes de réalisation

III.4.1. Réalisation de l'enceinte MCP

- ❖ Du cuivre est plié suivant les dimensions 12, 4,5 et 1 cm, puis soudé. Il est utilisé pour loger la résistance thermique (Fig. III.5).



Fig. III.5. Pliage et soudage des tôles en Cu.

- ❖ Cette cavité en cuivre est collée à son tour à l'enceinte de visualisation (Fig. III.6).
- ❖ Lathermique (220V, 350W) est placée à l'intérieur de la cavité en cuivre (Fig. III.7). Son rôle est de fournir de l'énergie thermique au MCP.

.....en forme de U

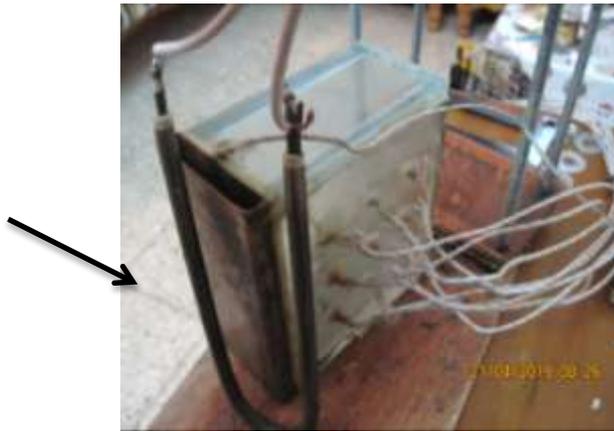


Fig. III.7. Résistance électrique et son emplacement à l'intérieur de la cavité en cuivre.

- ❖ Les thermocouples sont placés sur la face arrière de la cavité,endroits et espacés uniformément de 3 cm (horizontalement et verticalement) (Fig. III.8).
- ❖ Afin de minimiser les pertes, la cavité thermique en verre, est isolée sur les quatre côtés latéraux par la laine de roche (Fig. III.9). Les faces avant et arrière restent sans isolation pour garantir d'une part la répartition symétrique de la chaleur et d'autre part pour les évolutions de chaque expérience. La partie supérieure (mobile) est bloquée par quatre boulons, écrous et tiges filetées. Leur rôle est de permettre l'accès et le remplissage du MCP.



Fig. III.9. Position des capteurs à l'arrière de la cavité thermique calorifugée par la laine de roche.

- ❖ Le matériau à changement de phase MCP utilisé dans les expériences est de la paraffine appelée le tétracosane de formule chimique $C_{24}H_{50}$. Son point de la fusion varie entre 49 et 54°C. Les propriétés thermophysiques de la paraffine sont représentées sur le tableau suivant :

Tab. III.1. Propriétés thermophysiques du tétracosane [15].

Symbole	ρ_s (Kg/m ³)	ρ_L (Kg/m ³)	L_f (Kj/kg)	λ (W/m.K)	C_p (Kj/Kg.K)
valeur	912	769	255	0.2	2

- ❖ Dans une casserole, la paraffine à l'état solide est chauffée par une résistance variable pour pouvoir éviter les hautes températures et les surchauffes ; et ainsi perdre ses caractéristiques physiques (Fig. III.10).



Fig. III.10. Méthode de chauffage de la paraffine.

- ❖ La chaîne d'acquisition utilisée est de type NI (national instruments) (Fig. III.11). Elle est constituée de l'unité principale (NI c-DAQ 9174), de deux modules de températures (NI 9211) et un module universel (NI 9219).

Modules de températures

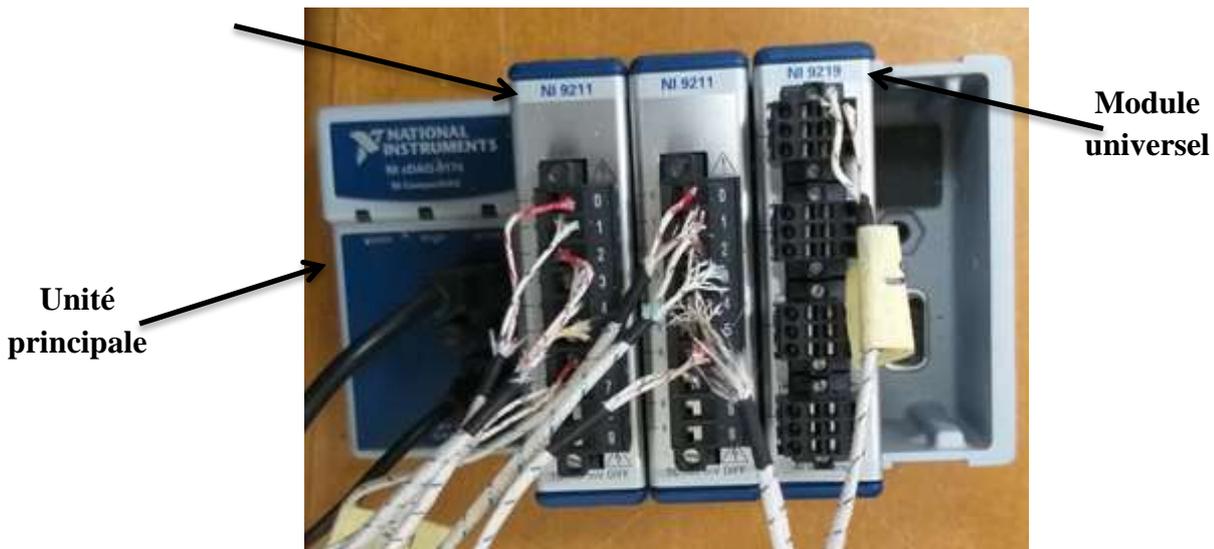


Fig. III.11. Chaîne d'acquisition y compris les modules.

III.5. Logiciel utilisé

III.5.1. LabVIEW

a. Description du logiciel

LabVIEW (**L**aboratory of **V**irtual **I**nstruments **E**ngineering **W**orkbench) est un logiciel de développement d'applications d'instrumentation qui peut être défini comme un programme permettant de contrôler depuis un ordinateur, un système allant du capteur à la chaîne d'acquisition ou de commande jusqu'à l'édition du rapport final. Couplé à des cartes d'entrées/sorties, il permet de gérer des flux d'informations numériques ou analogiques et de créer ou de simuler des instruments de mesures (oscilloscope, compteur, multimètre, etc.) [24].

b. Etapes de création d'une interface LabVIEW

+ Concept de boucles et de structures

La répétition et la boucle sont utilisées pour effectuer une action fréquemment avec des variations avec détails. LabVIEW comprend les boucles While Loop et For Loop [25].

- ❖ **Boucle While :** Une boucle While exécute un sous-diagramme jusqu'à ce qu'une condition soit remplie. La boucle For diffère de la boucle While telle que la boucle For exécute un nombre défini de fois. Une boucle While arrête l'exécution du sous-diagramme, uniquement si la valeur au terminal

conditionnel est existée. Pour cette raison, dans notre étude on s'est intéressées à la boucle While.

La boucle While contient deux terminaux, à savoir un terminal conditionnel et un terminal d'itération.

- Le terminal d'itération 'i' (un terminal de sortie) contient le nombre d'itérations terminées et qui commence toujours par zéro. Lors de la première itération, le terminal d'itération renvoie 0.
- Un terminal conditionnel est continu s'il est vrai « True » et la boucle While exécute son sous-diagramme jusqu'à ce que le terminal conditionnel reçoit une valeur fausse « FALSE ».

Temps de contrôle

Lorsqu'une boucle termine l'exécution d'une itération, elle commence immédiatement à exécuter l'itération à moins qu'elle n'atteigne une condition d'arrêt. La plupart des applications nécessitent un contrôle précis de la fréquence ou de la synchronisation de l'itération à maintenir entre les opérations successives de la boucle, telle que la vitesse à laquelle les valeurs de données sont tracées à un graphique [24]. Parmi ces fonctions, il y a:

- ❖ **Attendre un multiple de ms** : elle surveille un compteur de millisecondes et attend jusqu'à ce que le compteur de millisecondes atteigne un multiple de la durée spécifiée. Cette fonction peut être utilisée pour les activités de synchronisation. Pour que cette fonction soit efficace, la durée d'exécution de votre code doit être inférieure à celle spécifiée pour cette fonction.

Fig. III.13. Temps de contrôle.

- ❖ **Fonction Temps écoulé** : Affiche les coordonnées du temps en détail

Acquisition de données (DAQ)

Interface DAQ ASSISTANT : utilisée pour créer une tâche dans NI-DAQmx qui est une interface de programmation. Elle permet de communiquer avec les périphériques d'acquisition de données. Dans notre étude, nous avons créé une tâche NI-DAQmx qui mesure des températures de façon continue et affiche les données dans un graphe [24].

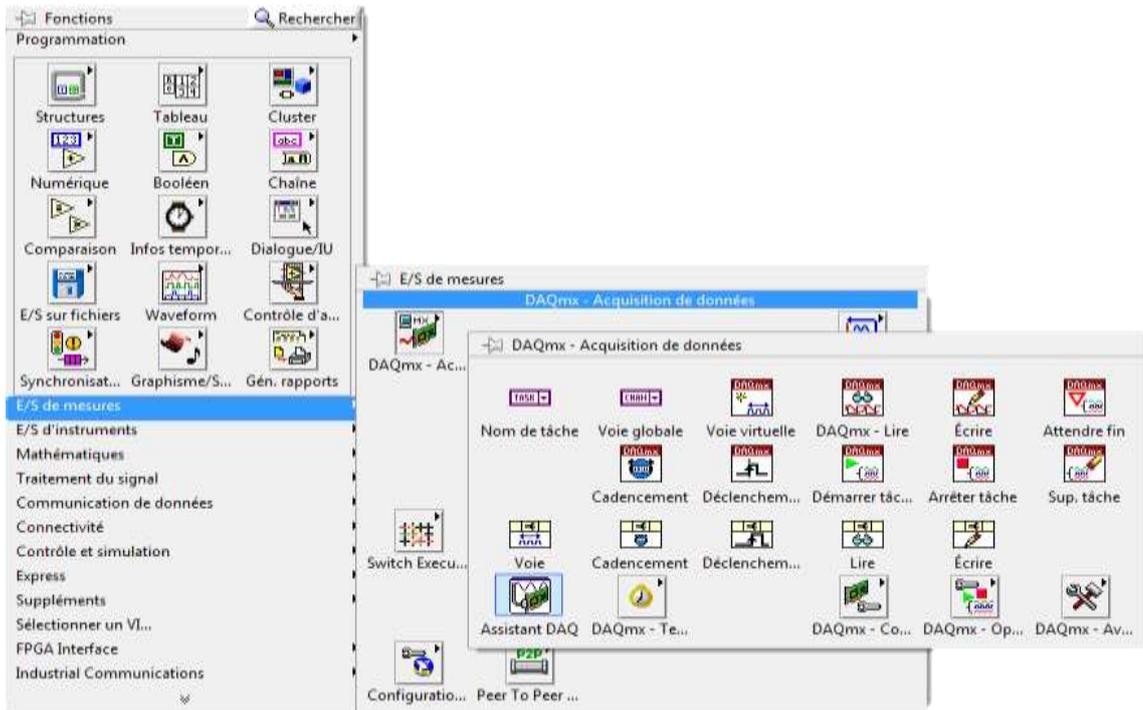


Fig. III.15. Création de DAQ Assistant.

Les données extraites de DAQ Assistant peuvent être sélectionnées sous forme de:

❖ Forme graphique

LabVIEW inclut le graphique pour afficher les données généralement acquises à une vitesse constante. Le graphique accepte également plusieurs types de données, ce qui minimise la nécessité de manipuler les données avant de les afficher.

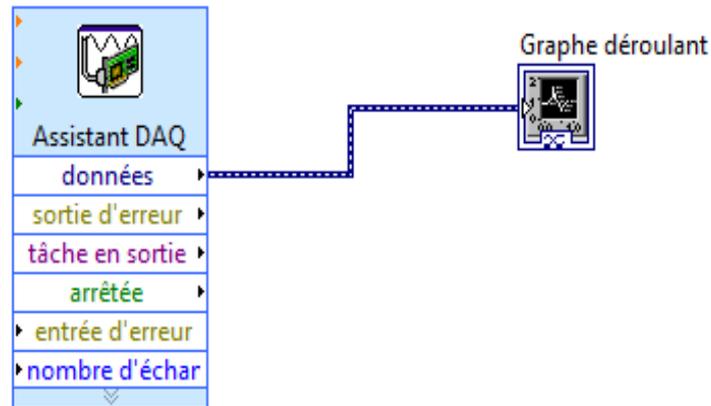


Fig. III.17. Création du graphe.

❖ **Tableaux** : utilisés pour définir les entrées ou les sorties de données de type tableau. L'indicateur table affiche les données générées.

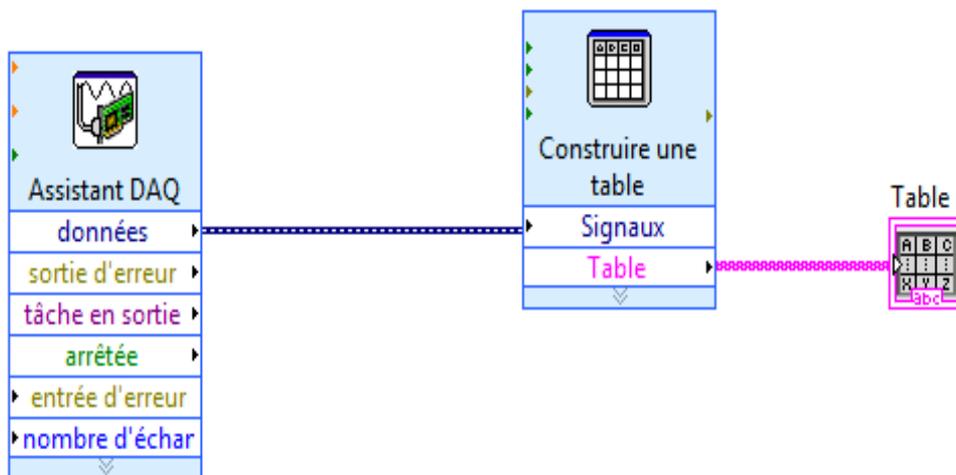


Fig. III.18. Création d'un tableau de données.

❖ **Enregistrer les données sur un fichier Excel**

Les données générées et analysées par le VI sont enregistrées sur un fichier Excel.

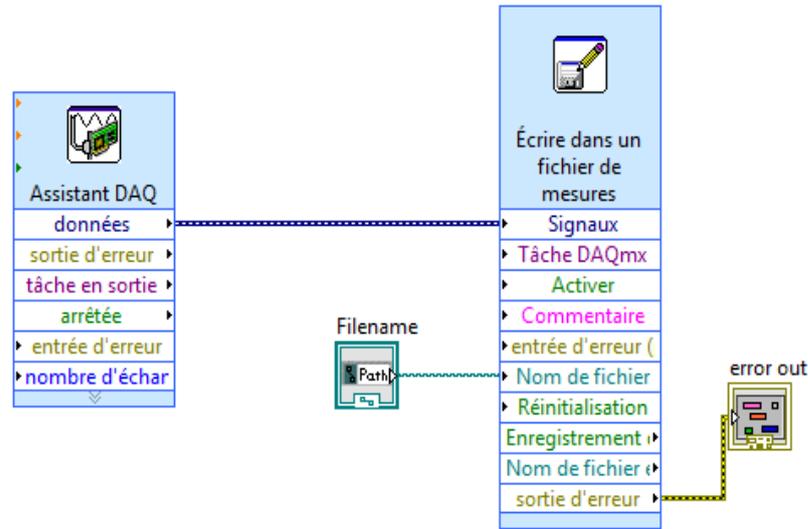


Fig. III.19. Création d'un fichier d'enregistrement des mesures.

c. Présentation de l'interface LabVIEW

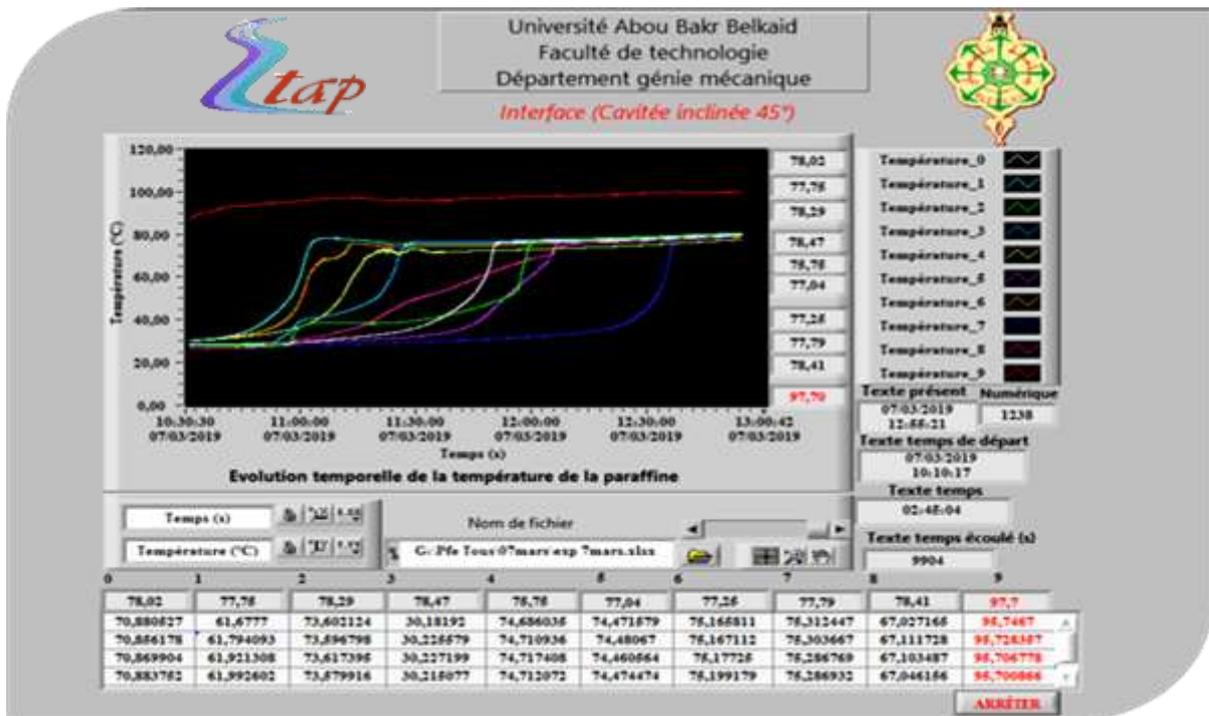


Fig. III.20. Interface LabVIEW.

L'interface LabVIEW permet de contrôler en temps réel toutes les données de fonctionnement du banc expérimental. Cela comprend les températures relevées au

sein de la cavité, la température délivrée par thermocouple et le traçage directement des graphes.

III.5.2. IRSoft

a. Description du logiciel

Le logiciel « IRSoft » sert à analyser, à traiter et à archiver les images enregistrées par la de marque (Fig. III.1). Il intègre une fonction de création de rapports pour permettre d'effectuer une présentation claire des données. La fonction Commande de l'appareil permet de paramétrer la

b. Présentation de l'interface IRSoft Testo i875

❖ **Ruban** : Le ruban aide à effectuer les opérations d'édition / configuration et à trouver rapidement les fonctions et les commandes correspondantes. Les fonctions et les commandes sont divisées en plusieurs groupes rassemblés sous quatre onglets : Analyse, Rapport, Caméra et Paramètres. En fonction de l'onglet sélectionné, les fonctions/commandes se trouvant en dessous du ruban changent d'encadrement.

❖ Espace de travail

C'est dans l'espace de travail que les informations sont affichées et où sont éditées les images. La représentation de l'espace de travail change en fonction de la mise en page sélectionnée.

❖ Barre d'état

Toutes les informations concernant l'image ouverte sont affichées dans la barre d'état.

c. Analyse des images

- Enregistrer/exporter une image
- Copier une image dans le Presse-papiers

- Déterminer les mesures sur un point d'image
- Correction de températures dans une zone d'image (adaptation par zone du degré d'émission et de la température réfléchie)
- Déterminer le point chaud/froid d'une zone d'image

1. Fenêtre Échelle de températures : Les fonctions suivantes sont disponibles dans la fenêtre Échelle de températures :

- Régler l'échelle
- Régler les valeurs limites
- Régler la zone isotherme

2. Fenêtre Image réelle : Les fonctions suivantes sont disponibles dans la fenêtre Image réelle :

- Importer /Exporter une image réelle
- Modifier la luminosité d'une image réelle
- Modifier la section d'image

3. Fenêtre Profil : Affiche les profils de température créés dans la fenêtre du document Thermogramme. Les fonctions suivantes sont disponibles dans la fenêtre Profil :

- Enregistrer le profil de température comme fichier image
- Sélectionner la représentation du profil de température
- Modifier la couleur d'arrière-plan du profil de température
- Afficher/masquer les lignes de quadrillage

4. Fenêtre Remarques : elle permet de saisir les remarques relatives à l'image IR sélectionnée dans le champ de texte avec le clavier.

d. Représentation de l'image

La représentation de l'image peut être optimisée par :

- Lissage d'image utilisée : la représentation de l'image est optimisée au moyen d'algorithmes.
- Correction de distorsion radiale: compense la distorsion optique d'images enregistrées avec des objectifs grands angles.
- Affichage des valeurs de température : Les valeurs de température des outils de mesure programmés (p.ex. point de mesure, Moyenne, point chaud & froid) sont affichées dans l'image thermique.

III.6. Expériences menées

Les expériences consistent à étudier le comportement dynamique et thermique durant la fusion de la paraffine. La résistance électrique est fixée à une puissance de 1,8 W, servant à fondre la paraffine. Les mêmes expériences sont répétées suivant différentes positions à savoir : position horizontale, position verticale et position inclinée de 45°.



Chapitre VI

Résultats et discussions





Conclusion générale

et perspectives



IV.1. Introduction

Pour mieux comprendre le processus de la fusion et le phénomène de la convection naturelle, nous avons utilisé une cavité remplie par la paraffine et chauffée sur trois positions à savoir : chauffage par le côté, chauffage par le bas et chauffage incliné de 45°. Le traitement des résultats est aussi consolidé par des logiciels graphiques et thermographiques comme suit:

- **GetData Graph Digitizer** : utilisé pour tracer les allures numériques [en (cm)] qui définissent la zone pâteuse (l'intervalle de la fusion) à partir des photos captées durant les expériences.
- **OriginPro8** : utilisé pour tracer les courbes à partir des points enregistrées sur le fichier Excel (obtenus par la programmation LabVIEW) et pouvoir les approximer par des fonctions mathématiques.
- **IR Soft (Testo i875)** : utilisé pour traiter et analyser les images infrarouges et réelles obtenues par la caméra thermique (Fig. III.1).

Ce logiciel thermographique permet d'afficher la répartition des températures sur les images captées durant les expériences et approximer l'intervalle de la fusion.

- **Autocad** : utilisé pour approximer la fraction volumique du liquide à chaque moment de l'expérience.

IV.2. Fusion de la paraffine chauffée par le côté

IV.2.1. Evolution du front de la fusion de la paraffine chauffée par le côté

Conclusion générale et perspectives

Le présent travail porte sur la réalisation d'un banc d'essai pour l'étude de l'évolution temporelle de la température de la paraffine expérimentale du processus de fusion d'un matériau à changement de phase (la paraffine). Le banc d'essai est une enceinte de forme carrée fabriquée en verre, isolée et chauffée par l'un de ses côtés.

Une chaîne d'acquisition de type NI a été utilisée pour enregistrer l'évolution thermique de la fusion. Une interface graphique a été développée par le logiciel LabVIEW pour la gestion numérique des résultats. Une caméra infra-rouge a été exploitée pour observer et enregistrer la carte thermique de l'enceinte durant le processus de fusion.

L'étude expérimentale que nous avons réalisée, nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- ❖ Deux modes de transfert de chaleur dominant le processus de fusion, à savoir la conduction et la convection naturelle. La conduction régit la fusion au début du processus et contrôle la propagation de la fusion dans le MCP encore solide. Au fur et à mesure que le temps passe, le volume de la fraction de fusion augmente et la fusion est dominée progressivement par la convection naturelle.
- ❖ Durant la fusion de la paraffine, une dilatation thermique de 3% a été enregistrée pour les trois cas étudiés.
- ❖ Une cavité chauffée par le bas accélère le temps global de la fusion par 25 min et 3h par rapport à une cavité inclinée de 45° et une cavité chauffée par le côté.
- ❖ Un seul rouleau domine la convection naturelle dans une cavité chauffée par le côté. Le phénomène de Rayleigh-Bénard domine la convection naturelle dans le cas d'un chauffage par le bas. Pour une inclinaison de 45°, les deux phénomènes réagissent mutuellement et le nombre de cellules diminue de onze à six rouleaux.

- ❖ Durant la solidification, une forme concave (poche d'air) définie par un recul de la matière, apparaît à la surface libre suite au phénomène de contraction. Cette forme développe le phénomène de la casquette observée durant la fusion.

En perspective, il est intéressant de simuler numériquement le problème suivant les trois inclinaisons avec l'ajout d'ailettes afin de mieux comprendre le phénomène de la convection.

L'utilisation de géométrie plus complexe peut modifier considérablement le comportement de la fusion, cela ouvre le champ à une série d'expériences sans fin.

Enfin, il est indispensable de suivre le cycle complet fusion-solidification afin de mieux comprendre le cycle complet.



Références

bibliographiques



- [1]. **K. Huang et al.** Macro-Encapsulated PCM Cylinder Module Based on Paraffin and Float Stones. *Materials*.p. 12. 2016.
- [2]. <https://www.rubitherm.eu/pcm.html>. Consulté le 20/03/2019.
- [3]. **H. Akeibe et P. Nejat.** A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. pp. 1470–1497. 2016
- [4]. **S. Guichard.** Modélisation, Expérimentation et Évaluation de la performance énergétique globale. Thèse doctorat , spécialité : Physique du bâtiment. 2013.
- [5]. **A. Soupart-Caron.** Stockage de chaleur dans les Matériaux à Changement de Phase. Thèse doctorat, Université Grenoble ALPES.2006.
- [6]. **Rosario et al.** Système de stockage et transfert d'énergie par chaleur latente adaptable au rafraîchissement d'air en bâtiments: Conception et analyse thermique. Ecole doctorale sciences physique et de l'ingénieur, spécialité : mécanique. 2018.
- [7]. **A. Felix Regin et al.** Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* . pp. 2438–2458. 2007
- [8]. **Lecomte et C.Thoumyre.** Optimisation de structures architecturées pour la captation, le stockage et la restitution de l'énergie thermique. Thèse de doctorat, spécialité : Matériaux, Mécanique, Génie civil, Electrochimie. 2016.
- [9]. <https://www.google.com/>. Consulté le 24/03/2019.
- [10]. **J. Jiang et al.** Preparation and performances of bulk porous al foams impregnated with phase-change-materials for thermal storage. pp. 440–444. 2012.
- [11]. **N.Hale, R.Viskanta,** Solid-Liquid Phase-Change Heat Transfer and Interface Motion in Materials Cooled or Heated From Above or Below. *Heat and Mass Transfer*. pp. 283-292. Vol. 23. 1979.
- [12]. **R.Viskanta, B. Webb.** Natural-Convection-Dominated Melting Heat Transfer in an Inclined Rectangular Enclosure. *Heat and Mass Transfer*. pp. 183-192. Vol. 29. 1986.
- [13]. **M.A Hamdan, F. Elwerr.** Thermal energy storage using a phase change material. *Solar Energy*. pp. 183-189. Vol. 56. 1996.
- [14]. **B. Binet.** Etude de la fusion dans des enceintes munies de sources de chaleur discrètes. Université de SHERBROOKE, Thèse de Doctorat (Philosophiae Doctor) Spécialité: génie mécanique. 1998.

Références bibliographiques

- [15]. **A. Arasu, A. Mujumdar.** Numerical study on melting of paraffin wax with Al₂O₃ in a square enclosure. *Heat Mass and Transfer*. pp. 8-16. Vol. 39. 2012.
- [16]. **M. Serradj.** Contribution de la fusion des matériaux à changement de phase. Université des sciences et de la technologie MOHAMMED BOUDIAF d'Oran, Thèse de Doctorat, Spécialité: Energétique. 2013.
- [17]. **A. Korti, F. Tlemsani.** Experimental investigation of latent heat storage in a coil in PCM storage unit. *Energy Storage*. pp. 177–186. Vol. 10. 2016.
- [18]. **M.Cheralathan, R.Senthil.** Natural heat transfer enhancement methods in phase change material based thermal energy storage. *ChemTech Research*. pp. 563-570. Vol. 9. 2016.
- [19]. **R. Zarrit et al.** Convection naturelle dans une cavité rectangulaire inclinée de différents rapports de forme. *ResearchGate*. pp. 97-109. Vol. 19. 2016.
- [20]. **S.Madruga, C.Mendoza.** Enhancement of heat transfer rate on phase change materials with thermocapillary flows. *The European Physical Journal Special Topics*. pp. 1169–1176. 2017.
- [21]. **S. Madruga, J. Curbelo.** Dynamic of plumes and scaling during the melting of a Phase Change Material heated from below. *Heat and Mass Transfer*. pp. 206-220. Vol. 126. 2018.
- [22]. **S. Madruga et al.** Experimental and numerical study of melting of the phase change material tetracosane. *Heat and Mass Transfer*. pp. 163-170. Vol. 98. 2018.
- [23]. **K. Missoum.** Amélioration du processus de la fusion des matériaux à changement de phase par voie expérimentale. Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen, Mémoire de master en Génie Mécanique, Spécialité : Energétique. 2018.
- [24]. **J. Jerome.** Virtual instrumentation using LabVIEW. Department of Instrumentation and Control Systems Engineering PSG College of Technology. 2010.
- [25]. **F. Cottet Luc et al.** Programmation et applications Introduction à LabVIEW NXG.DUNOD.
- [26]. Testo IRSoft. Mode d'emploi

ملخص

تقدم هذه المذكرة عملاً تجريبياً لغرفة حرارية مصنوع من الزجاج لفهم وتصوير السلوك الحراري لمواد تغيير الطور (البارافين) أثناء الذوبان. ويتناول هذا البحث الدراسة الحرارية لتأثير ميل الغرفة على مرحلة عملية التغيير. تم تطوير واجهة بواسطة برنامج LabVIEW للحصول على بيانات رقمية لتطور درجة الحرارة في مواقع مختلفة. تم تدعيم العمل بواسطة كاميرا الأشعة تحت الحمراء ، واستخدمت لالتقاط الخريطة الحرارية لسلوك البارافين. تم الحصول على مكسب قدره 3 ساعات في حالة التسخين من الاسفل بالنسبة لحالة التسخين من الجانب.

الكلمات المفتاحية: الانصهار ، البارافين ، الحمل الحراري ، تغيير المرحلة ، لافيو.

Résumé

Ce manuscrit présente un travail expérimental d'une cavité thermique fabriquée en verre dans le but de comprendre et visualiser le comportement thermique d'un matériau à changement de phase (paraffine) lors de la fusion. Le mémoire porte sur l'étude thermique de l'effet de l'inclinaison de la cavité sur le processus de changement de phase. Une interface a été développée par le logiciel LabVIEW afin d'acquérir les données numériques de l'évolution des températures à différentes positions. Le travail est renforcé par une caméra infra-rouge, utilisée pour capturer la carte thermique du comportement de la paraffine. Un gain de 3h a été obtenu dans le cas d'un chauffage par le bas par rapport à un chauffage par le côté.

Mots clés : fusion, paraffine, convection, MCP, changement de phase, LabView.

Abstract

This manuscript presents an experimental work of a thermal cavity made of glass in order to understand and visualize the thermal behavior of a phase change material (paraffin) during melting. The present paper deals with the thermal study of the effect of the cavity's inclination on the change process phase. An interface has been developed by LabVIEW software to acquire numerical data of temperature evolution at different positions. The work is reinforced by an infra-red camera, used to capture the thermal map of paraffin behavior. A gain of 3h was obtained in the case of a bottom heating compared to a heating by the side.

Keywords: fusion, paraffin, convection, PCM, phase change, LabView.