

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

Par :

REKIOUK YOUNESS

MOKHTARI BOUNOUAR

Sujet

**Caractérisation expérimentale de la paraffine par la
méthode T-history**

Soutenu publiquement, le 30 / 06 / 2022, devant le jury composé de :

Mme. SARI HASSOUN. H	MAA	Université de Tlemcen	Présidente
Mme.KHALDLS	MCB	Université de Tlemcen	Examineur
M. GUELLIL.H	MCA	Université de Tlemcen	Encadreur
M. KORTI. A. N	Professeur	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire : 2021 / 2022

Remerciements

*Pour commencer, nous voulons adresser nos remerciements à **Mr GUELLIL HOCINE** notre encadreur et notre co-encadreur **Mr KORTI ABDE ILLAH NABIL** pour leurs aides, conseils et pour l'orientation, la guidance, l'encouragement, ainsi que pour leurs précieux conseils lors de la réalisation de notre mémoire dans les meilleures conditions.*

*Nous tenons aussi à remercier Melle **MISSOUM.K** pour l'aide qu'elle nous a apportée. Nous remercions également les membres du jury **Mme. SARI HASSOUN. H** et **Mme. KHALDI. S** pour leurs efforts et leurs soins apportés à notre travail.*

Sans oublier de remercier toute l'équipe du laboratoire de Génie mécanique de l'université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen.

Et tous nos professeurs du département qui ont contribué à notre formation.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à nos familles : nos parents pour leur amour et leur soutien. Nos sœurs et nos frères et aussi nos amis pour leurs encouragements à poursuivre notre route et réaliser tous nos vœux.

Dédicace

Je dédie ce travail de la fin d'études :

A mes très chers parents qui sans eux je ne suis rien aujourd'hui

A mes frères et ma famille

A tous mes amis

Sans oublié mon binôme Rekiouk

Enfin pour tous les gens qui m'estiment espérant bien que je n'ai oublié

Personne dans cette courte page.

MOKHTARI Bounouar

Dédicace

Avant toute chose je tiens à remercier Allah pour l'accomplissement de ce projet.

Je dédie ce travail

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chères sœurs et mon cher frère pour leurs encouragements permanent, et son soutien moral,

*A mon binôme **Mokhtari Bounouar***

A mes chers amis, G. Youcef, B. Alae, H. Mohammed, M. Youcef, B. Walid,

H. Azzedine

pour leurs appuis et leurs encouragements.

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Merci d'être toujours là pour moi.

REKIOUK YOUNESS

الملخص

طريقة T-history هي طريقة بسيطة لتحديد الخصائص الفيزيائية الحرارية لـ MCP مقارنة بالطرق الأخرى، مثل طرق القياس الكلاسيكية، والتحليل الحراري التفاضلي (DTA) وطرق قياس المسعر التفاضلي (DSC)، فإنها تتميز بالخصائص التالية: الوحدة التجريبية بسيطة، وقادرة على قياس درجات حرارة معينة، وحرارة الانصهار، والتوصيل الحراري من عينات MCP متعددة في وقت واحد. كما أنه يجعل من الممكن مراقبة عملية تغيير الطور لكل عينة MCP. هذه الطريقة مفيدة بشكل خاص لاختيار دفعات من MCP المستخدمة للأغراض الهندسية وإعداد MCP جديدة تستخدم لأغراض أخرى.

يقدم هذا العمل دراسة تجريبية لعملية التسخين والتبريد لمادة MCP (خصائصه الفيزيائية الحرارية غير معروفة) باستخدام طريقة T-history. تسمح لنا هذه الطريقة بالتوصيف التجريبي للمواد المستخدمة من خلال سلسلة من التجارب التي أجريت داخل مختبر «Energetic and Thermal Applied ETAP» التابع لجامعتنا.

الكلمات المفتاحية: MCP ، T-history ، حرارة الانصهار، الحرارة النوعية، التوصيل الحراري

Abstract

The T-history method is a simple method to determine the thermophysical properties of a PCM. Compared with other methods, such as classical calorimetric methods, differential thermal analysis (DTA) and differential scanning calorimetry (DSC) methods, it has the following characteristics: the experimental unit is simple, capable of measuring specific heats, heat of fusion and thermal conductivity of multiple PCM samples simultaneously. It also makes it possible to observe the phase change process of each PCM sample. This method is particularly useful for selecting batches of PCMs used for engineering purposes and preparing new PCMs used for other purposes.

This work presents an experimental study of the heating and cooling process of a PCM (whose thermophysical properties are unknown) using the T-history method. This method allows us to experimentally characterize the material used by a series of experiments carried out within the « Energétique et Thermique Appliquée ETAP » laboratory of our university.

Keywords: PCM, T-history, heat of fusion, specific heat, thermal conductivity

Résumé

La méthode T-history est une méthode simple pour déterminer les propriétés thermo physiques d'un MCP. Comparée à d'autres méthodes, telles que les méthodes calorimétriques classiques, l'analyse thermique différentielle (DTA) et les méthodes de calorimétrie à balayage différentiel (DSC), elle présente les caractéristiques suivantes : l'unité expérimentale est simple, capable de mesurer les chaleurs spécifiques, la chaleur de fusion et la conductivité thermique de plusieurs échantillons de MCP simultanément. Elle permet aussi d'observer le processus de changement de phase de chaque échantillon de MCP. Cette méthode est particulièrement utile pour la sélection de lots de MCP utilisés à des fins d'ingénierie et de préparer de nouveaux MCP utilisés à d'autres fins.

Ce travail présente une étude expérimentale du processus de chauffage et de refroidissement d'un MCP (dont nous ignorons ses propriétés thermo physiques) en utilisant la méthode T-history. Cette méthode nous permet de caractériser expérimentalement le matériau utilisé par une série d'expériences réalisées au sein de laboratoire « Energétique et Thermique Appliquée ETAP » de notre université.

Mots clés : MCP, T-history, chaleur de fusion, chaleur spécifique, conductivité thermique.

Table des matières

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Introduction général..... 1

Chapitre I : Etude bibliographique..... 5

I.1 Introduction..... 6

I.2 Travaux antérieurs 6

Chapitre II : Généralités sur le stockage thermique et les matériaux à
changement des phases 23

II.1 Introduction..... 24

II.2 Différents types de stockage 24

II.2.1 Le stockage d'énergie mécanique 24

II.2.2 Le stockage d'énergie électrique 24

II.2.3 Le stockage d'énergie chimique 25

II.2.4 Le stockage d'énergie thermochimique..... 25

II.2.5 Le stockage d'énergie thermique..... 25

II.3 Définition de stockage thermique 26

II.4 Principes du stockage d'énergie 26

II.4.1 Le stockage d'énergie thermique par chaleur sensible..... 26

II.4.2 Les matériaux de stockage à chaleur sensible 27

A- Le stockage par chaleur sensible avec un matériau liquide 27

B- Le stockage par chaleur sensible avec un matériau solide..... 28

II.4.3 Le stockage d'énergie thermique par chaleur latente 29

II.4.4	Stockage d'énergie thermique par voie thermochimique	31
II.5	Les matériaux à changement de phase	31
II.5.1	Définition	31
II.5.2	Intérêts des matériaux à changement de phase	32
II.5.3	Les caractéristiques idéales d'un MCP	32
a)	Propriétés thermodynamiques et thermiques	32
b)	Les propriétés cinétiques	32
c)	Les propriétés chimiques.....	33
d)	Propriétés sociétales (économie, sécurité, environnement)	33
II.5.3	Types des matériaux à changement de phases.....	33
II.5.4	Les composés organiques	34
a)	Paraffines	34
b)	Les composés organiques non-paraffinés	36
II.5.5	Les composés inorganiques	36
a)	Les sels hydratés.....	36
II.5.6	Eutectiques	37
II.6	Classe de MCP.....	38
II.6.1	Matériaux changement de phase SP	38
II.6.2	Matériaux changement de phase RT.....	38
II.7	Quelques phénomènes affectant l'efficacité du stockage	41
II.7.1	La surfusion	41
II.7.2	La surchauffe	41
II.7.3	La dilatation	42
II.8	Quelques idées pour améliorer le transfert de chaleur dans un système de stockage latent.....	42
II.9	Applications des MCP	43

II.9.1	Stockage de l'énergie thermique.....	43
II.9.2	Le textile	43
II.9.3	Applications médicales	44
II.9.4	Climatisation passive	45
II.9.5	L'isolation des bâtiments	45
II.9.6	Le transport de produits alimentaires.....	46
Chapitre III : Procédure expérimentale		48
III.1	Introduction.....	49
III.2	Présentation du dispositif expérimental.....	49
III.3	Méthode de remplissage des tubes par la paraffine	53
III.4	Mesure des températures	54
III.5	Chaine d'acquisition	54
III.6	Description du logiciel LabView.....	55
III.6.1	Présentation de l'interface.....	55
a)	Interface arrière (block diagramme).....	55
b)	Graphes.....	56
c)	Enregistrement des données sur fichier Excel	56
d)	Interface avant (front panel).....	57
III.7	Détermination de la masse volumique solide et liquide (ρ_s et ρ_l).....	58
III.8	Détermination de la température de fusion, la chaleur spécifique et la chaleur latente.....	59
III.9	Détermination de la conductivité thermique	59
III.10	Partie de calcul	61
III.11.1	Nombre de Grashof	61
III.11.2	Nombre de Rayleigh	62
III.11.3	Nombre de Nusselt.....	62

III.11.4	Nombre de Stefan.....	62
III.11.5	Méthode T-history. Exemples de calcul des surfaces.....	63
III.11.6	Chaleur spécifique et la chaleur de fusion	64
III.11.7	Conductivité thermique.....	Erreur ! Signet non défini.
Chapitre IV : Résultats et interprétations.....		66
IV.1	Introduction.....	67
IV.2	Détermination de la masse volumique ρ_s et ρ_l	67
IV.3	Détermination de l'intervalle de changement de phase.....	68
a)	Détermination des valeurs de temps (t_1, t_2, t_3, t_1' et t_2').....	68
IV.4	Représentation des surfaces.....	71
IV.5	Détermination des surfaces.....	72
a)	Méthode d'intégration de polynôme	72
b)	Méthode des trapèzes	73
c)	Calcul par le logiciel Origin Pro	74
d)	Comparaison entre les surfaces des trois méthodes	76
IV.6	Détermination de la chaleur spécifique et la chaleur latente.....	76
IV.7	Détermination des temps de solidification et de fusion t_s et t_f	77
IV.8	Détermination des conductivités thermiques solide et liquide	82
Conclusion générale.....		84
Annexes.....		86
Références bibliographiques.....		90
Résumés.....		95

Chapitre I

Fig. 1.1. Évolution de l'interface des phases solide/liquide dans des conditions de paroi chauffée à gauche (FF : fraction de fusion) [15]	8
Fig. 1.2. Évolution de l'interface solide/liquide d'un composite paraffine/mousse	9
Fig. 1.3. Champ de température et champ de différence de température du ss-MCP poreux simulé par Zhang et al [14] : (a) mousse de cuivre ; (b) paraffine ; (c) différence de température entre la mousse de cuivre et la paraffine.	10
Fig. 1.4. Propagation de l'interface solide/liquide (a) sans considérer la convection naturelle (b) en considérant la convection naturelle [16].	11
Fig. 1.5. Domaine de calcul bidimensionnel : (a) MCP à 1 couche, (b) MCP à 3 couches.....	12
Fig. 1.6. Evolution de la fusion du MCP pendant le processus de charge pour un débit volumique de 25 l/h [20].....	13
Fig. 1.7. Evolution de la solidification du MCP au cours du processus de décharge pour un débit volumique de 25 l/h [20].	13
Fig. 1.8. Évolution temporelle du processus de fusion de la paraffine chauffée selon 3 angles différents [22].	15
Fig. 1.9. Image infrarouge du champ de températures selon 3 angles différents	16
Fig. 1.10. Type d'échangeur à tubes en U à ailettes remplis de MCP et comprenant des thermocouples de type K.	17
Fig. 1.11. L'évolution de l'interface solide/liquide durant la fusion de la paraffine....	18
Fig. 1.12. L'évolution de l'interface solide/liquide durant la solidification de la paraffine	18
Fig. 1.13. Evolution temporelle de la fusion de la paraffine avec une grille en Zamak [25].....	19
Fig. 1.14. Evolution temporelle de la fusion de la paraffine avec une grille en l'aluminium [25].	19
Fig. 1.15 (a) élévation frontale et (b) coupe transversale du MCP dans le tube pendant le changement de phase liquide-solide, montrant la coexistence de deux phases avec une frontière de phase.	21

Chapitre II

Fig. 2.1. Les différentes technologies de stockage	25
Fig. 2.2. Différentes méthodes utilisées au stockage de l'énergie thermique [32].	26
Fig. 2.3. Stockage par chaleur sensible et latent.....	29
Fig. 2.4. Schéma de principe d'un système de stockage par voie thermochimique	31
Fig. 2.5. Types des matériaux à changement de phases	34
Fig. 2.6. Paraffine brutes, en capsulées, en poudre ou en granulées	35
Fig. 2.7. MCP Class SP.....	38
Fig. 2.8. MCP Class RT	39
Fig. 2.9. Surfusion lors du refroidissement d'un MCP [46].	41
Fig. 2.10. Pistes d'amélioration du transfert thermique dans les systèmes de stockage par chaleur latente [50]	43
Fig. 2.11. L'efficacité de MCP dans les textiles.....	44
Fig. 2.12. Récipients en MCP utilisés pour transporter le sang et les organes.....	45
Fig. 2.13. Climatisation passive (gauche), Isolation du bâtiment (droite).....	46
Fig. 2.14. Emballage isotherme passif transport de médicament	46

Chapitre III

Fig. 3.1. Installation expérimentale	50
Fig. 3.2. Résistance thermique.....	50
Fig. 3.3. Régulateur de température.....	51
Fig. 3.4. Thermomètre à double sortie.....	51
Fig. 3.5. Paraffine utilisée à l'état solide	52
Fig. 3.6. Tubes utilisés en forme de U	52
Fig. 3.7. Chauffage de la paraffine.	53
Fig. 3.8. Remplissage des tubes par la paraffine	53
Fig. 3.9. Position des capteurs à l'intérieur des tubes en U	54
Fig. 3.10. Emplacement des modules dans l'interface avec le branchement des capteurs de température.....	55
Fig. 3.11. Exemple de graphes enregistrés sur l'interface.....	56

Liste des figures

Fig. 3.12. Création d'un fichier d'enregistrement des mesures.....	57
Fig. 3.13. Présentation de l'interface (face avant)	57
Fig. 3.14. Balance utilisée pour le pesage de la paraffine Mesure du volume de la paraffine à l'état solide.....	58
Fig. 3.15 Mesure du volume de la paraffine à l'état solide.....	58
Fig. 3.16. Schéma technique du procédé expérimental pour la mesure de T_f, C_{p_s}, C_{p_l} et L_f	59
Fig. 3.17. Schéma technique du procédé expérimental pour la mesure de la conductivité thermique solide λ_s	60
Fig. 3.18. Schéma technique du procédé expérimental pour la mesure de la conductivité thermique liquide λ_l	60
Fig. 3.19. Le procédé expérimental pour la mesure de les conductivités thermiques ..	61
Fig. 3.20. Courbe typique de T–history d'un MCP pendant un processus de refroidissement.....	63
Fig. 3.21. Courbe typique de T–history de l'eau pendant un processus de refroidissement.....	63

Chapitre IV

Fig. 4.1. Evolution temporelle de la température de la paraffine et de sa dérivée durant la phase de refroidissement par l'air	68
Fig. 4.2. Evolution temporelle de la température de l'eau (référence) durant la phase de refroidissement par l'air	68
Fig. 4.3. Evolution temporelle des températures de la paraffine et de l'eau durant le refroidissement à l'air libre selon un régime stationnaire	70
Fig. 4.4. Représentation des surfaces du MCP A_1, A_2 et A_3	71
Fig. 4.5. Représentation des surfaces de l'eau A'_1 et A'_2	72
Fig. 4.6. Exemple de la méthode de polynôme.....	73
Fig. 4.7. Surfaces A_1, A_2 et A_3 conçues par Origin Pro	75
Fig. 4.8. Surfaces conçues par Origin Pro A'_1 et A'_2	75

Liste des figures

Fig. 4.9. Evolution temporelle de la température et de sa dérivée durant la phase de refroidissement par l'eau.....	78
Fig. 4.10. Evolution temporelle de la température et de sa dérivée durant la phase de fusion par l'eau	79
Fig. 4.11. Evolution temporelle des températures du MCP durant le refroidissement par l'eau selon un régime stationnaire.	80
Fig. 4.12. Evolution temporelle de la fusion du MCP dans un bain d'eau chaude	81

Liste des tableaux

Tableau 2.1. Matériaux pour le stockage thermique à chaleur sensible	28
Tableau 2.2. Matériaux pour le stockage thermique à chaleur latente (Gil 2010)	30
Tableau 2.3. Propriétés thermiques de certains MCP [46]	39
Tableau 2.4. Avantages et inconvénients des MCP.....	40
Tableau 4.1. Valeurs obtenues (m_p , V_l , V_s , ρ_s , ρ_l)	67
Tableau 4.2. Valeurs de temps obtenues durant la phase de refroidissement par l'air. 69	
Tableau 4.3. Surfaces calculées par la méthode de polynôme	73
Tableau 4.4. Surfaces calculées par la méthode des trapèzes	74
Tableau 4.5. Surfaces calculées par le logiciel Origin Pro	76
Tableau 4.6. Comparaison des surfaces obtenues.....	76
Tableau 4.7. Résultats obtenus (C_{pl} , C_{ps} et L_f)	77
Tableau 4.8. Valeur de temps durant la phase de refroidissement par l'eau	78
Tableau 4.9. Valeur de temps durant la phase de fusion par l'eau	79
Tableau 4.10. Résultats des conductivités thermiques	82

Nomenclature

Lettres latines

T : Température	(°C)
T_s : Température de solidification	(°C)
T_f : Température de fusion	(°C)
m : Masse du corps	(kg)
V : Volume	(l)
h : Enthalpie	(J/kg)
E : Énergie thermique	(kJ)
Cp_s : Capacité spécifique à l'état solide	(J/kg.K)
Cp_l : Capacité spécifique à l'état liquide	(J/kg.K)
L_f : Chaleur latente de la fusion	(J/kg)
L_v : Chaleur latente de la vaporisation	(J/kg)
R : Rayon	(m)
L : Longueur	(m)
t_f : Temps de la fusion complète	(s)
t_s : Temps de la solidification complète	(s)

Symboles Grecs

ρ_s : Masse volumique solide	(kg/m ³)
ρ_l : Masse volumique liquide	(kg/m ³)
λ_s : Conductivité thermique solide	(W/m.K)
λ_l : Conductivité thermique liquide	(W/m.K)

Nomenclature

μ : Viscosité dynamique (Pa.s)

Abréviation

MCP : Matériau à changement de phase

HTF : Fluide caloporteur

TES : Thermal Energy storage

LHTES: Latent Heat Thermal Energy Storage

DTA : Differential thermal analysis

DSC : Differential scanning calorimetry

Introduction générale

Introduction générale

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

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

Le stockage de l'énergie est l'action qui consiste à placer une énergie à un endroit donné pour faciliter son exploitation immédiate ou future. Par son importance dans notre civilisation grande consommatrice d'énergie, le stockage d'énergie est une priorité économique. Il concourt à l'indépendance énergétique, c'est-à-dire à la capacité d'un pays à satisfaire par lui-même ses besoins énergétiques. De ce fait, le stockage d'énergie fait souvent l'objet d'une attention particulière de la part des pouvoirs politiques, surtout dans les pays fortement dépendants de l'étranger.

Par extension, le terme "stockage d'énergie" est souvent utilisé pour décrire le stockage de la matière qui produira cette énergie.

Le stockage est un moyen très important pour une gestion optimale de l'énergie thermique. Il permet en effet d'adapter la production aux besoins et de créer les conditions les plus favorables à cette gestion en réalisant une relation constante entre l'énergie demandée et l'énergie fournie. De plus, dans le bâtiment, il peut contribuer efficacement à améliorer le confort des occupants quand il est installé dans l'enveloppe (inertie des murs, dalles ...).

Ce stockage d'énergie peut être fait avec les matières à changement de phase (MCP), ou aussi appelées des matières du stockage de la chaleur latentes comme les paraffines, les eutectiques et les hydrates salines...etc.

L'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) permet d'avoir des stocks moins volumineux à cause de la grande chaleur latente de fusion ou de solidification de ceux-ci. Les technologies du stockage de l'énergie font l'objet d'activités de recherche depuis de nombreuses années, l'utilisation différée de l'énergie est l'idée commune qui vient à l'esprit dès que l'on parle de stockage.

L'objectif de notre travail est de caractériser expérimentalement les propriétés thermo-physiques de la paraffine (MCP) tout en utilisant la méthode T-history, développée par Yingping. C'est une méthode simple qui repose sur l'utilisation d'une unité expérimentale capable de mesurer les chaleurs spécifiques, la chaleur de fusion et la conductivité thermique de plusieurs échantillons de MCP simultanément. Elle permet aussi d'observer le processus de changement de phase de chaque échantillon MCP. En plus, elle est basée sur trois expériences importantes : refroidissement par air, refroidissement et chauffage par eau.

Les expériences sont réalisées au sein du laboratoire énergétique et thermique appliquée (ETAP) de la faculté de technologie, Université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen. Le travail est réparti de la manière suivante :

- Le premier chapitre est consacré à une revue bibliographique des travaux de recherche sur les systèmes de stockage par MCP.
- Le second chapitre étudie le stockage thermique et présente les différents matériaux à changement de phase, ainsi que leurs différentes applications et les lois les plus utilisées.
- Le troisième chapitre est consacré à la procédure expérimentale avec les matériels de mesure utilisés aux processus de solidification et de la fusion et la présentation des différentes équations et corrélations pour caractériser le matériau utilisé.

Introduction générale

- Le quatrième chapitre présente les résultats expérimentaux sous forme de graphes et d'équations ainsi leurs discussions.

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

Chapitre I : Etude bibliographique

I.1 Introduction

Ces dernières années, les systèmes de stockage de la chaleur latente ont gagné en importance pour de nombreuses applications dans les centrales spatiales, dans certains systèmes d'énergie solaire, dans les systèmes centraux de climatisation et dans les bâtiments économes en énergie, en raison de leur forte densité énergétique et de leur comportement isotherme pendant la charge et la décharge. Dans une certaine mesure, la sélection ou la préparation d'un matériau à changement de phase (MCP) approprié pour un système de stockage de la chaleur latente est la plus difficile, mais aussi la plus importante. Dans tous les cas, il est important de mesurer les propriétés physiques thermiques du MCP.

I.2 Travaux antérieurs

La majorité des recherches se concentrent sur la chaleur sensible et la chaleur latente, ou la combinaison des deux. La chaleur sensible se traduit par l'ajout ou la soustraction de chaleur au système sans la présence d'un changement de phase. Les matériaux stockent l'énergie thermique dans leur capacité thermique spécifique par degré modifié, dans ce cas par degré augmenté [1].

En ce qui concerne leurs températures de fonctionnement, elles dépendent principalement de l'application du stockage de l'énergie thermique (TES) et de l'espace disponible. Les cycles de réfrigération et les systèmes de refroidissement fonctionnent entre -20 °C et 10 °C environ. Les plages de températures courantes pour les températures moyennes se situent entre 20 °C et 90 °C et sont généralement mises en œuvre dans des systèmes à petite échelle ou domestiques. Les températures de fonctionnement ne dépassent généralement pas 100 °C [2,3]. Ces systèmes nécessitent des matériaux différents de ceux utilisés dans les systèmes à haute température [4]. Par exemple, le stockage de l'énergie thermique associé au développement de l'énergie solaire concentrée utilise des sels fondus dont les températures de fonctionnement varient entre 300 et 500 °C environ [5]. Bien que les sels fondus soient des fluides de travail couramment utilisés dans les systèmes de chaleur sensible, ils peuvent également être utilisés comme matériaux de stockage lorsqu'ils sont fondus. Le changement de phase, cependant, est généralement associé aux systèmes de chaleur latente.

Chapitre I. Etude bibliographique

Du point de vue des matériaux, les systèmes de chaleur latente comprennent les systèmes organiques (paraffines ou acides gras), inorganiques (hydrates de sel, métaux à bas point de fusion) et eutectiques [6]. Les acides gras et les paraffines sont utilisés dans les systèmes de qualité inférieure et des recherches importantes ont été menées sur leurs propriétés favorables en tant que matériaux TES. Les paraffines sont adaptées en raison de leur flexibilité dans l'extension de leurs chaînes polymères pour différentes températures de fusion, parce qu'elles sont sûres, non réactives et qu'elles ont peu ou pas de surfusion [7]. Les acides gras ont tendance à avoir une chaleur latente de fusion plus élevée, une bonne stabilité chimique et sont durables car ils sont dérivés d'huiles végétales et animales [8]. Néanmoins, ils sont inflammables et environ trois fois plus chers que la paraffine [9].

Fauzi et al. [10] combinent divers acides gras pour créer deux types de mélanges eutectiques dont la fiabilité thermique est testée en cycle expérimental. Les mélanges sont l'acide myristique, l'acide palmitique et le myristate de sodium (MA/PA/SM) et l'acide myristique, l'acide palmitique et le palmitate de sodium (MA/PA/SP). Les auteurs affirment que ces mélanges présentent de bonnes performances et qu'ils peuvent être utilisés pour les systèmes thermodynamiques à usage domestique, comme le chauffage de l'eau.

Nazir et al. [11] préparent un total de dix mélanges d'eutectiques à base d'acides gras pour le TES solide-liquide à chaleur latente à température basse ou modérée. Ils combinent l'acide palmitique, l'acide myristique, l'acide stéarique, l'acide laurique et le PureTemp68 commercial pour créer des matériaux d'une température de fonctionnement inférieure et une chaleur latente supérieure. Les résultats révèlent que les points de fusion varient de 27 à 75 °C environ, avec une chaleur latente allant de 127 à 210 kJ/kg, ce qui les rend appropriés pour le chauffage solaire de l'eau, la gestion thermique des bâtiments, les applications de chauffage des locaux, etc.

En ce qui concerne la paraffine, Pagkalos et al. [12] comparent et évaluent l'utilisation du MCP A44 (une paraffine) et de l'eau comme matériaux de stockage d'énergie thermique en utilisant une approche numérique. Le domaine créé est un domaine de calcul axisymétrique 2D, simulé par ANSYS. Les paramètres étudiés étaient

Chapitre I. Etude bibliographique

l'énergie stockée à l'intérieur du matériau, la température du FTH et la température du milieu de stockage. Les résultats montrent que le MCP A44 stocke environ 4 fois plus d'énergie que l'eau, mais que l'eau charge le système environ 3 à 3,9 fois (selon la longueur du tube) plus rapidement que la paraffine.

Kousksou et al. [13] présentent une analyse de six types de paraffine, avec l'air comme fluide de travail, pour un réservoir cylindrique. Ils concluent que l'efficacité du système augmente avec l'augmentation de la vitesse d'entrée et la diminution de la température de fusion des MCP.

Zhang et al. [14] ont mené une expérience pour étudier le changement de phase de fusion dans un composite ss-MCP à base de paraffine et de mousse de cuivre. Ils ont constaté qu'au stade initial, le front de fusion était presque parallèle à la frontière de chauffage, indiquant que la conduction thermique dominait le transfert de chaleur du changement de phase. Avec le temps, une plus grande quantité de MCP a fondu et le MCP liquide chaud s'est écoulé vers le haut sous l'effet de la flottabilité, ce qui a accéléré la fusion du MCP supérieur.

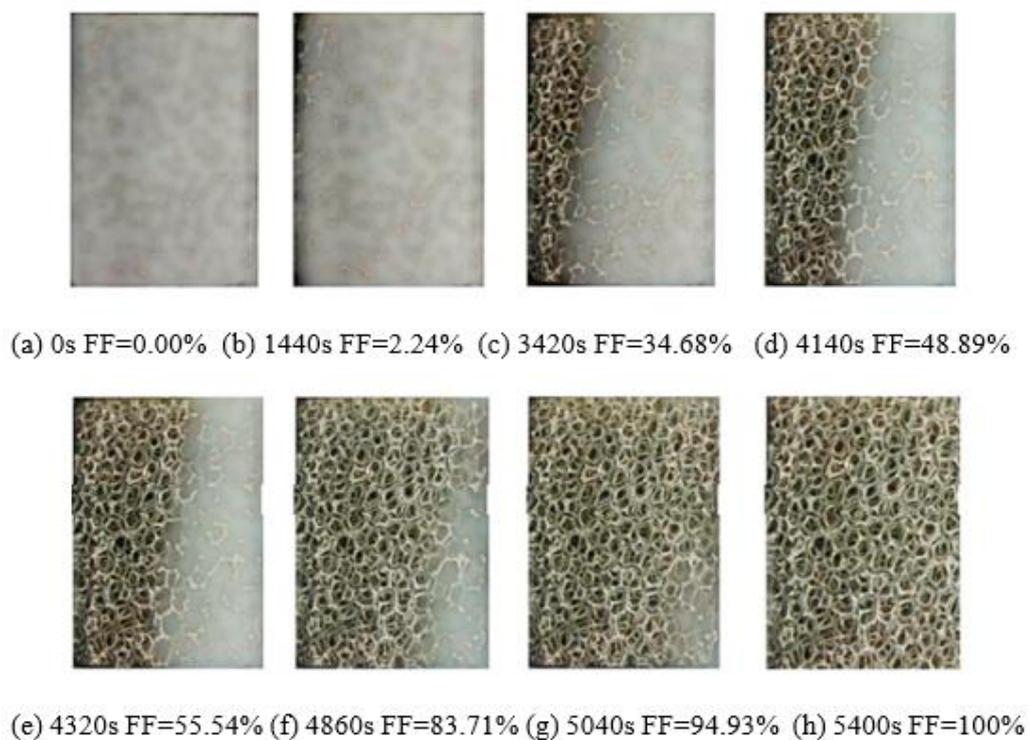


Fig. 1.1. Évolution de l'interface des phases solide/liquide dans des conditions de paroi chauffée à gauche (FF : fraction de fusion) [15]

Par conséquent, le front de fusion a pris une forme inclinée. Un phénomène similaire est trouvé dans la recherche d'Al-Jethelah et al. [15]. Les résultats des expériences sont représentés sur la Fig. I.1 sont démontré plusieurs étapes avec les différents mécanismes de transfert de chaleur dominants. Comme le montre la Fig. I.2, au stade initial de 1000 s, l'interface de fusion était presque parallèle à la limite de chauffe gauche, indiquant que la conduction dominait le transfert de chaleur. Avec le temps, plus de MCP a fondu et plus de MCP liquide à haute température s'est écoulé vers le haut, poussant l'interface supérieure solide/liquide à se déplacer. En conséquence, une interface en forme de pente s'est formée. À ce stade, la convection naturelle est prépondérante dans le transfert de chaleur par changement de phase. Les résultats de la simulation concordent bien avec les observations expérimentales présentées à la (Fig. 1.2).

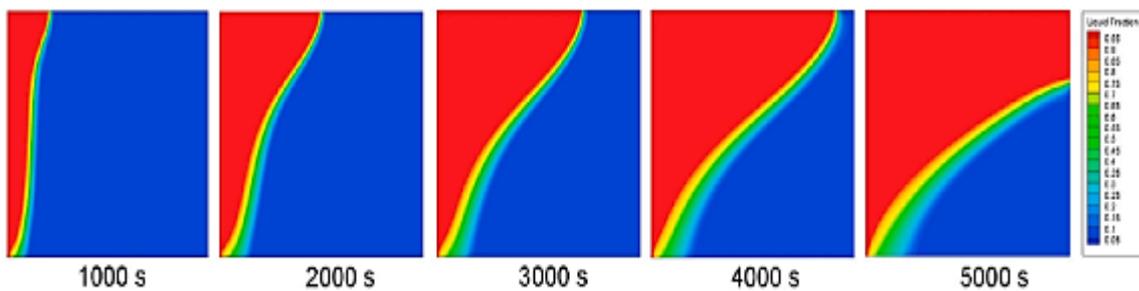


Fig. 1.2. Évolution de l'interface solide/liquide d'un composite paraffine/mousse

La Fig. 1.3 montre les champs de température simulés de ces deux composants. La température de la mousse métallique est généralement plus élevée que celle du MCP, notamment dans la région solide du MCP où la conduction thermique domine le transfert de chaleur. La différence de température entre le squelette poreux et le MCP est importante dans la région pâteuse car le MCP est en phase de fusion et la chaleur est absorbée sous forme de chaleur latente. Après la fusion complète du MCP, la convection naturelle se produit dans la région liquide et améliore le transfert de chaleur, et ainsi, la différence de température devient très faible.

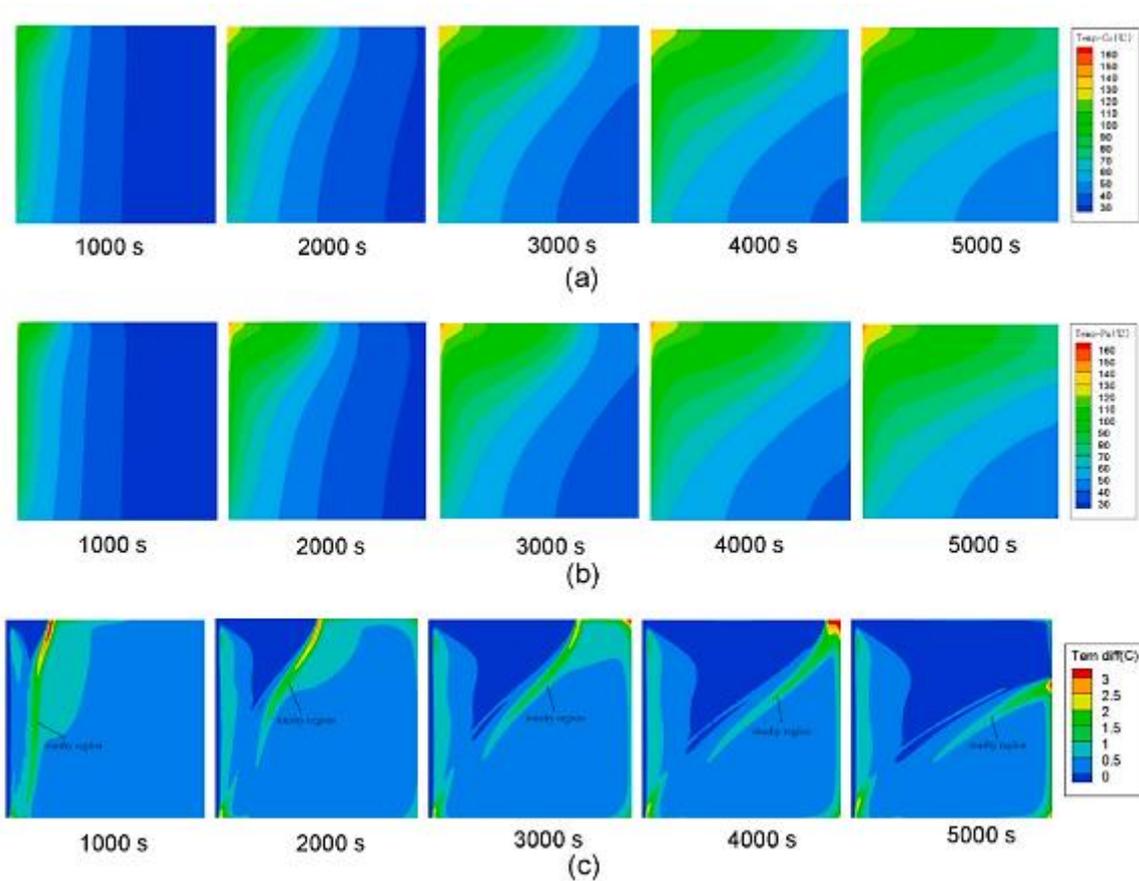


Fig. 1.3. Champ de température et champ de différence de température du ss-MCP poreux simulé par Zhang et al [14] : (a) mousse de cuivre ; (b) paraffine ; (c) différence de température entre la mousse de cuivre et la paraffine.

Afin de comparer les effets de la conduction thermique et de la convection naturelle sur le processus de changement de phase, Yang et al. [16] ont réalisé une simulation dans un domaine de 76,2 mm (longueur) \times 152,4 mm (hauteur) \times 25,4 mm (largeur) Fig. 1.4. Si l'on ne tient pas compte de la convection naturelle, le front de fusion est parallèle à la paroi chauffée pendant tout le processus de changement de phase, car s'est supposé que le MCP liquide ne s'écoule pas. En revanche, en tenant compte la convection naturelle, une interface en forme de pente se forme. Bien que l'influence de la convection naturelle soit indéniable, la conduction thermique joue un rôle plus important. De ce point de vue, cela explique également la raison pour laquelle l'ajout de supports à haute conductivité thermique améliore le taux de transfert de chaleur global bien qu'il supprime la convection naturelle.

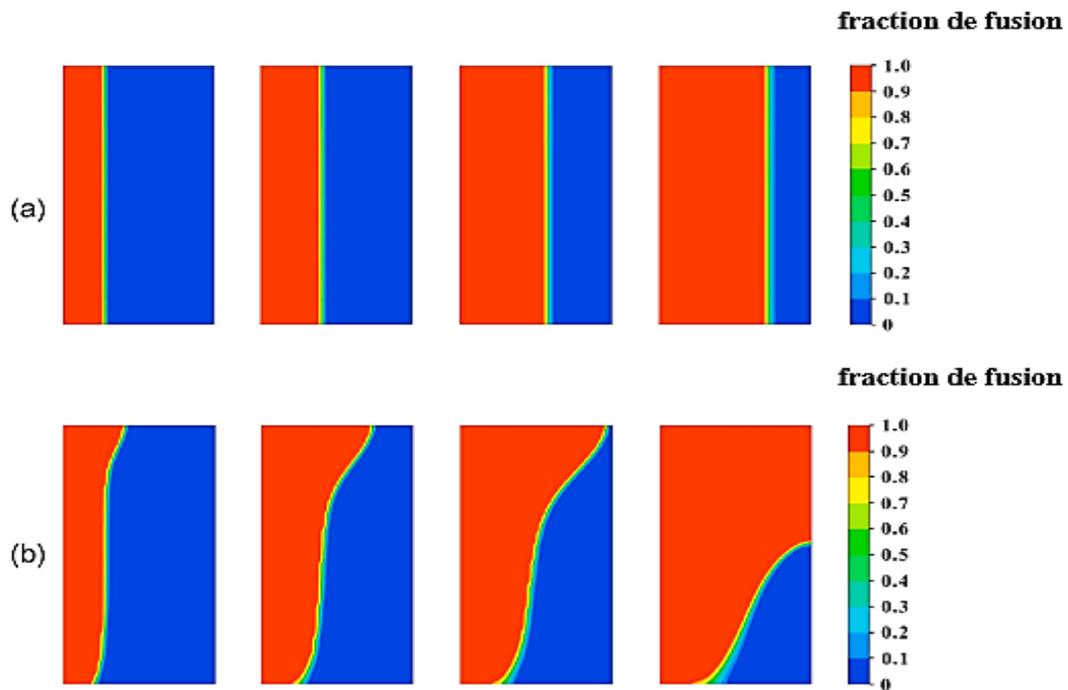


Fig. 1.4. Propagation de l'interface solide/liquide (a) sans considérer la convection naturelle (b) en considérant la convection naturelle [16].

Kanzawa [17,18], l'utilisation de MCP avec différents points de fusion a donné de meilleurs résultats que l'utilisation d'un seul type de MCP dans la capsule cylindrique. Le taux de transfert de chaleur a ainsi augmenté de 15 % durant la période de chaleur latente, tandis qu'aucun changement n'a été observé pour la chaleur sensible. Dans la même veine, Wang et al. [19] ont obtenu un résultat similaire en mode de fusion pour trois couches de MCP, indiquant qu'il était plus performant qu'une seule couche de MCP.

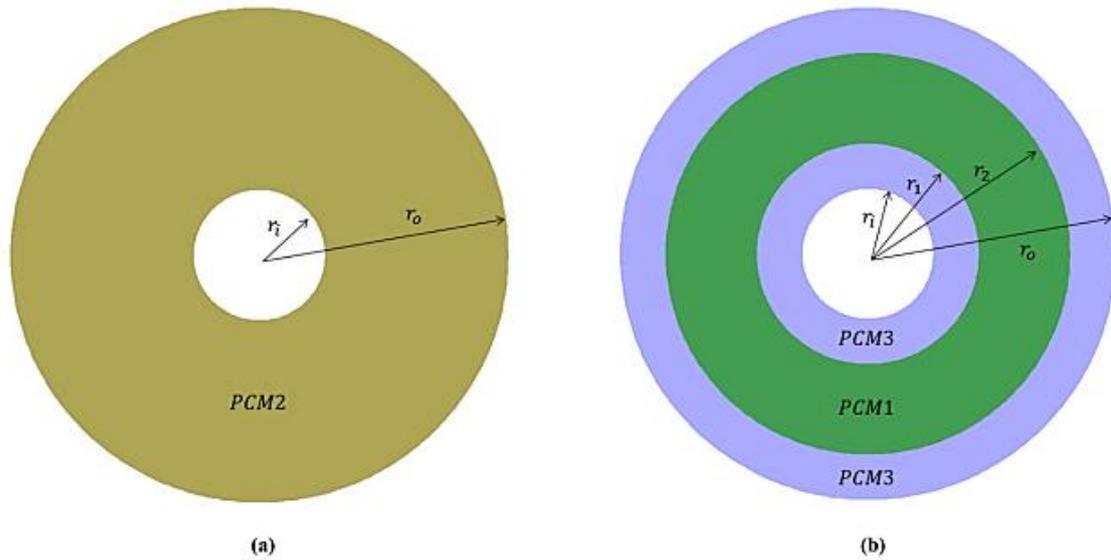


Fig. 1.5. Domaine de calcul bidimensionnel : (a) MCP à 1 couche, (b) MCP à 3 couches.

Korti et al. [20] ont étudié expérimentalement le processus de charge et de décharge du LHTES cylindrique rempli par trois types de paraffine. Ils ont traité les effets de la température d'entrée du HTF, du débit massique et du type de MCP pendant les deux processus (charge et décharge). La température d'entrée a un effet significatif sur les performances de l'unité thermique et peut accélérer la phase de charge de 54,5% et retarder la phase de décharge de 48,5%. L'ajout d'huile moteur à la paraffine peut améliorer la vitesse du processus de charge et de décharge de 42,4 et 66 % respectivement.

La figure 1.6 montre la photographie du processus d'évolution de la fusion d'un MCP pendant le processus de charge, pour un débit volumique de 25 l/h et une température d'entrée de 78 °C. La figure montre que le processus de fusion du MCP se développe de haut en bas, confirmant que la température du MCP augmente rapidement en haut de l'échangeur par rapport au bas. Dans un premier temps, ils ont constaté que la fusion se développe de manière axisymétrique (42 min) et se déforme par la suite (54 min). Ce phénomène s'explique par la présence de la conduction thermique qui domine le transfert de chaleur au début. Ensuite, la convection naturelle se produit et domine progressivement le transfert de chaleur par rapport à la conduction. A 60 min, une quantité de MCP solide a du mal à fondre au fond de l'échangeur. La convection

naturelle est à l'origine de ce phénomène car elle favorise la dissipation de la chaleur vers le haut.

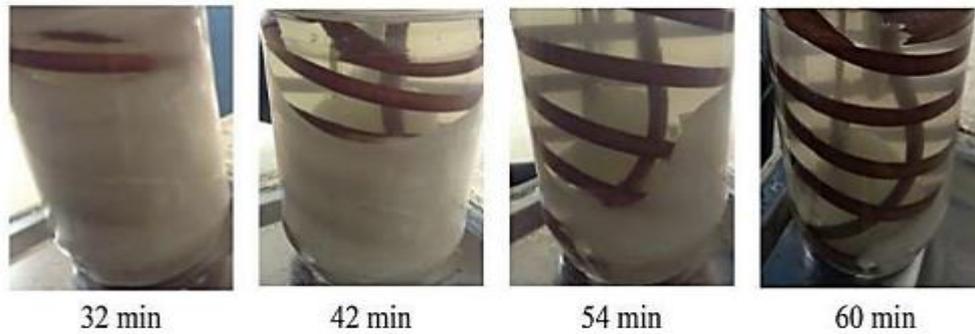


Fig. 1.6. Evolution de la fusion du MCP pendant le processus de charge pour un débit volumique de 25 l/h [20].

La Fig. 1.7 montre la photographie du processus d'évolution de la solidification du MCP pendant la phase de décharge, pour un débit volumique de 25 l/h et une température d'entrée de 16 °C. Au début, ils constatent un premier processus de solidification autour du tuyau qui est refroidi par le HTF froid en circulation. Un second processus de solidification progresse de bas en haut de l'échangeur contrairement au processus de fusion. Ce comportement est dû à la présence de la convection naturelle dans la phase liquide, qui favorise la dissipation de la chaleur vers le haut. Ce phénomène favorise le refroidissement du MCP par le bas où la solidification commence.

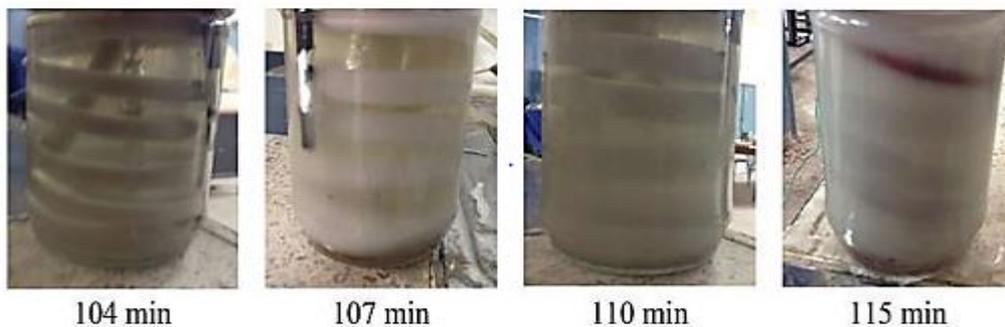


Fig. 1.7. Evolution de la solidification du MCP au cours du processus de décharge pour un débit volumique de 25 l/h [20].

Senthil et al. [21] ont étudié numériquement en utilisant l'approche enthalpie-porosité le comportement thermique du MCP dans une cavité à différentes inclinaisons de 0° , 45° , 135° , 180° et 225° . Ils ont constaté que le temps de fusion de l'enceinte horizontale était inférieur à la moitié de celui de l'enceinte verticale. L'intensité de la convection naturelle s'est avérée plus faible pour une inclinaison de 45° que pour les autres inclinaisons. En effet, la chaleur est transférée naturellement du bas vers le haut. Une inclinaison de 225° provoque le temps le plus court pour une fusion complète. Par conséquent, l'inclinaison du système peut modifier la vitesse de fusion. La convection naturelle dans le MCP liquide dépend fortement de l'emplacement de la paroi chaude. La fraction liquide pour une orientation horizontale est supérieure à celle de l'orientation verticale.

La Fig.1.8 montre les photos séquentielles et le profil de fusion du front pendant le processus de fusion de la paraffine sur différents angles d'inclinaison de la cavité (90° , 0° et 45°). Les temps sélectionnés correspondent approximativement à la même évolution de la fraction liquide pour les différentes inclinaisons. [22]

Pour mieux comprendre le comportement du flux thermique de convection pendant la fusion de la paraffine, une caméra infrarouge a été utilisée pour enregistrer le champ de température sur la face avant de la cavité pour les trois différents angles. De plus, la Fig.1.9 représente l'évolution temporelle de la position et de la forme de l'interface solide-liquide estimée en fonction des 3 inclinaisons.

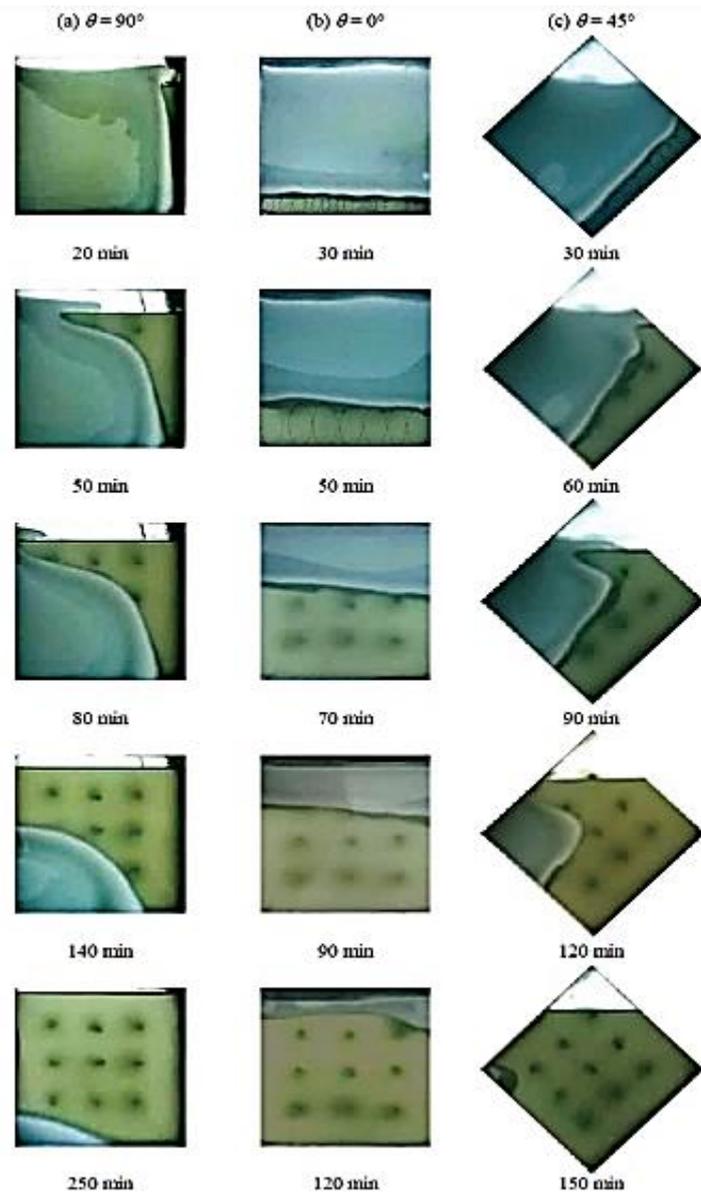


Fig. 1.8. Évolution temporelle du processus de fusion de la paraffine chauffée selon 3 angles différents [22].

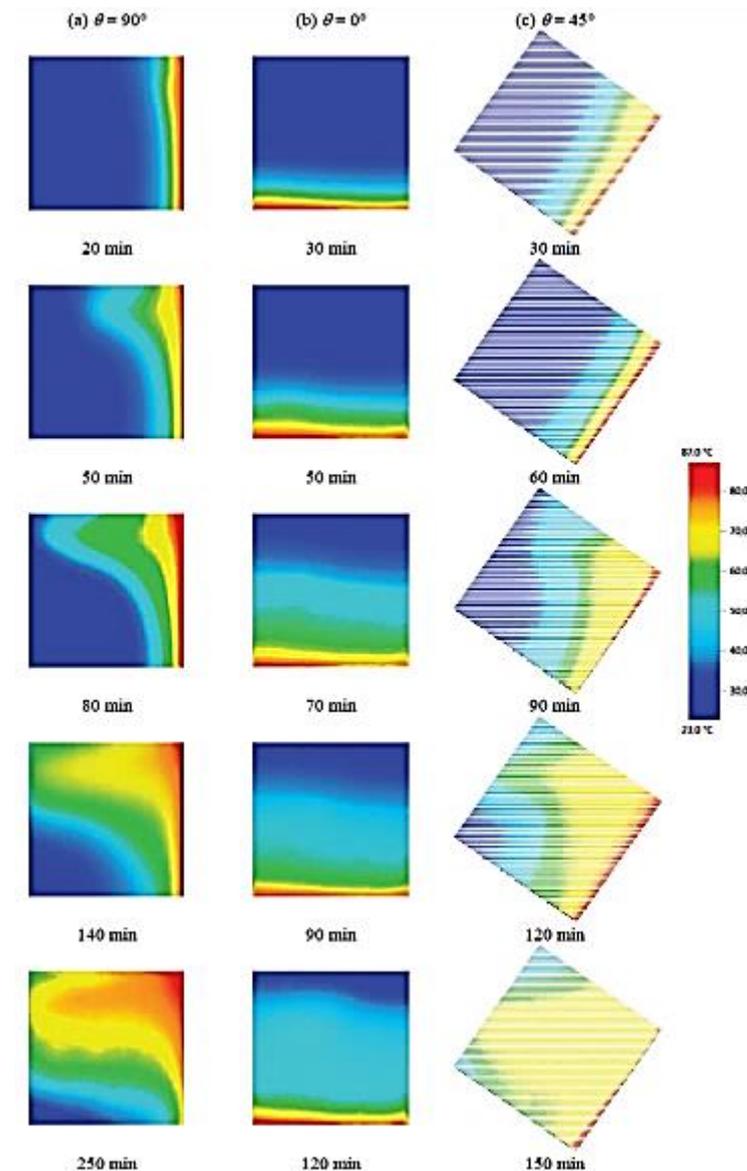


Fig. 1.9. Image infrarouge du champ de températures selon 3 angles différents

Guellil et al. [23] ont étudié expérimentalement les performances d'une nouvelle unité LHTES utilisant un échangeur à tubes en U à ailettes rempli de paraffine. L'étude a montré que l'utilisation des ailettes améliore l'énergie stockée plus de cinq fois. L'augmentation de l'alimentation électrique de 32% diminue l'intervalle moyen de fusion de 34% et retarde le temps de début de solidification d'environ 30%.

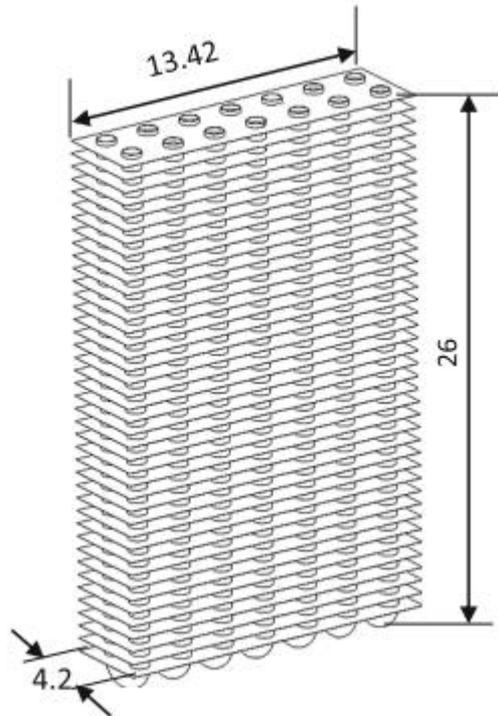


Fig. 2.10. Type d'échangeur à tubes en U à ailettes remplis de MCP et comprenant des thermocouples de type K.

Guellil et al. [24] ont montré dans un travail expérimental que la fusion de la paraffine se développe en trois zones : solide, liquide et pâteuse. Au cours de la fusion, la phase liquide monte vers le haut et la phase solide reste en bas sous une forme conique. La zone pâteuse sépare les deux phases. La paraffine liquide descend le long de l'interface solide-liquide en libérant progressivement de la chaleur. La fusion de la paraffine s'accompagne d'une expansion volumétrique assez importante d'environ 3%. La fusion complète est atteinte après 1h15min (Fig.1.10). Le temps de solidification complète est assez long par rapport au temps de fusion, il dure jusqu'à 135min (Fig.1.11) car le refroidissement se fait par convection naturelle moins intense que celle de la phase de fusion.

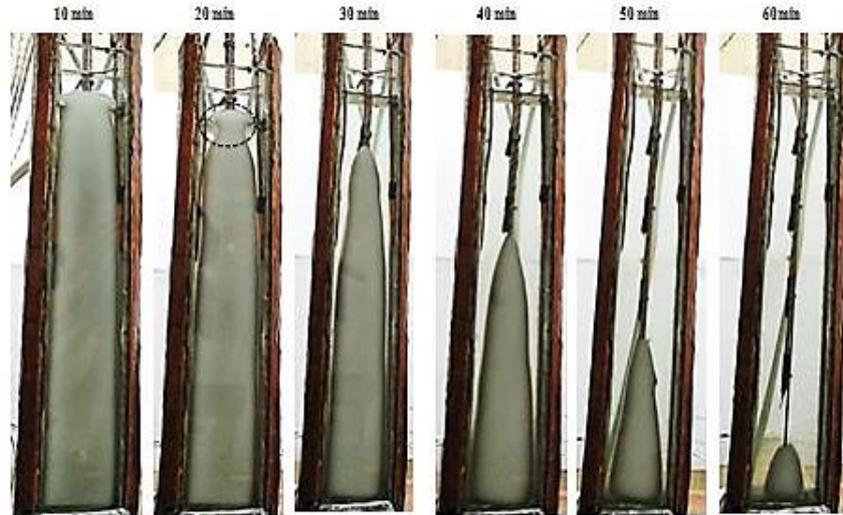


Fig. 1.11. L'évolution de l'interface solide/liquide durant la fusion de la paraffine

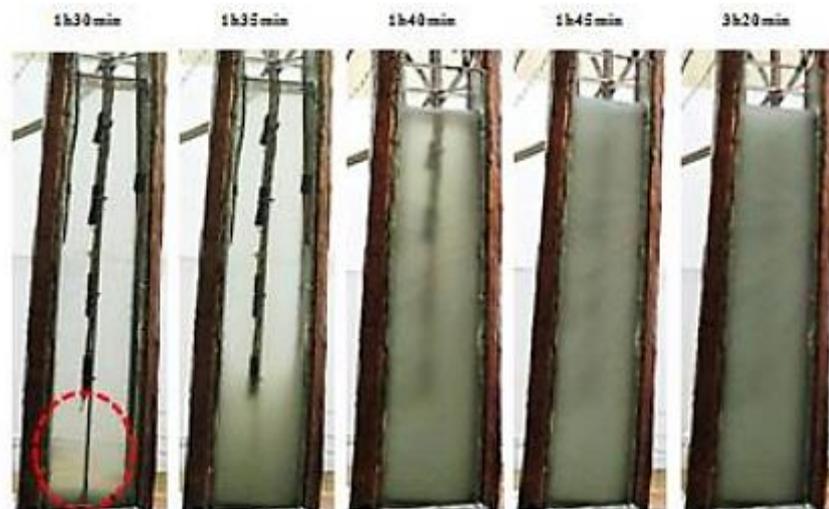


Fig. 1.12. L'évolution de l'interface solide/liquide durant la solidification de la paraffine

Missoum [25] a étudié expérimentalement le processus de fusion de la paraffine dans une cavité carrée en verre pour permettre la visualisation de l'interface solide-liquide. L'étude a d'abord été réalisée sur la paraffine seule, puis des matériaux de faible conductivité thermique (Zamak et Aluminium) ont été ajoutés pour améliorer la conductivité thermique de la paraffine. Les résultats ont montré que le Zamak n'améliorait pas la fusion de la paraffine, mais que l'aluminium améliorerait significativement sa conductivité thermique. Elle a conclu que plus la conductivité

Chapitre I. Etude bibliographique

thermique des matériaux ajoutés est élevée, plus l'accélération du processus est importante.

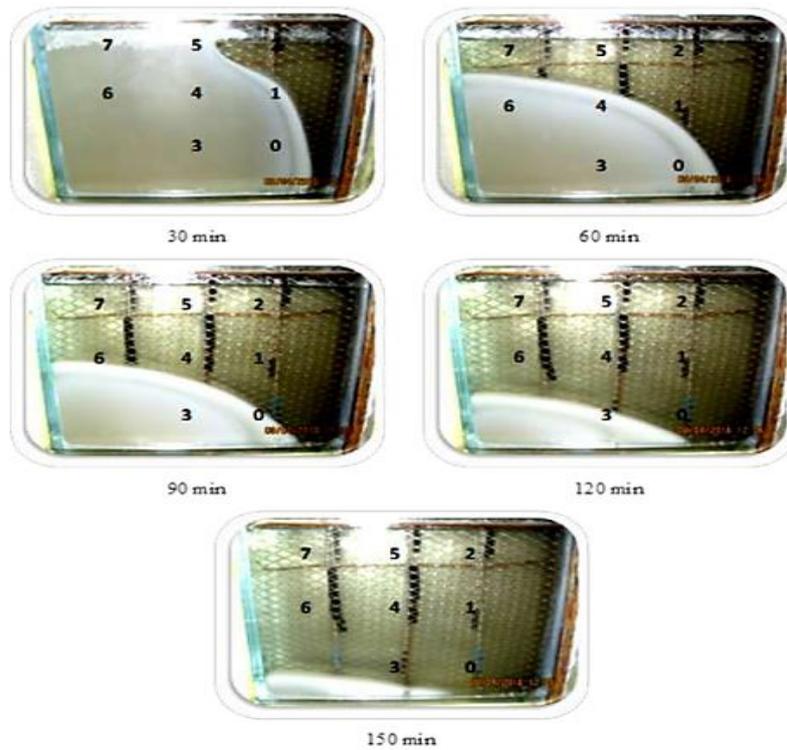


Fig. 1.13. Evolution temporelle de la fusion de la paraffine avec une grille en Zamak [25].

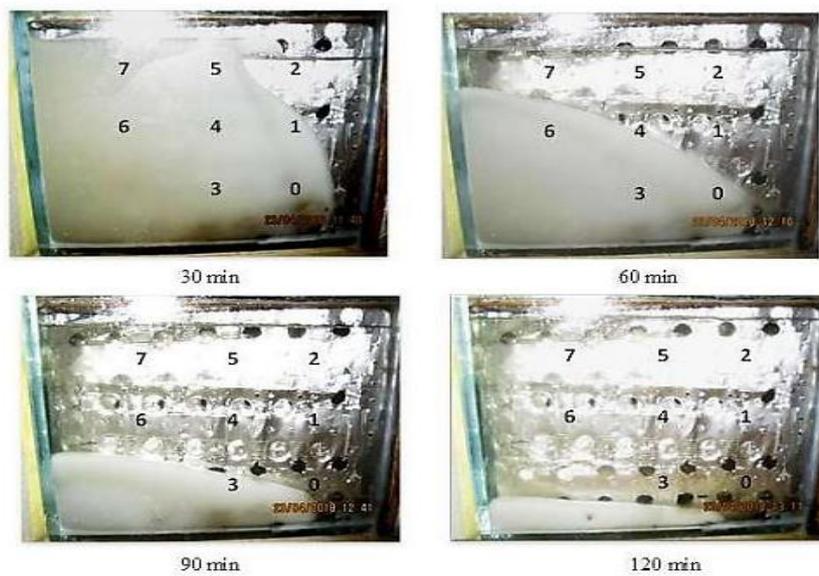


Fig. 1.14. Evolution temporelle de la fusion de la paraffine avec une grille en l'aluminium [25].

Zhang et al. [26] ont proposé une méthode d'analyse des données par la méthode T-history des MCP pour le processus de solidification. Cette méthode a ensuite été améliorée par Hong et al. [27] pour inclure la possibilité de changement de température du matériau pendant la transformation de phase et pour déterminer la fin du processus de transition de phase avec une plus grande précision. En tenant compte de ces améliorations, les paramètres thermo physiques d'un MCP peuvent être traduits par les équations suivantes, appelées ci-après méthode Z/H :

$$c_{p,l} = \left(\frac{m_{t,w}c_{p,t} + m_w c_{p,w}}{m_p} \frac{A_1}{A'_1} \right) - \frac{m_{t,p}}{m_p} c_{p,t} \quad (1)$$

$$c_{p,s} = \left(\frac{m_{t,w}c_{p,t} + m_w c_{p,w}}{m_p} \frac{A_3}{A'_3} \right) - \frac{m_{t,p}}{m_p} c_{p,t} \quad (2)$$

$$\Delta h = \left(\frac{m_{t,w}c_{p,t} + m_w c_{p,w}}{m_p} \frac{A_2}{A'_2} (T_m - T_i) \right) - \left(\frac{m_{t,p}}{m_p} c_{p,t} + \frac{c_{p,l} + c_{p,s}}{2} \right) (T_m - T_i) \quad (3)$$

Dans les équations ci-dessus, m_p , m_w et $m_{t,p}$, $m_{t,w}$ sont les masses du MCP, de l'eau et des tubes utilisés pour le MCP et l'eau. $C_{p,w}$ et $C_{p,m}$ représentent respectivement la chaleur spécifique de l'eau et celle du tube. La température de surfusion et la température de solidification sont chacune désignées par T_s et T_m , tandis que T_i est la température d'inflexion déterminée comme le point d'inflexion de la courbe de dérivée de la température. En outre, les valeurs fixées des aires A_1, A_2, A_3 et A'_1, A'_2, A'_3 correspondent aux calculs de surface sous les courbes de température du MCP et de l'eau vers l'environnement de l'air. Chacune d'entre elles représente la phase liquide sensible, la phase liquide/solide et la phase solide sensible du MCP et la phase liquide sensible correspondante pour l'eau de référence.

Si le tube à essai contenant le MCP fondu est soudainement plongé dans de l'eau froide dont la température est inférieure à la température de fusion du MCP, la solidification peut être initiée. Si le rapport entre la hauteur et le diamètre du tube est supérieur à 15, comme l'ont souligné Zhang et al. [26], le transfert de chaleur du MCP vers l'eau pendant la solidification est approximativement unidimensionnel (1D). Par conséquent, l'équation de diffusion de chaleur transitoire 1D pour une géométrie cylindrique peut s'écrire comme suit [28] :

$$\frac{k_s}{\rho_s c_{p,s}} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \right) = \frac{\partial T(r,t)}{\partial t}$$

$$(r_{int} < r < R, t > 0)$$

où k_s est la conductivité thermique solide, ρ_s est la densité solide, $C_{p,s}$ est la chaleur spécifique solide du MCP et $T_{r,t}$ est la température du MCP au rayon r et au temps t .

À tout moment, les conditions de l'interface solide/liquide sont les suivantes (Fig.1.15)

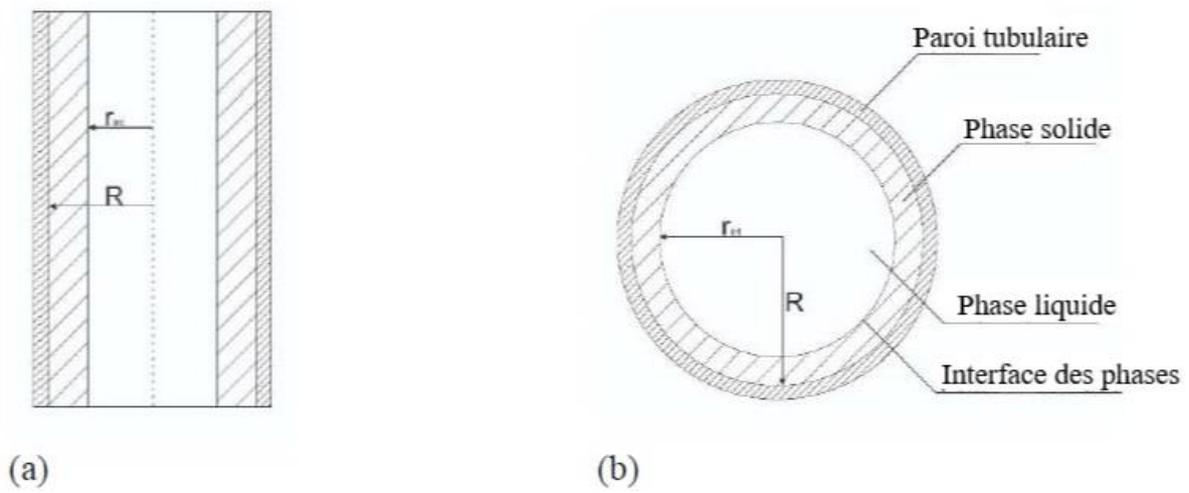


Fig. 1.15 (a) élévation frontale et (b) coupe transversale du MCP dans le tube pendant le changement de phase liquide-solide, montrant la coexistence de deux phases avec une frontière de phase.

La conductivité thermique effective du MCP à l'état solide peut être exprimée comme suit

$$k_s = \frac{[1+Ste]}{4 \left[\frac{t_f(T_m - T_w)}{\rho_s R^2 h_m} + \frac{1}{h_w R} \right]}$$

où t_f est le temps nécessaire à la solidification complète et Ste est le nombre de Stefan. La formule peut être simplifiée en négligeant le deuxième terme du dénominateur [26], la formule devient :

$$k_s = \frac{[1+Ste]}{4 \left[\frac{t_f(T_m - T_w)}{\rho_s R^2 h_m} \right]}$$

Chapitre I. Etude bibliographique

De même, si le tube contenant le MCP solide est plongé dans un bain d'eau chaude, dont la température est légèrement supérieure à T_m , l'expression de la conductivité thermique effective du MCP à l'état liquide peut être obtenue par :

$$k_l = \frac{[1+Ste]}{4 \left[\frac{t_m(T_w - T_m)}{\rho_l R^2 h_m} \right]}$$

Où $= C_{p,l}(T_w - T_m)/h_m$, $C_{p,l}$ est la chaleur spécifique du liquide et ρ_l est la densité du liquide du MCP.

Chapitre II : Généralités sur le stockage thermique et les matériaux à changement des phases

II.1 Introduction

Le stockage d'énergie est la conservation d'une quantité d'énergie en vue d'une utilisation ultérieure. Par extension, le terme désigne également le stockage de matériaux contenant de l'énergie. La mise en œuvre du stockage de la chaleur nécessite souvent des compromis sur la capacité de stockage, le rendement énergétique ou le stockage et les pertes.

Les méthodes de stockage dépendent du type d'énergie. Les sources d'énergie fossiles (charbon, gaz, pétrole), sous forme de réservoirs à l'état naturel, remplissent naturellement la fonction de stockage. Une fois extraites, elles peuvent être facilement isolées, logées et transportées d'un point de vue technique.

II.2 Différents types de stockage

L'énergie peut être stockée par différentes options :

II.2.1 Le stockage d'énergie mécanique

Les systèmes de stockage d'énergie mécanique comprennent le stockage d'énergie gravitationnelle, le stockage d'énergie hydraulique par pompage (PHPS), le stockage d'énergie à air comprimé (CAES) et les volants d'inertie [29]

Il existe deux formes de stockage mécanique :

- Le stockage potentiel : eau ou air comprimé
- Le stockage cinétique : volant d'inertie [30].

II.2.2 Le stockage d'énergie électrique

Le stockage de l'électricité vise à résoudre quatre problèmes principaux : la récupération de la production d'énergie dépassant la demande actuelle, la fourniture d'énergie pour compenser les déficits dus à l'intermittence de l'approvisionnement, la fourniture d'énergie pour répondre à un pic occasionnel de la demande et la fourniture d'énergie en cas de défaillance du système électrique ou de mauvaise qualité du réseau local.

- Supraconducteurs magnétiques : stockage électromagnétique.

- Photovoltaïque : batteries, accumulateurs

II.2.3 Le stockage d'énergie chimique

Tout combustible peut être considéré comme un stockage d'énergie sous forme chimique. Le stockage chimique est basé sur l'énergie de liaison des composés chimiques impliqués dans des réactions chimiques réversibles.

Hydrogéné :

- Stockage en nappe aquifère
- Stockage en phase liquide ou fortement comprimée.

Biomasse : Stockage par photosynthèse.

II.2.4 Le stockage d'énergie thermochimique

L'utilisation d'un réactif dont la réaction chimique réversible est endothermique et exothermique ; c'est la seule technique permettant de stocker la chaleur à haute densité (500 kWh/m³), à haute température (jusqu'à 1200 °C).

II.2.5 Le stockage d'énergie thermique

L'utilisation différée de l'énergie est l'idée courante qui vient à l'esprit lorsqu'on parle de stockage.

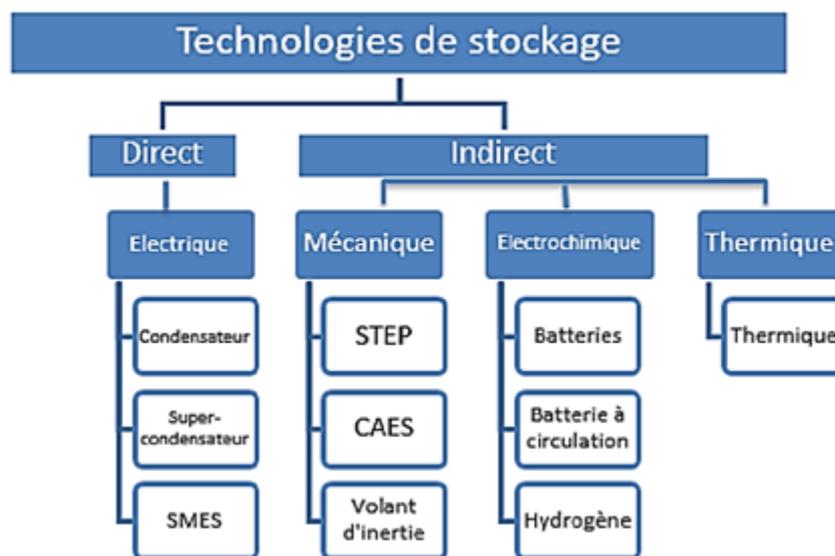


Fig. 2.1. Différentes technologies de stockage

II.3 Définition de stockage thermique

L'énergie peut également être stockée sous sa forme thermique, puis libérée sous forme de chaleur. Le stockage de l'énergie thermique est une solution particulièrement intéressante car elle permet de séparer l'utilisation de l'énergie de sa production [31].

Le stockage de l'énergie thermique (TES) peut être obtenu en refroidissant, chauffant, fondant, solidifiant, vaporisant, ou un matériau avec de l'énergie sous forme de chaleur devient disponible lorsque le processus est inversé.

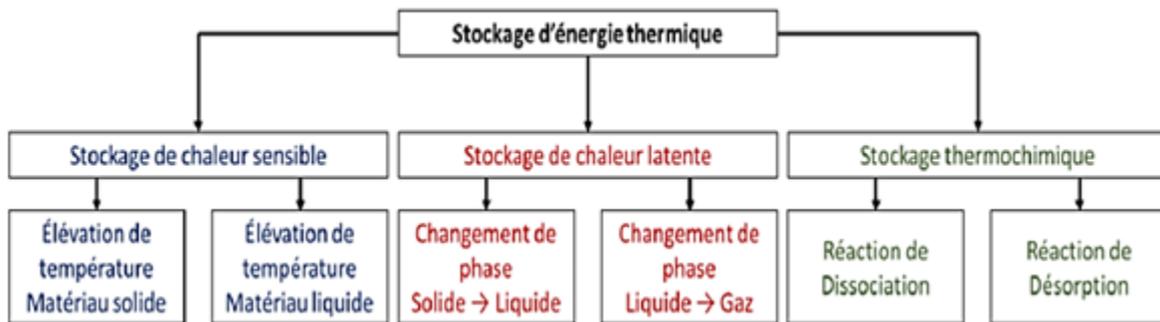


Fig. 2.2. Différentes méthodes utilisées au stockage de l'énergie thermique [32].

II.4 Principes du stockage d'énergie

Le stockage d'énergie thermique comprend trois types :

- Le stockage par chaleur sensible.
- Le stockage par chaleur latente.
- Le stockage par chaleur thermochimique.

II.4.1 Le stockage d'énergie thermique par chaleur sensible

De toutes les techniques de stockage de la chaleur, le stockage de chaleur sensible est la plus ancienne solution de stockage de la chaleur. Elle consiste à appliquer de la chaleur à un matériau pour modifier sa température sans changer son état. Le matériau est caractérisé par sa capacité thermique, notée C_p , exprimée en $J/(kg.K)$, qui traduit sa capacité à stocker de la chaleur (J) par unité de masse (kg) et de température (K). L'énergie stockée est alors donnée par la formule suivante :

$$E = m \Delta H = m C_p \Delta T \quad (2.1)$$

Avec :

m : Masse du matériau soumis au changement de température

H : Enthalpie de masse

C_p : Capacité thermique du matériau

ΔT : différence de température de fonctionnement du stockage. ($T_2 - T_1$)

On distingue les deux cas suivants :

- Si $T_2 > T_1$ on parlera du stockage de la chaleur.
- Si $T_2 < T_1$ on parlera du stockage de froid.

Ainsi, en fonction de l'état physique du matériau de stockage, le stockage de chaleur sensible présente deux variantes :

- Le stockage par chaleur sensible avec un matériau liquide.
- Le stockage par chaleur sensible avec un matériau solide.

II.4.2 Les matériaux de stockage à chaleur sensible

A- Le stockage par chaleur sensible avec un matériau liquide

❖ **Stockage de chaleur par l'eau** : L'eau est le meilleur moyen de stockage à basse température. Elle possède la plus grande capacité thermique massique par rapport aux autres corps, et elle est bon marché et facilement disponible. Les différentes formes de stockage de la chaleur par l'eau sont :

- Le réservoir
- Les nappes aquifères naturelles en sous-sol...etc. [33]
- Le stockage par les autres fluides

❖ **Huiles organiques** : Ils ont une pression de vapeur inférieure à celle de l'eau et peuvent être utilisés à des températures variant entre 300 et 350 °C pour éviter la décomposition.

❖ **Sels fondus** : Le plus courant est l'hydroxyde de sodium. Son point de fusion est de 320 °C et il est possible de l'utiliser à des températures supérieures à 800 °C. Cependant, il est très corrosif et difficile à stocker à haute température [34].

B- Le stockage par chaleur sensible avec un matériau solide

La pierre, le métal, le béton, le sable et la brique sont les matériaux généralement utilisés pour le stockage thermique à basse et haute température car ils ne peuvent ni geler ni bouillir [35].

Dans leur état de l'art du stockage thermique à hautes températures, Gil et al. [36] proposent une liste très complète de matériaux permettant le stockage thermique en chaleur sensible dans le cas de la production d'énergie à grande échelle. Une sélection de quelques-uns de ces matériaux est indiquée dans le Tableau suivant.

Tableau 2.1. Matériaux pour le stockage thermique à chaleur sensible

Matériau	Température (°C)		Etat	Densité (kg/m ³)	Conductivité thermique (W/ (m.K))	Capacité thermique (J/kg.K)	Capacité thermique volumique (kWh/m ³)
	Basse	Haute					
Béton armé HT	200	400	Sol	2500	1.5	850	118
NaCl (sel)	200	500	Sol	2160	7	850	153
Fonte	200	400	Sol	7200	37	560	224
Briques réfractaires	200	1200	Sol	3500	5	1150	958
Huile minérale	200	300	Liq	770	0.12	2600	55
Sels de carbonate	450	850	Liq	2100	2	2000	420
Vapeur surchauffée	100	300	Gaz	0.4	0.04	2	4.10 ⁻⁵

Le stockage thermique par chaleur sensible est très facile à mettre en œuvre mais nécessite de grands volumes et masses de matériaux afin de stocker une grande quantité d'énergie. Pour éviter les grandes dimensions, une autre solution consiste à stocker la chaleur sur une très large plage de température selon la relation 2.1. Mais ceci va dans

le sens inverse de notre objectif permettant de maintenir la température du récepteur constante le plus longtemps possible. Une alternative est d'utiliser la chaleur latente.

II.4.3 Le stockage d'énergie thermique par chaleur latente

Le stockage de la chaleur latente est une solution de stockage thermique qui exploite la chaleur latente d'un matériau à changement de phase (MCP), c'est-à-dire sa capacité à passer d'un état à un autre état sous l'effet de la chaleur. De plus, il permet de stocker de la chaleur sous forme de chaleur latente de fusion à une température constante, cette température correspondant à la température de la transition de phase [33]. Il existe plusieurs sources de chaleur latente :

Chaleur latente de liquéfaction : quantité de chaleur nécessaire pour passer du solide au liquide.

Chaleur latente de vaporisation : quantité de chaleur passant du liquide au gaz.

Chaleur latente de condensation : quantité de chaleur nécessaire pour passer de l'état gazeux à l'état liquide.

Chaleur latente de solidification : quantité de chaleur pour passer du liquide au solide [37].

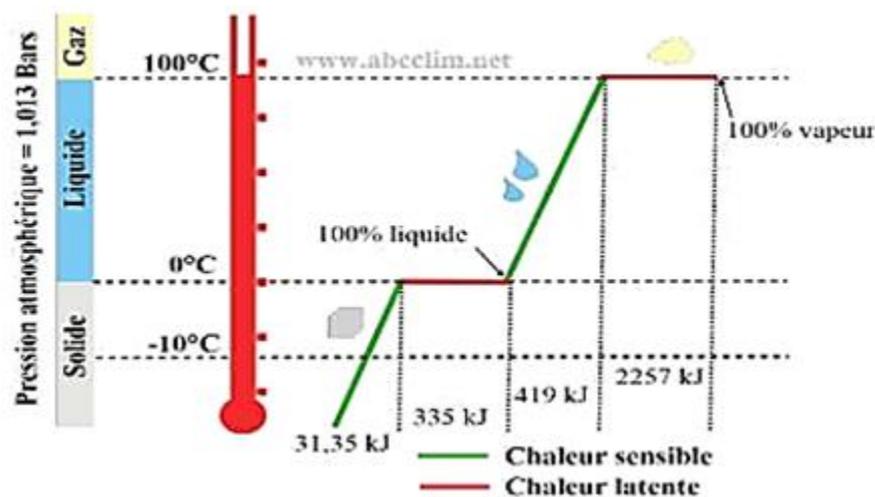


Fig. 2.3. Stockage par chaleur sensible et latente

Le stockage par la chaleur latente consiste à exploiter la quantité d'énergie impliquée dans le changement d'état d'un corps. La règle des phases implique qu'à la pression atmosphérique et pour un corps pur, ce changement d'état se produit à

Chapitre II. Généralités sur le stockage thermique et les MCP

température constante. La quantité utilisée pour quantifier l'énergie échangée par un matériau est la chaleur latente de changement de phase notée L_f (f pour fusion) pour un changement de phase liquide/solide, et L_v (v pour vaporisation) pour un changement de phase liquide/vapeur. Elle est exprimée en J/kg.

Supposons un corps solide pur à la température T_1 de masse m avec une température de fusion T_F , telle que $T_1 < T_f < T_2$. L'énergie stockée à pression constante est quantifiée par la variation d'enthalpie selon la formule suivante :

$$H_2 - H_1 = \int_{T_1}^{T_f} m C_{p_s}(T) dT + m L_f + \int_{T_f}^{T_2} m C_{p_l}(T) dT \quad (2.2)$$

$C_{p_s}(T)$: Capacité thermique de la substance à l'état solide J/(kg.K).

$C_{p_l}(T)$: Capacité thermique de la substance à l'état liquide J/(kg.K).

L_f : Chaleur latente de changement de phase.

Gil et al. [36] dressent un tableau regroupant les propriétés thermophysiques moyennes des grandes catégories de matériaux à changement de phase. Il est possible d'utiliser un métal, de la roche, de l'eau, des paraffines ou des matériaux qualifiés d'organiques (fabriqués par les êtres-vivants) ou de non organiques.

Tableau 2.2. Matériaux pour le stockage thermique à chaleur latente (Gil 2010)

Matériau	Densité (kg/m ³)	Conductivité thermique (W/ (m.K))	Capacité calorifique (J/ (kg.K))	Chaleur latente (J/kg)	Masse pour stocker 1 GJ/tonne	Masse de stockage relative
Métal (cuivre)	8940	400	385	205000	173	40
Roche	2240	1.5	1000		67	15
Eau	1000	0.6	4200	333000	16	4
MCP organiques	800	1	2000	190000	5.3	1.25
MCP inorganiques	1600	2	2000	230000	4.35	1

II.4.4 Stockage d'énergie thermique par voie thermochimique

Le terme de stockage thermochimique recouvre deux phénomènes : la sorption et la réaction chimique. Le stockage de chaleur par sorption est intéressant pour le stockage à basse température ($T \approx 80 \text{ °C}$) alors que pour les applications de type solaire concentré ($T \approx 200 \text{ à } 1000 \text{ °C}$), les réactions de synthèse chimique semblent les plus adaptées.

La voie thermochimique exploite la réversibilité des réactions chimiques pour stocker de l'énergie. En général, les réactions sont de la forme :



Les réactions les plus couramment rencontrées sont de la forme suivante :



Pour ce type de stockage, la réaction impliquée doit être totalement réversible afin que le processus ne perde pas sa capacité de stockage au cours des cycles. Le schéma du stockage thermochimique de la chaleur est présenté à la Fig. 2.4.

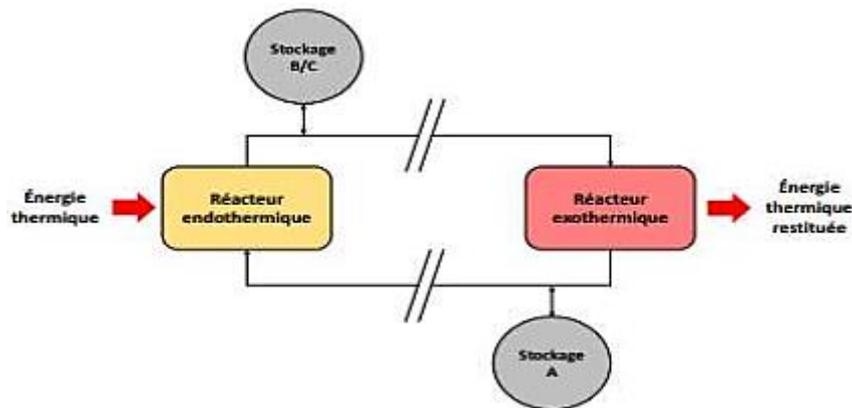


Fig. 2.4. Schéma de principe d'un système de stockage par voie thermochimique

II.5 Les matériaux à changement de phase

II.5.1 Définition

Un matériau à changement de phase ou MCP est un matériau capable de changer d'état physique dans une plage de température limitée. Cette plage se situe approximativement entre 10 et 80 °C. Dans cette plage de températures, le changement

de phase prédominant est la fusion/solidification. Ces températures sont naturellement accessibles et sont omniprésentes dans notre vie quotidienne (température d'une maison, température d'un corps humain, de l'eau chaude...) [38].

II.5.2 Intérêts des matériaux à changement de phase

Il est important de noter que les quantités d'énergie impliquées dans le processus de changement de phase sont beaucoup plus importantes que celles impliquées dans le transfert de chaleur sensible. C'est grâce à ces transferts latents qu'il est aujourd'hui possible de réduire significativement le volume d'un élément de stockage d'énergie (compacité), ou la quantité d'énergie contenue dans un seul volume de stockage (densité énergétique).

II.5.3 Les caractéristiques idéales d'un MCP

Les caractéristiques idéales d'un MCP sont présentées à titre indicatif et classées en quatre catégories : propriétés thermodynamiques et thermiques, propriétés cinétiques, propriétés chimiques propriétés chimiques, propriétés sociétales (économie, sécurité, environnement) [39].

a) Propriétés thermodynamiques et thermiques

- Une température de fusion dans la plage de température souhaitée.
- Une grande chaleur latente de fusion par unité de masse.
- Haute densité, pour réduire le volume de stockage.
- Bonne conductivité thermique, pour améliorer le transfert de chaleur et réduire les gradients de température nécessaires pendant la charge et la décharge.
- Bonne chaleur spécifique, pour bénéficier des effets du stockage en chaleur sensible.
- Une faible variation de volume pendant le changement de phase, pour pouvoir utiliser des géométries simples de capsules et d'échangeurs.

b) Les propriétés cinétiques

Le matériau ne doit pas présenter de surfusion pour que la chaleur stockée puisse être restituée à la même température que la température de stockage. La surfusion est la

capacité du MCP à descendre sous le point de cristallisation tout en restant sous forme liquide. Il s'agit d'un état métastable qui est rompu soit par une perturbation extérieure (choc, impureté), soit par abaissement de la température jusqu'au point de nucléation, c'est-à-dire lorsque le premier germe de solide apparaît. Ainsi, si cette surfusion est assez importante, la chaleur est restituée à une température plus faible que la température de stockage. Il est remarqué dans la littérature qu'un degré de surfusion de 5-10 °C peut aller jusqu'à empêcher la décharge du système de stockage. De plus, la vitesse de cristallisation est déterminante pour les performances du système de stockage. Si le produit met beaucoup de temps à cristalliser, il cédera sa chaleur très lentement et limitera la puissance échangée avec le fluide caloporteur.

c) Les propriétés chimiques

- Relatif à la température: pas de décomposition chimique dans la plage de température de fonctionnement du stockage. Fusion congruente, de sorte que la composition chimique du MCP ne change pas avec le temps.

- Par rapport au milieu environnant : Pas de corrosion avec les matériaux de construction pas de risque d'inflammabilité ou d'explosion au contact de l'atmosphère.

d) Propriétés sociétales (économie, sécurité, environnement)

- Le MCP doit être disponible en grandes quantités.
- Être bon marché.
- Être non toxique pour les êtres vivants.
- Être recyclable en fin de vie.

II.5.3 Types des matériaux à changement de phases

En 1983, Abhat [40] a donné une classification générale des matériaux, utilisée depuis par la communauté scientifique du stockage latent. Cette classification est illustrée sur la Fig. 2.5.

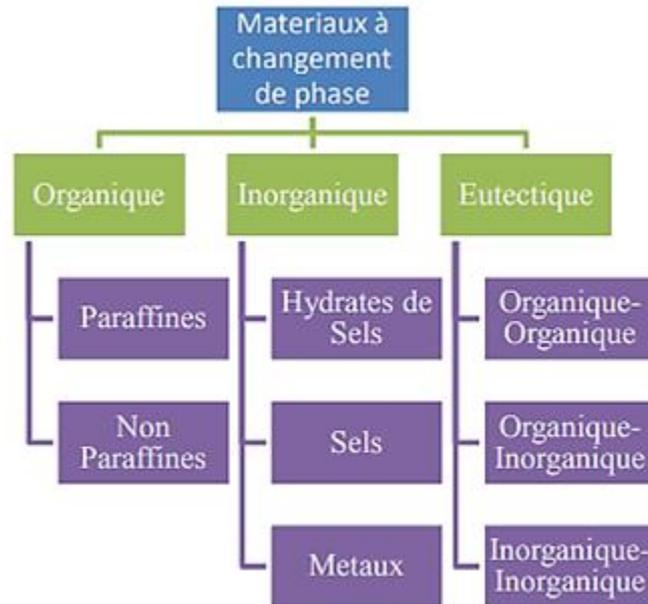


Fig. 2.5. Types des matériaux à changement de phases

On peut classer les MCP selon trois catégories :

Les composés organiques : de propriétés thermiques moindres que les sels hydratés, ils sont utilisés en particulier pour le stockage de chaleur latente. Parmi ces composés, on trouve les paraffines ; les acides gras, les polyalcools.

Les composés minéraux (inorganiques) : ils ont l'avantage de posséder des grandes chaleurs latentes et des prix bas, leur principal défaut concerne leur tendance à la surfusion. Parmi ces composés : les sels, les métaux, les alliages et les sels hydratés.

Les eutectiques : ils peuvent être organiques et/ou inorganiques.

II.5.4 Les composés organiques

a) Paraffines

Les paraffines sont une famille d'hydrocarbures saturés dont la formule empirique est C_nH_{2n+2} et dont les propriétés sont très similaires. Les MCP solides-liquides, sont les plus utilisés, notamment pour les applications à basse température (-10 à 100 °C), car ils présentent l'avantage d'avoir une chaleur latente qui dépend de la masse molaire et des températures de changement de phase variables, ce qui permet de choisir le MCP approprié pour chaque application. Dans cette catégorie, on peut citer notamment les

paraffines n-Hexa décane ($T_f = 22 \text{ °C}$), n-Nonacosane ($T_f = 63,4 \text{ °C}$) ou encore le n-Triacontane ($T_f = 65,4 \text{ °C}$) [41].



Fig. 2.6. Paraffine brutes, en capsulées, en poudre ou en granulées

➤ Avantages

- Plus la longueur moyenne de la chaîne hydrocarbonée est longue, plus la température de fusion et la chaleur latente sont élevées.
- Les paraffines ne montrent pas de tendance à la ségrégation des phases lors de leur transition et sont chimiquement stables.
- Elles ont une faible pression de vapeur saturante qui limite les risques de vaporisation.
- Certaines sont considérées comme non toxiques, inoffensives écologiquement et compatibles avec les réservoirs métalliques car elles ne provoquent pas ou peu de corrosion.
- Facilement disponibles et peu coûteuses.

➤ Inconvénients

- Leur conductivité thermique reste très faible ($\approx 0,25 \text{ W/m.K}$).
- Elles présentent une expansion volumique assez élevée ($\approx 15 \%$).
- Une masse volumique peu importante. ($\approx 800 \text{ kg/m}^3$).
- Les paraffines ont tendance à s'infiltrer dans certains plastiques et à les ramollir.

b) Les composés organiques non-paraffinés

Il s'agit de la plus importante catégorie de matériaux aptes pour le stockage de la chaleur latente. Lane (1983, 1989) [42], Abhat [43] (1983 et Buddhi et coll. (1994) ont mené une recherche approfondie sur les matières organiques et ont identifié un certain nombre d'esters, d'acides gras, d'alcools et de glycols convenables pour le stockage de l'énergie. Les composés organiques non-paraffinés sont les MCP les plus nombreux, avec des propriétés très variées. Chacun de ces matériaux possède ses propres propriétés, contrairement aux paraffines, qui ont des propriétés très similaires. Ces matériaux sont inflammables et ne devraient donc pas être exposés aux trop hautes températures, aux flammes ou aux agents oxydants. Les matières organiques non-paraffinées sont divisées en deux groupes : les acides gras et les autres matières organiques (Öztürk, 1997) [44]. La formule chimique générale des acides gras est $\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_{2n} \text{COOH}$ et ils ont relativement une haute enthalpie de changement de phase. Les acides gras ont une haute stabilité thermique et ne subissent pas le phénomène de sous-refroidissement. Cependant, selon (Abhat, 1983). Ils sont plus chers que les paraffines et sont corrosifs. Certaines des caractéristiques de ces matériaux organiques sont les suivantes :

- Forte chaleur de fusion.
- Inflammabilité.
- Faible conductivité thermique.
- Faible point d'éclair

II.5.5 Les composés inorganiques

a) Les sels hydratés

Les hydrates de sels peuvent être considérés comme des alliages de sels minéraux et d'eau formant un solide cristallin typique de formule générale $\text{AB}_n \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Les plus importantes propriétés des hydrates de sels sont les suivantes :

- La température de fusion élevée
- Une haute enthalpie de fusion
- Une conductivité thermique élevée

En dépit de ces propriétés les hydrates de sels ont certains inconvénients importants tels que la fusion accompagnée de la séparation de phase, du sous-refroidissement et d'être corrosifs. Les méthodes élaborées pour empêcher la séparation de phase dans l'utilisation des hydrates de sels comme MCP sont l'épaississement et la gélification. Dans la première méthode, un agent épaississant est ajouté pour augmenter la viscosité de l'hydrate de sel et dans le second, l'hydrate de sel est stabilisé dans les pores d'un gel polymère. (Lane, 1983). [42]. La plupart des sels hydratés ont également de pauvres propriétés de nucléation, impliquant la surfusion de la phase liquide avant la cristallisation. Une solution à ce problème consiste à ajouter un agent de nucléation, qui fournit le nucléon (germe) qui permet d'amorcer la cristallisation. Une autre possibilité consiste à conserver certains cristaux, dans une zone froide du milieu, pour servir de noyaux pour l'amorçage de la cristallisation. Les problèmes principaux concernant la plupart des hydrates salins sont selon Jotshietal [45].

- La surfusion (ou sous -refroidissement) : On traite ce problème en ajoutant un agent de nucléation.
- La ségrégation de phase : Lorsque la fusion n'est pas congruente, on observe une ségrégation de phase. Pour prévenir ce problème plusieurs techniques ont été testées comme l'utilisation d'agents épaississants. Comme agents épaississants on utilise de la cellulose, de la fécule, de la sciure, du gel de silice, de la silice..., etc. Ces types d'agents épaississants fonctionnent bien, mais ils sont finalement soit hydratés par le sel ou décomposés par les bactéries, et ils deviennent inefficaces
- La perte d'eau d'hydratation en répétant le cycle thermique. Ce problème peut être évité en rajoutant une quantité d'eau supplémentaire dans l'hydrate et/ou en utilisant un stockage parfaitement étanche

II.5.6 Eutectiques

Les MCP eutectiques sont des mélanges de deux ou plusieurs substances qui se comportent comme un corps pur, c'est-à-dire que leur température de changement d'état est unique. En général, les eutectiques sont des mélanges de MCP organiques et inorganiques. On peut citer les eutectiques de nitrates tel que $\text{LiNO}_3\text{-NH}_4\text{NO}_3\text{-NaNO}_3$

avec une composition massique de 25%-65%-10% ($T_f = 80.5 \text{ °C}$) ou encore les eutectiques d'organiques tel que $\text{CH}_3\text{CONH}_2\text{-C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$ avec une composition massique de 50%-50% ($T_f = 65 \text{ °C}$), les eutectiques d'hydrates de sels comme le mélange iso massique $\text{Mg}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}\text{-MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ($T_f = 59.1 \text{ °C}$) et enfin les eutectiques de polyols comme le mélange à 25 % molaire d'érythritol et 75% de xylitol, ($T_f = 85 \text{ °C}$)[46].

II.6 Classe de MCP

Il existe plusieurs classes de MCP, les plus utilisés sont :

II.6.1 Matériaux changement de phase SP

La création de mélanges de chaleur latente SP a conduit à une nouvelle classe innovante de MCP ininflammables. Le SP est constitué d'une composition unique d'hydrates de sel et de composés organiques qui rend le cycle véritablement stable sans détérioration dans le temps [47].



Fig. 2.7. MCP Class SP.

II.6.2 Matériaux changement de phase RT

Le stockage de l'énergie thermique par un matériau RT absorbe une grande quantité de chaleur, appelée chaleur latente, à une température relativement constante. Lorsque ce processus de changement de phase est inversé, c'est-à-dire lorsqu'on passe d'un liquide à un solide, la chaleur latente précédemment stockée est libérée.



Fig. 2.8. MCP Class RT

Le RT est disponible dans une large gamme de températures de fonctionnement allant de -10 à environ 82 °C. La plupart des températures peuvent être fabriquées sur mesure [47].

Tableau 2.3. Propriétés thermiques de certains MCP [46]

Matériaux		Température de fusion (°C)	Enthalpie de fusion (kJ/kg)
MCP Organiques	Tétradécane	5.5	226
	Hexadécane	16.7	237
	Stéarate de butyle	19	140
MCP Inorganiques	KF.4H ₂ O	18.5	231
	Mn(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	25.8	125.9
	Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O	32	251
MCP Eutectiques	66.6% CaCl ₂ .6H ₂ O+33.3% MgCl ₂ .6H ₂ O	25	127
	48% CaCl ₂ +4,3% Na Cl+47.3% H ₂ O	26.8	118
	47% Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O+53% Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	30	136

Etude comparative des composés organiques, inorganiques et eutectiques

Les principaux avantages et inconvénients des MCP organiques, inorganiques et écologiques sont présentés sur le tableau suivant.

Tableau 2.4. Avantages et inconvénients des MCP

Types	Avantages	Inconvénients
Organiques	<ul style="list-style-type: none"> -Simple d'utilisation -Non corrosif -Pas de surfusion -Disponible pour un large Gamme de température -Compatible avec les matériaux conventionnels de construction -Réactifs et recyclables 	<ul style="list-style-type: none"> -Généralement cher -Faible chaleur latente -Large de changement d'état -Peut être inflammable -Fortes variations de volume lors du changement de phase
Inorganiques	<ul style="list-style-type: none"> -Forte chaleur latente de fusion -Bonne conductivité thermique -Fusion nette (plage de fusion étroite) -Bon marché et facilement disponible 	<ul style="list-style-type: none"> -Corrosif pour la plupart des métaux -Décomposition de phase -En rapport avec la ségrégation et la corrosion et surfusion
Eutectique	<ul style="list-style-type: none"> -Ils ont un point de fusion net similaire à une substance pure -Leurs chaleurs latentes volumétriques sont légèrement supérieures à celle des composés Organiques purs 	<ul style="list-style-type: none"> -Les données seulement limitées sont disponible sur propriétés thermo-physiques comme l'usage de de ceux-ci les matières sont très nouvelles application au stockage thermique.

II.7 Quelques phénomènes affectant l'efficacité du stockage

II.7.1 La surfusion

La surfusion désigne l'état liquide d'un corps lorsque sa température est inférieure à la température de cristallisation Fig. 2.9. Elle ne se produit que pour certains types de MCP tels que les matériaux inorganiques (sels hydratés). Les solutions à ce problème sont multiples :

- Incorporation d'additifs tensio-actifs
- Faciliter la nucléation par des cristaux solides stables autour de la température de cristallisation : ceux-ci servent de points d'ancrage pour la cristallisation du matériau.
- Garder une zone froide à l'intérieur du matériau

La surfusion empêche l'utilisation de la chaleur latente du changement de phase à la température souhaitée. Inversement, dans certaines applications, le surrefroidissement peut être un avantage [48].

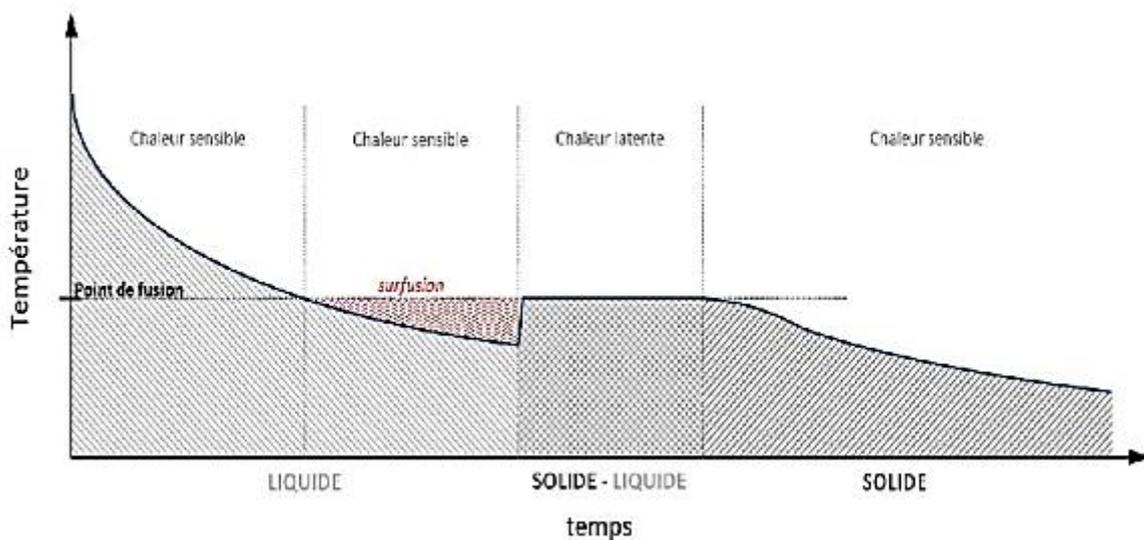


Fig. 2.9. Surfusion lors du refroidissement d'un MCP [46].

II.7.2 La surchauffe

La surchauffe d'un corps est le réchauffement de ce corps après son changement d'état (réchauffement de la phase liquide après la fusion du corps, de la phase vapeur après la vaporisation du corps). Si cette surchauffe est de courte durée, elle n'est considérée que comme une chaleur sensible supplémentaire stockée dans le système.

S'il est réalisé sur une longue période, le stockage de chaleur latente perd la plupart de ses avantages par rapport au stockage de chaleur sensible [49].

II.7.3 La dilatation

Pendant le changement de phase du solide au liquide, le matériau change de densité et donc de volume. Cela peut poser un problème dans certaines applications, notamment lorsqu'on utilise un récipient fermé qui doit supporter l'augmentation de la dépression [49].

II.8 Quelques idées pour améliorer le transfert de chaleur dans un système de stockage latent

L'utilisation des MCP comme matériaux de stockage, et en particulier la transition solide-liquide, présente l'inconvénient d'une faible conductivité thermique. Pendant le processus de décharge, l'énergie libérée par la solidification du MCP doit être transportée de l'interface solide-liquide au fluide de transfert de chaleur en passant par la couche solide émergente autour de la surface de transfert. De cette façon, le coefficient de transfert global est limité par la conductivité thermique du MCP solide au moment de la décharge, ce qui constitue souvent le processus de dimensionnement dans de nombreuses applications. Cela rend possible [50] :

- D'agir sur le MCP pour améliorer sa conductivité thermique ou le coefficient d'échange global dans le réservoir.
- De mettre le MCP en mouvement en utilisant des technologies innovantes pour provoquer une convection forcée du MCP autour d'une surface de transfert et améliorer ainsi le coefficient d'échange global.
- D'intégrer le MCP dans un échangeur de chaleur ou des capsules et améliorer le transfert de chaleur en augmentant la surface d'échange.

Dans la figure ci-dessous, nous pouvons voir les pistes envisagées à ce jour pour améliorer le transfert de chaleur dans un système de stockage de chaleur latente.

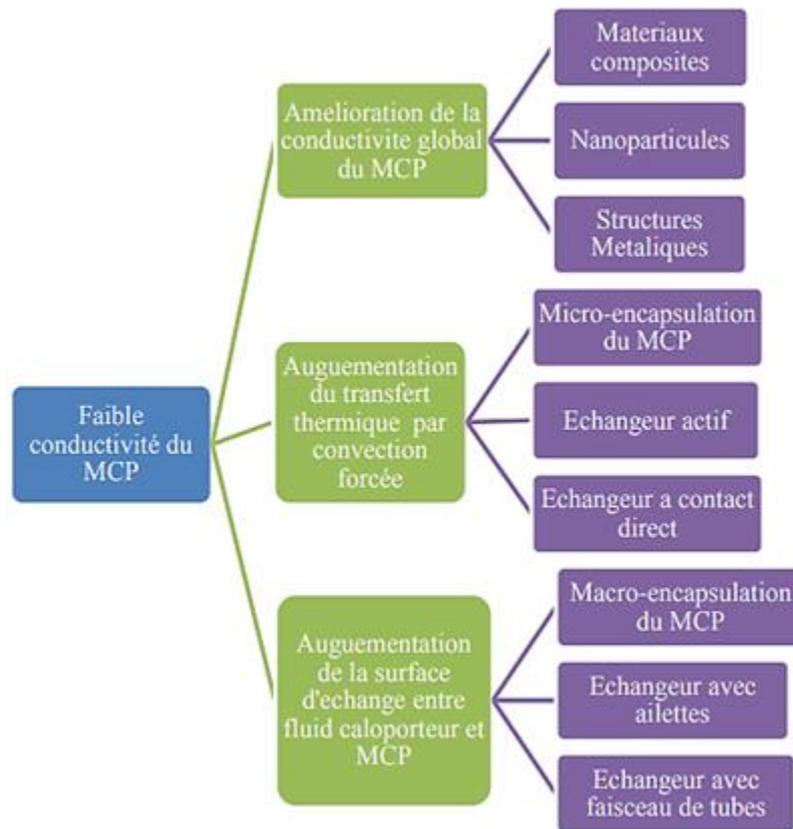


Fig. 2.10. Pistes d'amélioration du transfert thermique dans les systèmes de stockage par chaleur latente [50]

II.9 Applications des MCP

II.9.1 Stockage de l'énergie thermique

Les MCP stockent l'énergie par un changement de phase solide-liquide (fusion), puis restituent la chaleur par un changement de phase liquide-solide (solidification). Un MCP connu pour cette application est l'acétate de sodium trihydraté, dont le point de fusion est d'environ 58 °C. Ce matériau a été utilisé dans des conteneurs montés sur camion pour stocker la chaleur des incinérateurs de déchets ménagers. L'énergie est ensuite libérée à distance vers des stations équipées à une température d'environ 50 °C [46].

II.9.2 Le textile

Les MCP sont également présents dans l'industrie textile où ils sont utilisés sous forme de microcapsules placées au cœur des fibres, qui absorbent, stockent et libèrent

l'énergie de manière réactive afin de se réchauffer lorsqu'il fait froid ou de se refroidir lorsqu'il fait chaud.

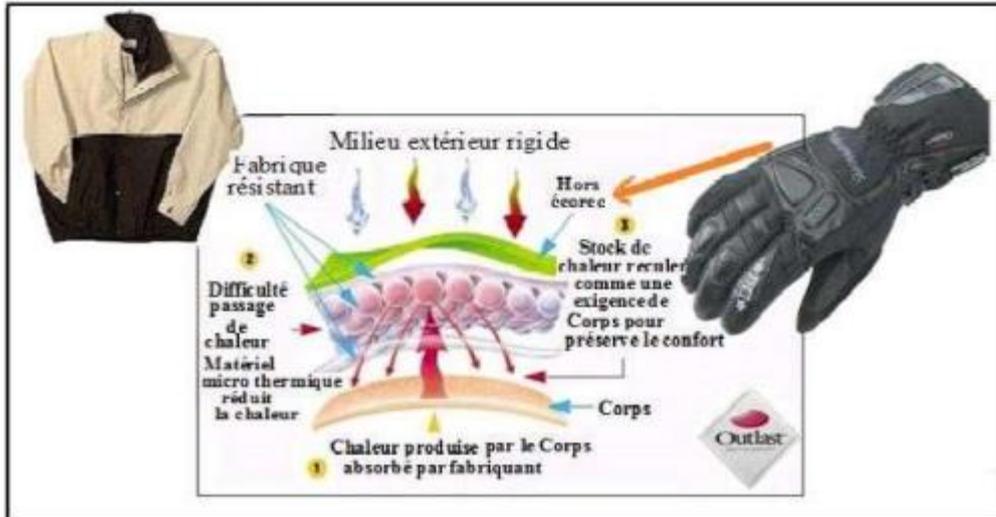


Fig. 2.11. L'efficacité de MCP dans les textiles

Les MCP agissent pour réguler le transfert de chaleur entre le corps humain et le monde extérieur. Les applications les plus nombreuses dans ce domaine se situent actuellement autour de :

- Des vêtements de montage et de sport.
- Des textiles techniques à usage médical.
- Des vêtements de travail et de sécurité.

II.9.3 Applications médicales

Dans le secteur médical, une des applications principales est le transport de sang Fig. 2.12 et organes. Récipients usagé pour ce travail des buts semblable à ceux expliqués avant. D'autres applications médicales peuvent être des coussinets chauds ou froids pour traiter la douleur locale dans le corps [51]



Fig. 2.12. Récipients en MCP utilisés pour transporter le sang et les organes

II.9.4 Climatisation passive

L'utilisation de tels matériaux présente un double intérêt :

- En raison de leur grande compacité, les MCP permettent au bâtiment d'acquérir une forte inertie thermique et d'être ainsi moins sensible aux variations quotidiennes de température. Selon des études, il est possible de réduire les pics de température dans un bâtiment jusqu'à 7 à 8 °C en utilisant une telle isolation.
- Le phénomène de changement de phase permet l'absorption d'une partie de la chaleur de la pièce dès que la température ambiante dépasse la température de fusion du matériau. Cette différence de température entre le matériau et la pièce (réserve d'énergie) va se réduire et la température de la pièce va tendre vers celle du matériau, dans la mesure où l'échange d'énergie qui a lieu entre les deux systèmes est quasi-isotherme pour le MCP, c'est l'environnement qui va voir sa température baisser pour permettre la fusion du MCP.

II.9.5 L'isolation des bâtiments

Les matériaux à changement de phase sont présents dans les bâtiments principalement sous la forme de plaques où les MCP sont encapsulés. L'énergie stockée dans les parois n'est pas transmise à l'intérieur du bâtiment. Pendant les périodes de surchauffe, le MCP fond et la chaleur est stockée, lorsque le bâtiment se refroidit, le MCP se solidifie et l'énergie stockée est libérée. Dans une certaine plage de température, le MCP augmente donc l'inertie thermique du bâtiment.



Fig. 2.13. Climatisation passive (gauche), Isolation du bâtiment (droite)

II.9.6 Le transport de produits alimentaires

Les MCP sont utilisés dans les industries alimentaires, pharmaceutiques et médicales pour minimiser les variations de température des denrées alimentaires, des médicaments ou des composants sensibles, par exemple dans le cas du transport du sang. Ils se présentent principalement sous la forme de petits "sacs" en plastique contenant le matériau choisi, placés au plus près du produit à conserver [52].



Fig. 2.14. Emballage isotherme passif transport de médicament

Conclusion

L'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) pour le stockage de l'énergie thermique a été étudiée par de nombreux chercheurs, et de nombreux produits sont donc disponibles dans la littérature et sur le marché. Les problèmes techniques rencontrés par le passé dans l'utilisation de ces matériaux à changement de phase ont été étudiés et différentes solutions ont été présentées, donnant à l'utilisateur la possibilité d'être sûr que les systèmes conçus sont efficaces. Néanmoins, des recherches sont encore

Chapitre II. Généralités sur le stockage thermique et les MCP

nécessaires pour trouver de nouveaux matériaux plus efficaces et moins chers, et pour apporter de meilleures solutions aux problèmes techniques tels que la surfusion, la ségrégation et la compatibilité des matériaux à changement de phase.

Chapitre III : Procédure expérimentale

III.1 Introduction

Le stockage de l'énergie thermique basé sur des matériaux à changement de phase (MCP) offre de meilleures performances de stockage de la chaleur que les matériaux TES courants tels que la brique, le béton, la pierre, qui ne stockent que la chaleur sensible. En effet, les MCP peuvent stocker et libérer des quantités relativement importantes d'énergie thermique autour de leur point de transition de phase (température de fusion pour la transition de phase solide-liquide) sous la forme de chaleur latente et sensible avec de faibles variations de température. Les performances de stockage de chaleur d'un MCP sont généralement déterminées par ses paramètres thermo physiques, notamment la chaleur spécifique solide et liquide et la chaleur de fusion liée à la transition de phase solide-liquide. La conductivité thermique est également une propriété importante des matériaux destinés à conduire la chaleur.

L'objectif de ce chapitre est de caractériser expérimentalement les propriétés thermo-physiques de la paraffine (MCP) tout en utilisant la méthode T-history, développée par Yingping.

III.2 Présentation du dispositif expérimental

L'installation expérimentale (Fig. 3.1) est constituée de :

1. un échangeur de chaleur en aluminium en forme U rempli par la paraffine (dont on ignore ses propriétés) et l'eau.

Chapitre III. Procédure expérimentale

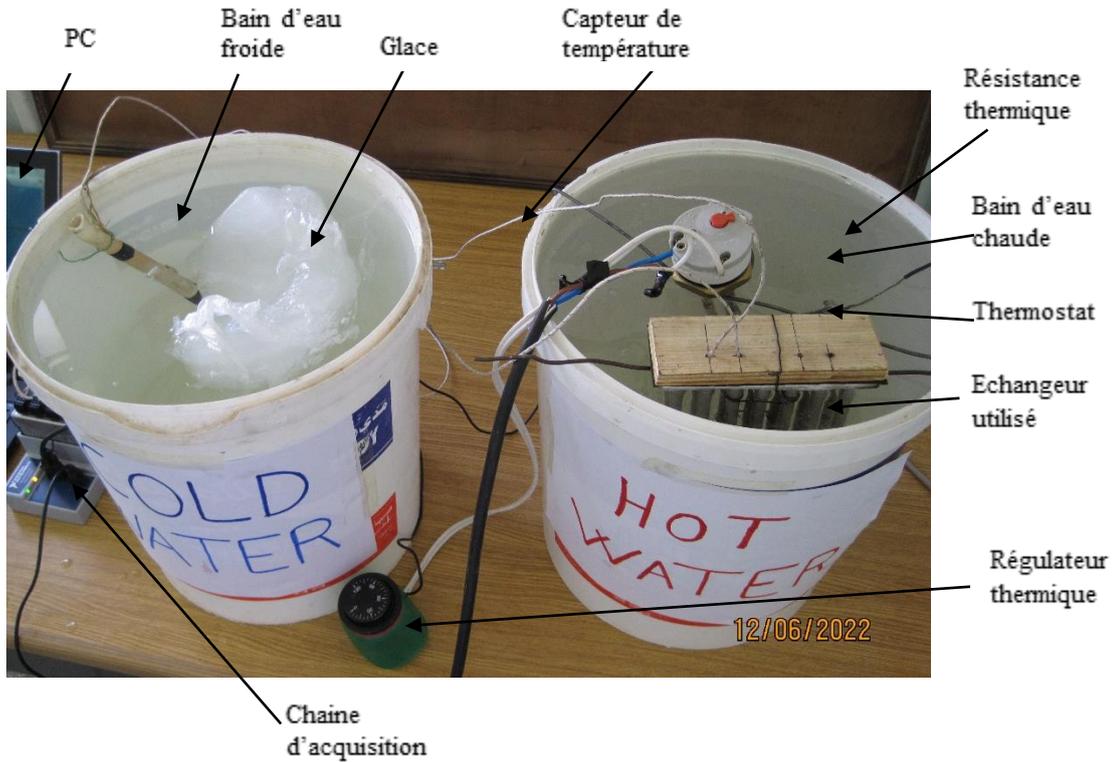


Fig. 3.1. Installation expérimentale

2. une résistance thermique (entre 10 et 80 °C) placée dans le bain pour chauffer l'eau.



Fig. 3.2. Résistance thermique

Chapitre III. Procédure expérimentale

3. un régulateur de température qui permet, grâce à son thermostat de contrôler et fixer la température de l'eau du bain.



Fig. 3.3. Régulateur de température

4. Un thermomètre à double sortie (-50 à 1230 °C) est utilisé pour contrôler la température du bain.



Fig. 3.4. Thermomètre à double sortie

Chapitre III. Procédure expérimentale

5. Le MCP utilisé est une cire de paraffine de formule chimique C_nH_{2n+2} . Les paraffines sont utilisées en raison de leur faible coût, leur densité de stockage à haute énergie, leur disponibilité à grande échelle ainsi que leur température de fusion convenable dans les applications à moyenne températures avec peu de maintenance et n'ayant besoin d'aucun apport d'énergie préalable.

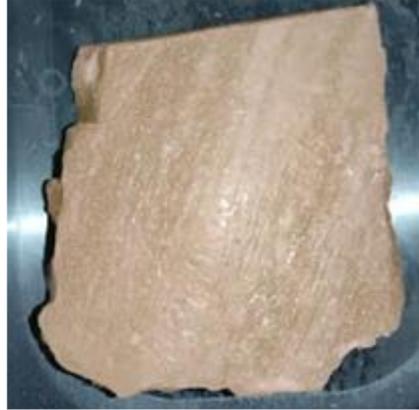


Fig. 3.5. Paraffine utilisée à l'état solide

6. L'échangeur thermique utilisé est fabriqué en aluminium. Cet échangeur est constitué de 7 tubes en forme U (Fig. 3.6), dont 2 tubes sont remplis par la paraffine et 2 autres tubes sont remplis par l'eau. La capacité de chaque tube est de 0.0218 litre.



Fig. 3.6. Tubes utilisés en forme de U

III.3 Méthode de remplissage des tubes par la paraffine

La paraffine est d'abord fondue en petite quantité dans une casserole au-dessus d'un appareil de chauffage à une puissance de 42 W (Fig. 3.7). Afin de maintenir les tubes de l'échangeur de chaleur chauds et d'éviter toute solidification de la paraffine pendant le remplissage, on immerge en même temps les tubes de l'échangeur dans un bain chaud, puis on remplit les tubes avec des quantités égales de paraffine (à l'aide d'une seringue graduée) sur un côté pour éviter la formation des poches d'air et le déversement du matériau durant la fusion.



Fig. 3.7. Chauffage de la paraffine.



Fig. 3.8. Remplissage des tubes par la paraffine

III.4 Mesure des températures

La Fig. 3.9, montre la disposition des capteurs à l'intérieur des tubes. Les capteurs de température utilisés sont de type K. Ils sont bon marché (disponibles et moins chers). Leur principal inconvénient est leur précision qui varie de $0,1 \div 0,2$ °C.

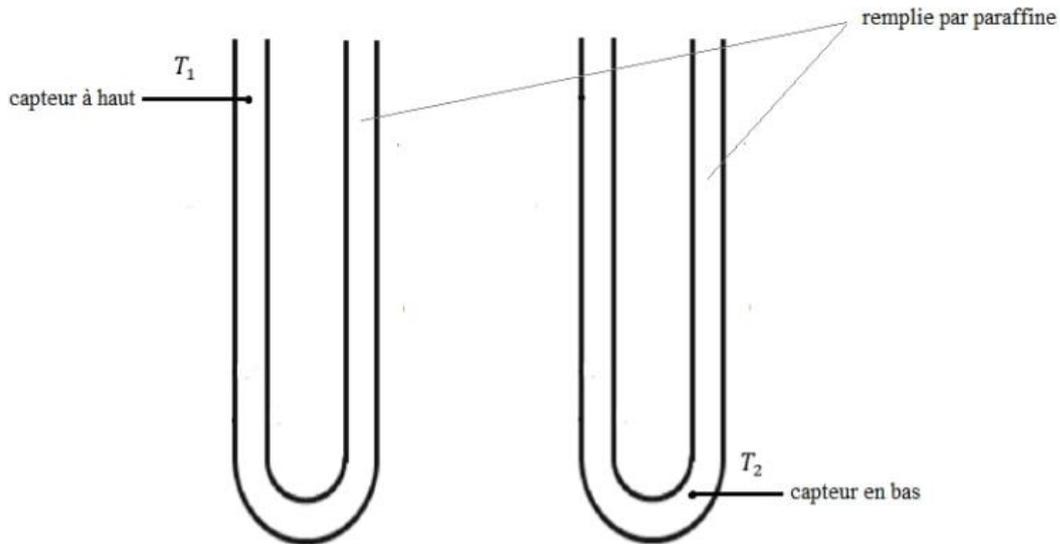


Fig. 3.9. Position des capteurs à l'intérieur des tubes en U

III.5 Chaîne d'acquisition

Pour pouvoir mesurer la température de l'air, de l'eau et de la paraffine, les capteurs de température sont connectés aux modules de l'interface de mesure (LabView) (Fig. 3.10) pour enregistrer les valeurs de température (en format Excel) et ainsi voir directement leur évolution durant l'expérience.



Fig. 3.10. Emplacement des modules dans l'interface avec le branchement des capteurs de température

III.6 Description du logiciel LabView

LabVIEW (Laboratory of Virtual Instruments Engineering Workbench) 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 contrôle 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 simuler des instruments de mesure (oscilloscope, compteur, multimètre, etc.).

III.6.1 Présentation de l'interface

Afin de réaliser l'acquisition numérique des températures mesurées, un programme graphique a été développé à l'aide de LabVIEW. Le programme dispose de deux interfaces : une interface back-end pour la programmation graphique et une interface front-end pour la gestion des données.

a) Interface arrière (block diagramme)

Elle comprend tous les programmes terminaux des commandes tels que les terminaux d'affichage, les connecteurs et les fils, les constantes et aussi les nœuds (sous-programmes, structures, interfaces de code). Le DAQ Assistant est un système d'acquisition de données (DAQ) permet de transmettre des signaux à un ordinateur afin

d'analyser et enregistrer les données dans un fichier Excel. L'interface comprend des indicateurs, DAQ Assistant, des boucles while, des tableaux et des graphiques.

b) Graphes

Le graphique est utilisé pour tracer une ou plusieurs mesures de température. La fonction tracée est de la forme $y = f(x)$ avec des points égaux le long de l'axe des x, ce qui permet de visualiser directement la variation des mesures (Fig. 3.11).

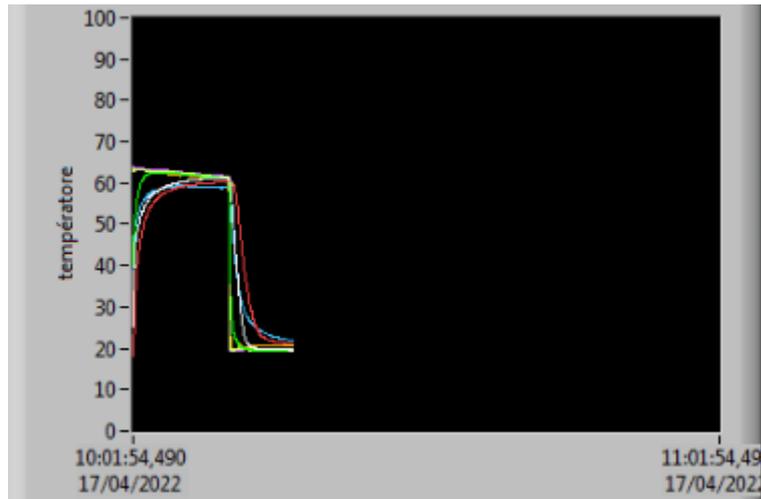


Fig. 3.11. Exemple de graphes enregistrés sur l'interface

c) Enregistrement des données sur fichier Excel

Les données générées et analysées à partir du programme développé sont enregistrées dans un fichier Excel qui permet de visualiser la date, l'heure, le temps, ainsi que les températures de chaque thermocouple. Ces données sont listées à partir d'une commande (Fig. 3.12) pour faciliter l'organisation et la récupération des données.

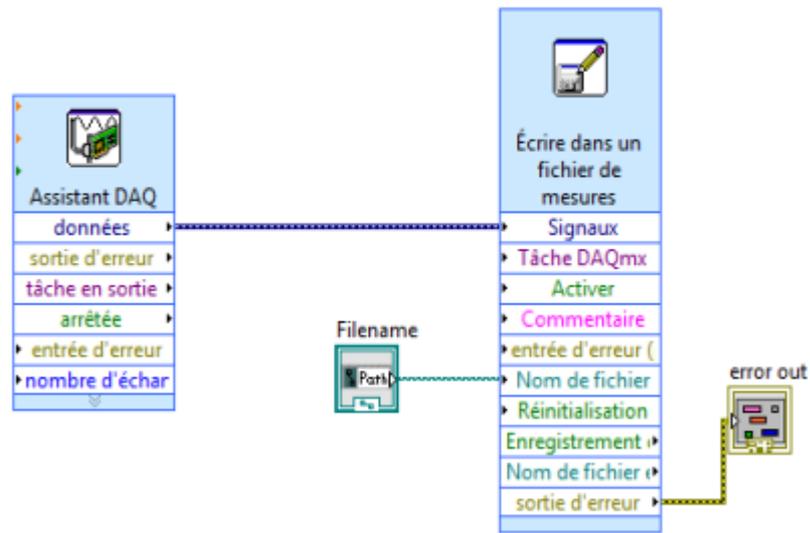


Fig. 3.12. Création d'un fichier d'enregistrement des mesures.

d) Interface avant (front panel)

Afin de pouvoir gérer numériquement les différentes mesures de température, une interface de contrôle a été développée (Fig. 3.13) pour visualiser l'évolution graphique et numérique des températures. Plusieurs commandes et affichages de données sont inclus dans cette partie de l'interface qui comprend des commutateurs, des tableaux, des boîtes de messages et des graphiques.

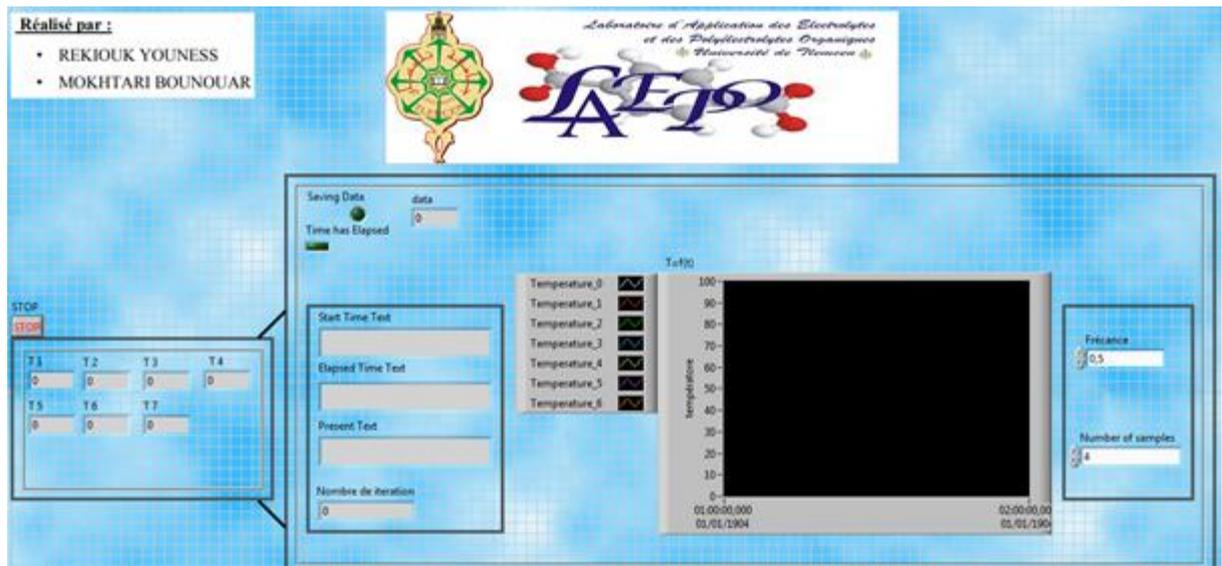


Fig. 3.13. Présentation de l'interface (face avant)

III.7 Détermination de la masse volumique solide et liquide (ρ_s et ρ_l)

Pour déterminer la masse volumique solide et liquide de notre MCP, nous devons d'abord déterminer la masse et le volume de MCP à l'état solide et à l'état liquide. Pour se faire, nous remplissons un tube par la paraffine liquide à la température de 80 °C. Puis nous mesurons sa masse (Fig. 3.14) et on laisse refroidir jusqu'à la température de 25 °C pour calculer une deuxième fois le volume de la paraffine à l'état solide (Fig. 3.15).

La balance de pesage utilisée est de marque OHAUS d'une précision de 0,001 g



Fig. 3.14. Balance utilisée pour le pesage de la paraffine



Fig. 3.15 Mesure du volume de la paraffine à l'état solide

L'expression de la masse volumique de la paraffine à l'état solide et liquide est représentée par :

$$\rho_s = \frac{m_p}{V_s} \quad (3.1)$$

$$\rho_l = \frac{m_p}{V_l} \quad (3.2)$$

III.8 Détermination de la température de fusion, la chaleur spécifique et la chaleur latente

Dans cette expérience, on chauffe l'échangeur rempli par l'eau et par la paraffine solide jusqu'à une température uniforme, égale à T_0 supérieure à T_f (température de fusion de la paraffine utilisée). Ensuite, les tubes de l'échangeur sont exposés directement à l'air libre de température d'ambiance T_∞ . Pendant le processus de refroidissement, les températures de l'eau et de la paraffine sont enregistrées et en fonction du temps jusqu'à la solidification de la paraffine (T ambiante).

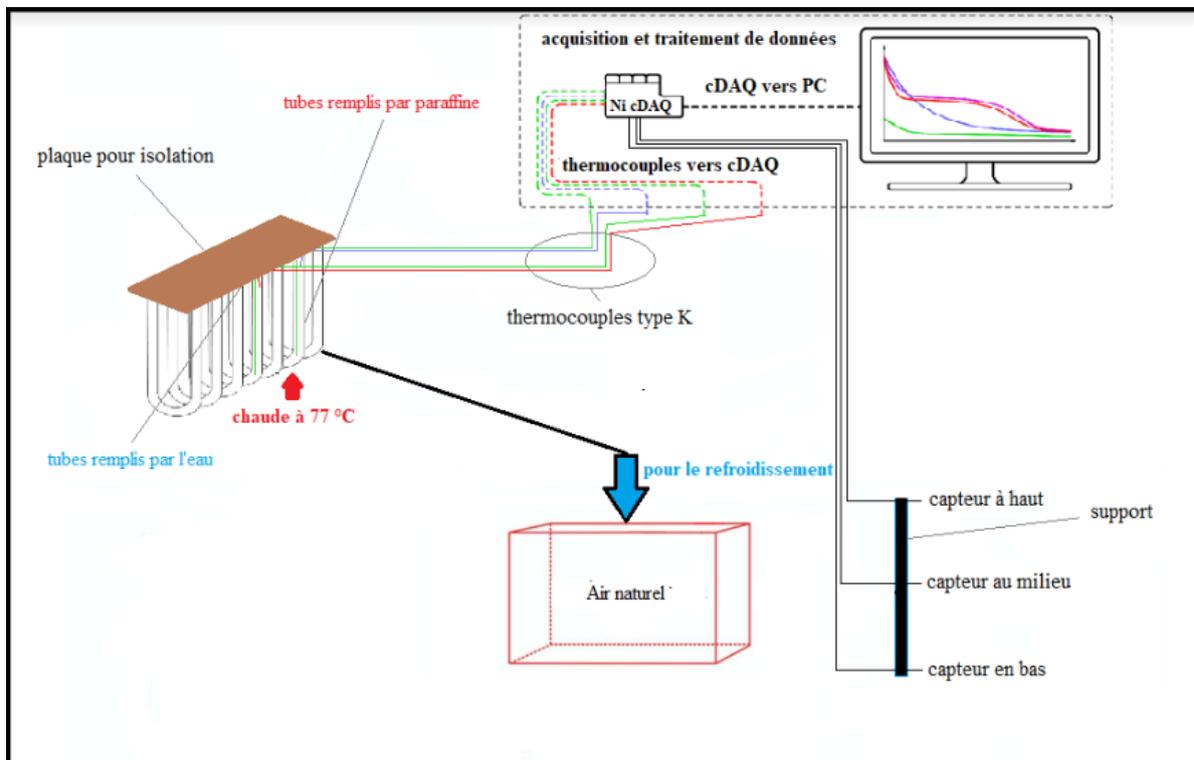


Fig. 3.16. Schéma technique du procédé expérimental pour la mesure de T_f , Cp_s , Cp_l et L_f

III.9 Détermination de la conductivité thermique

Afin de mesurer la conductivité thermique solide λ_s de la paraffine, le tube contenant la paraffine fondue dont la température est uniforme et égale à T_0 (T_0 est un peu supérieure à T_f) doit être plongé soudainement dans un bain d'eau froide dont la température est T_{ef} (T_{ef} est inférieure à T_f). La procédure inverse est utilisée pour mesurer la conductivité thermique liquide λ_l . Les valeurs de λ_s et λ_l sont déduites à partir des équations (3.17, 3.18, 3.19 et 3.20) qui suivent.

Chapitre III. Procédure expérimentale

L'ensemble des expériences est répété trois fois afin de garantir la précision et la reproductibilité des données.

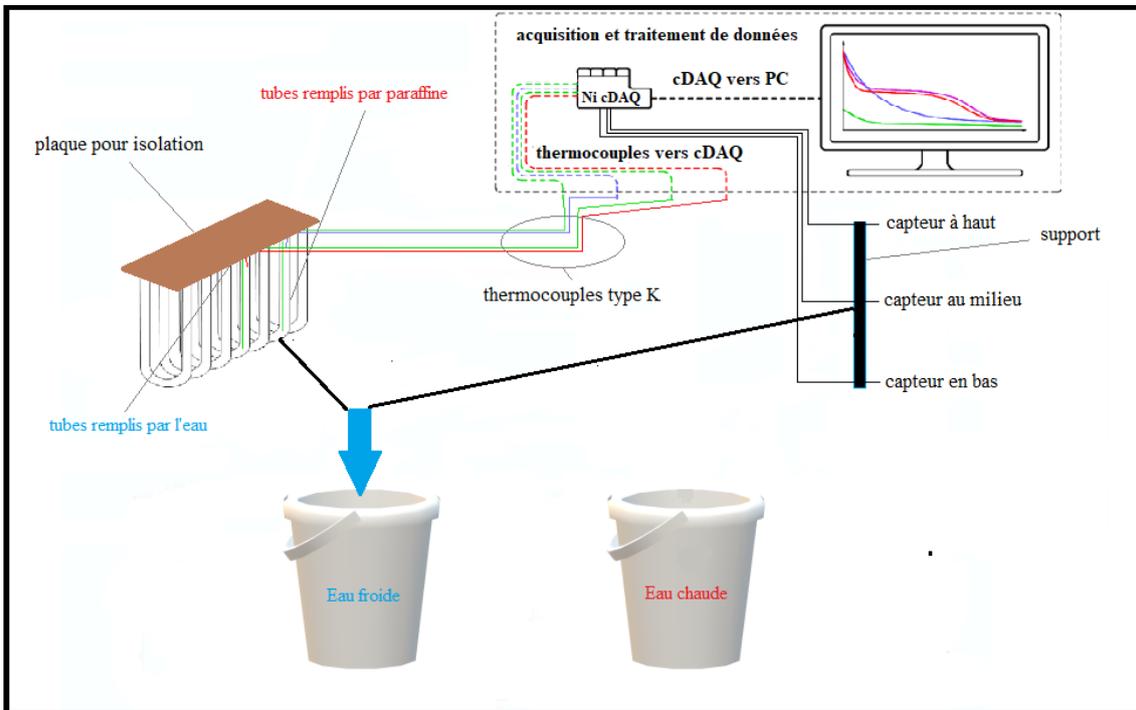


Fig. 3.17. Schéma technique du procédé expérimental pour la mesure de la conductivité thermique solide λ_s

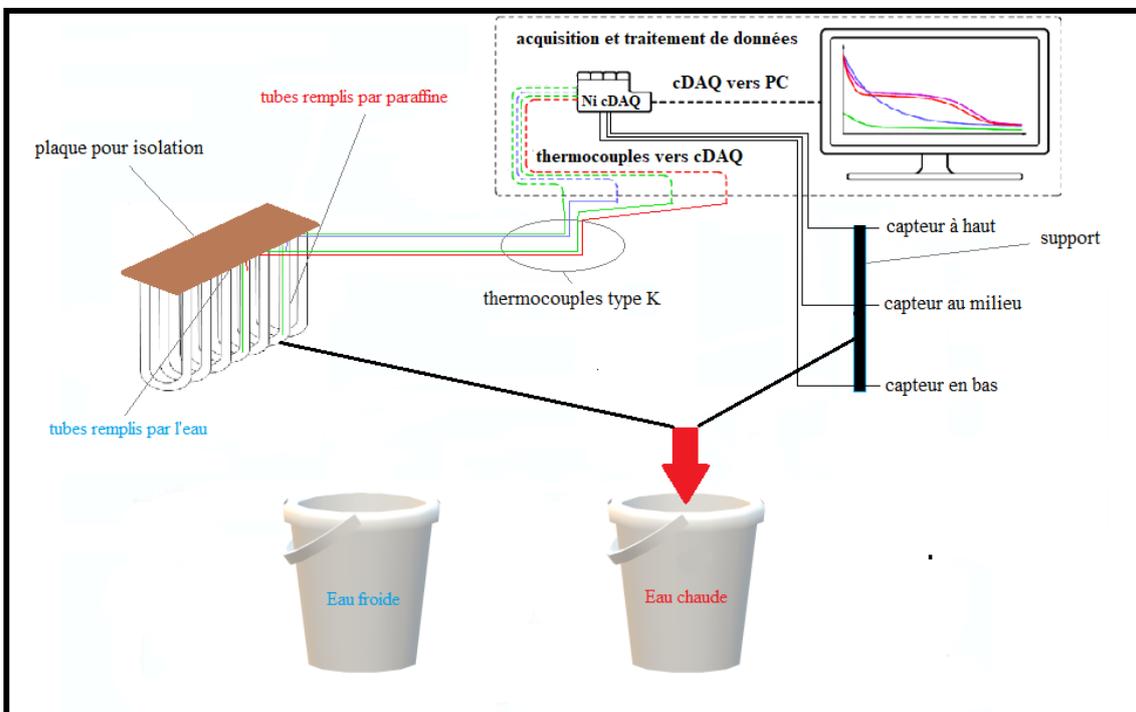


Fig. 3.18. Schéma technique du procédé expérimental pour la mesure de la conductivité thermique liquide λ_l

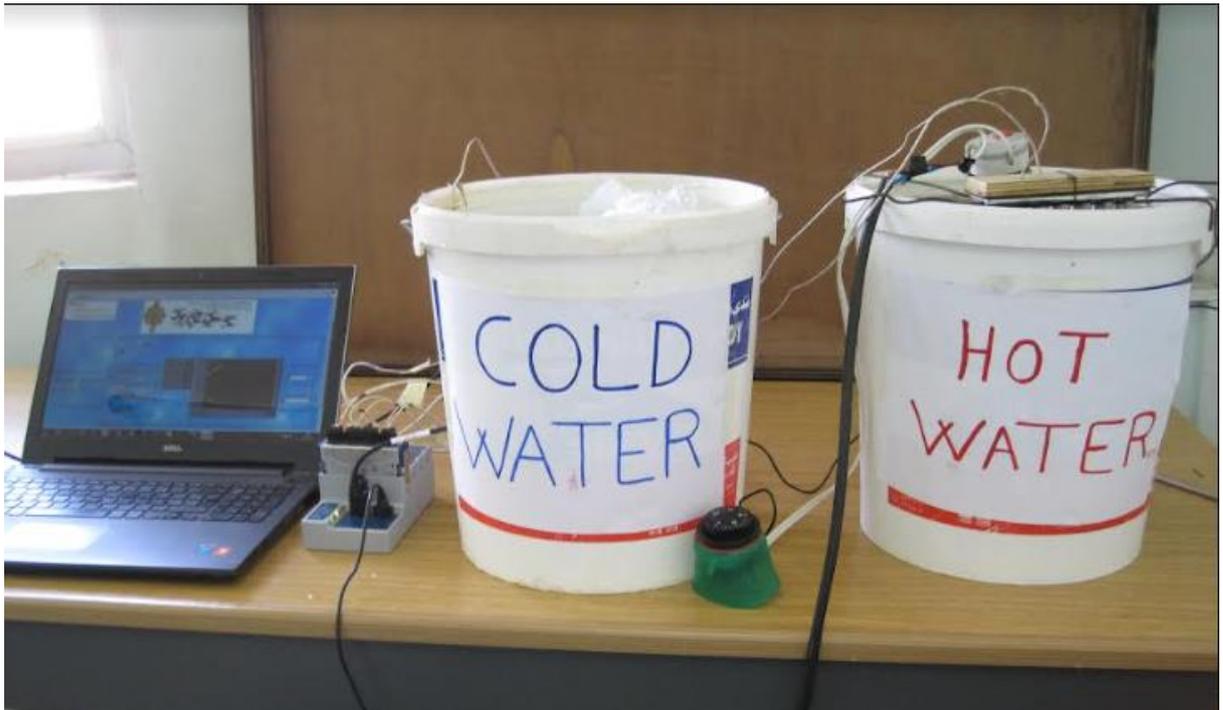


Fig. 3.19. Le procédé expérimental pour la mesure des conductivités thermiques

III.10 Partie des différents calculs utilisés

III.11.1 Nombre de Grashof

Le nombre de Grashof (Gr) est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides pour caractériser la convection libre dans un fluide. Il correspond au rapport entre les forces de gravité et les forces visqueuses.

Le nombre de Grashof est défini par :

$$Gr_L = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu^2} \quad (3.3)$$

Avec :

g : Accélération de la pesanteur

β : Coefficient de dilatation thermique

ΔT : Différence de température

L : Longueur de tube

ν : Viscosité dynamique

III.11.2 Nombre de Rayleigh

Le nombre de Rayleigh est un nombre sans dimension qui représente le rapport des forces de flottabilité et de la diffusivité thermique.

$$Ra_L = Gr_L Pr = g\beta\Delta TL^3 / \alpha\nu \quad (3.4)$$

Avec :

α : Diffusivité thermique

III.11.3 Nombre de Nusselt

Le nombre de Nusselt est un nombre adimensionnel utilisé pour caractériser le type de transfert thermique entre un fluide et une paroi. Il met en rapport le transfert par convection par rapport au transfert par conduction.

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad (3.5)$$

$$Nu = \frac{h L}{\lambda} \quad (3.6)$$

$$h = Nu \lambda / L \quad (3.7)$$

III.11.4 Nombre de Stefan

Le nombre de Stefan Ste est un nombre utilisé en phénomène de transfert pour étudier le transfert thermique lors d'un changement de phase solide-liquide. Il représente le rapport entre la chaleur sensible et la chaleur latente.

$$Ste = \frac{c_p(T_f - T_e)}{L_f} \quad (3.8)$$

C_p : Capacité calorifique moyenne de la paraffine.

L_f : Chaleur de fusion du MCP.

T_f : Température de fusion

T_e : Température de bain de l'eau

III.11.5 Méthode T-history. Exemples de calcul des surfaces

La méthode T-history consiste à découper les graphes de refroidissement en plusieurs sections (Fig. 3.20 et 3.21) représentées par A_1, A_2, A_3 pour le MCP et A'_1, A'_2 pour un matériau de référence (l'eau), telles que :

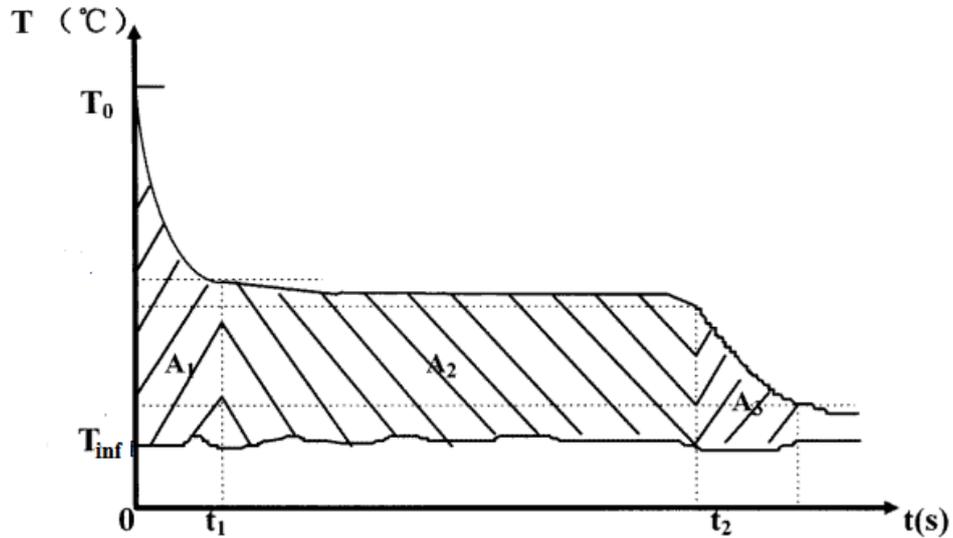


Fig. 3.20. Courbe typique de T-history d'un MCP pendant un processus de refroidissement

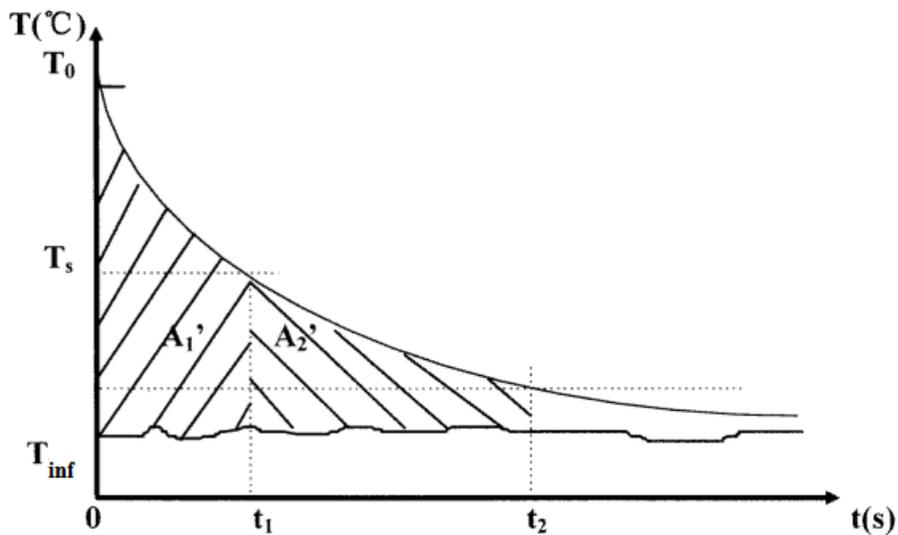


Fig. 3.21. Courbe typique de T-history de l'eau pendant un processus de refroidissement

(3.9)

(3.10)

(3.11)

$$(3.12)$$

$$(3.13)$$

III.11.6 Chaleur spécifique et la chaleur de fusion

Selon [26], si un tube contenant un MCP liquide dont la température est uniforme et égale à T_0 ($T_0 > T_f$, T_f étant la température de la fusion complète du MCP) est soudainement exposé à une atmosphère dont la température est T_∞ , les chaleurs spécifiques liquide, solide et la chaleur de fusion du MCP utilisé peuvent être obtenus respectivement par les équations suivantes :

$$C_{p,l} = \left(\frac{m_t c_{p,t} + m_e c_{p,e}}{m_p} \frac{A_1}{A'_1} \right) - \frac{m_t}{m_p} c_{p,t} \quad (3.14)$$

$$C_{p,s} = \left(\frac{m_t c_{p,t} + m_e c_{p,e}}{m_p} \frac{A_3}{A'_2} \right) - \frac{m_t}{m_p} c_{p,t} \quad (3.15)$$

$$L_f = \left(\frac{m_t c_{p,t} + m_e c_{p,e}}{m_p} \frac{A_2}{A'_1} (T_0 - T_{f1}) \right) - \frac{m_t}{m_p} c_{p,t} (T_{f1} - T_{f2}) \quad (3.16)$$

Ou :

m_t : Masse du tube

m_e : Masse de l'eau

m_p : Masse de paraffine

$C_{p,e}$: Chaleur spécifique de l'eau

$C_{p,t}$: Chaleur spécifique de tube

III.11.1 Détermination de la conductivité thermique

Selon [26], la conductivité thermique effective du MCP à l'état solide et liquide peut être exprimée comme suit :

$$(3.17)$$

$$(3.18)$$

Chapitre III. Procédure expérimentale

Pour simplifier la formule, nous négligeons le deuxième terme du dénominateur, ce qui est valable pour la plupart des expériences. La formule prend la forme suivante :

(3.19)

(3.20)

Avec :

t_s : Temps de solidification complète

t_f : Temps de fusion complète

T_e : Température de l'eau dans le bain

T_f : Température de la fusion

ρ_s : Masse volumique de la paraffine à l'état solide

ρ_l : Masse volumique de la paraffine à l'état liquide

Chapitre IV : Résultats et interprétations

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre ; nous allons appliquer la méthode T-history sur un MCP (paraffine) dont on ignore ses caractéristiques thermo-physiques ($\rho_s, \rho_l, T_f, Cp_s, Cp_l, L_f, \lambda_s$ et λ_l). Les expériences réalisées sont répétées 3 fois pour vérifier la validité des résultats.

IV.2 Détermination de la masse volumique ρ_s et ρ_l

L'expression de la masse volumique de la paraffine à l'état solide et liquide est représentée par :

$$\rho_s = \frac{m_p}{V_s} \quad (3.1)$$

$$\rho_l = \frac{m_p}{V_l} \quad (3.2)$$

Avec

$$m_p = 16,4 \text{ g,}$$

Le diamètre intérieur du tube $\phi_{int} = 7,24 \text{ mm}$

La longueur du tube $L = 530 \text{ mm}$

$$V_l (\text{à } 80 \text{ }^\circ\text{C}) = \pi R^2 L = \pi \times 0,0362^2 \times 5,3 = 0,0218 \text{ l}$$

$V_s (\text{à } 25 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,020 \text{ l}$ calculée directement sur le tube gradué

$$\text{D'où la masse volumique solide } \rho_s = \frac{m_p}{V_s} = \frac{16,4}{0,020} = 820 \text{ g/l}$$

$$\text{La masse volumique liquide } \rho_l = \frac{m_p}{V_l} = \frac{16,4}{0,0218} = 752 \text{ g/l}$$

Tableau 4.1. Valeurs obtenues ($m_p, V_l, V_s, \rho_s, \rho_l$)

m_p (g)	V_l (l)	V_s (l)	ρ_s (g/l)	ρ_l (g/l)
16,4	0,0218	0,020	820	752

IV.3 Détermination de l'intervalle de changement de phase

a) Détermination des valeurs de temps (t_1 , t_2 , t_3 , t_1' et t_2')

Dans cette expérience, le MCP et l'eau sont remplis chacun séparément dans des tubes du même échangeur. Les valeurs des températures prélevées sont issues de la même expérience c'est-à-dire dans le même bain d'eau froide (refroidissement) et d'eau chaude (chauffage).

Fig. 4.1. Evolution temporelle de la température de la paraffine et de sa dérivée durant la phase de refroidissement par l'air

La Fig. 4.1 représente l'évolution temporelle de la température de la paraffine ainsi que sa dérivée durant la phase de refroidissement à l'air ambiant. Les valeurs des temps t_1 et t_2 représentent respectivement le premier et le deuxième point d'inflexion de la courbe de la dérivée. Le temps t_3 représente le début de la stabilité de la courbe dérivée. L'intervalle $[t_1, t_2]$ représente la durée de changement de phase.

L'intersection de t_1 et t_2 avec l'axe des températures représente respectivement la température du début de solidification (liquidus) $T_{f1} \approx 55 \text{ }^\circ\text{C}$ et de la fin de solidification (solidus) $T_{f2} \approx 49 \text{ }^\circ\text{C}$.

Fig. 4.2. Evolution temporelle de la température de l'eau (référence) durant la phase de refroidissement par l'air

La Fig. 4.2 représente l'évolution temporelle de la température de l'eau remplie dans le tube (matériau de référence) durant la phase de refroidissement à l'air ambiant. Le temps t'_1 est obtenu par la projection de la droite de température T_{fm} (Température moyenne de fusion de la paraffine 52 °C) sur l'axe du temps. Le temps t'_2 représente le début de stabilisation de la courbe. Les valeurs calculées sont représentées sur le tableau 4.2.

Tableau 4.2. Valeurs de temps obtenues durant la phase de refroidissement par l'air

Durée	t_1 (s)	t_2 (s)	t_3 (s)	T_{f1} (°C)	T_{f2} (°C)	t'_1 (s)	t'_2 (s)
Valeurs	330	730	2400	55,21	49,56	453	2526

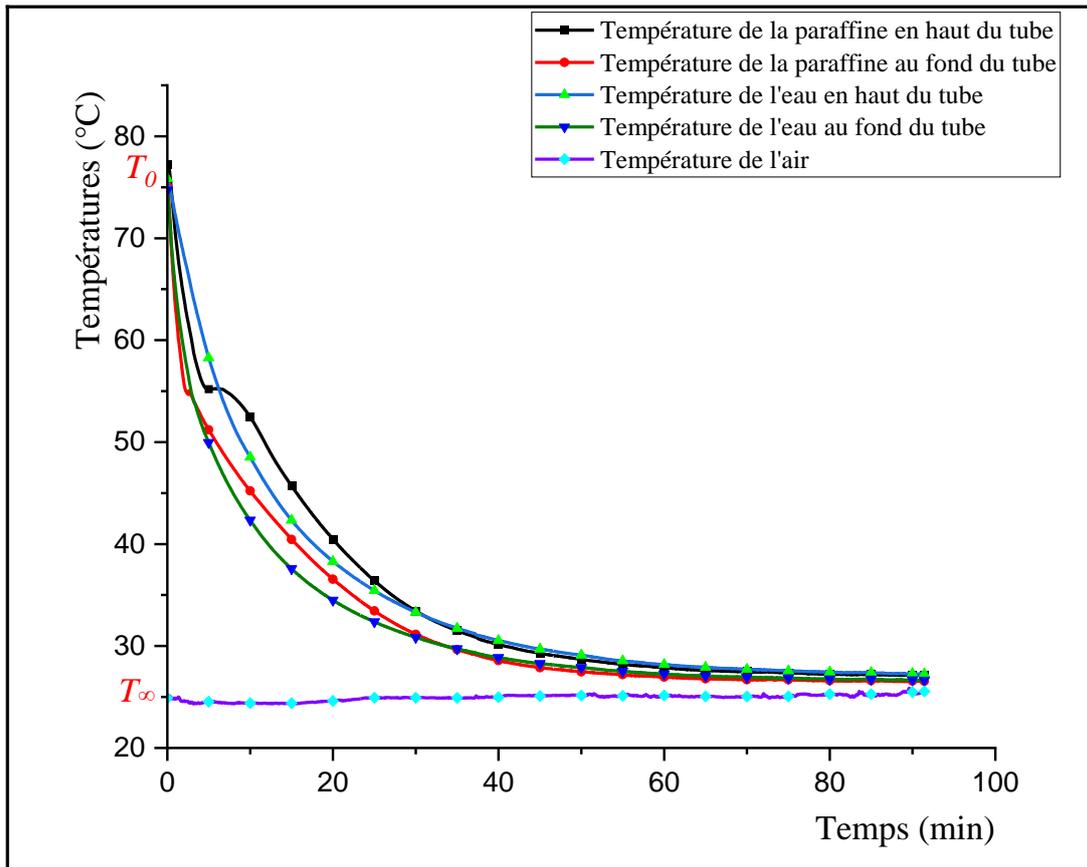


Fig. 4.3. Evolution temporelle des températures de la paraffine et de l'eau durant le refroidissement à l'air libre selon un régime stationnaire

La Fig. 4.3 représente l'évolution temporelle des températures de la paraffine et celles de l'eau (matériau de référence) à la partie supérieure et la partie inférieure durant le refroidissement à l'air libre ($T_{\infty} \approx 25^{\circ}\text{C}$). La température initiale de l'eau et de la paraffine est de $T_0 \approx 77^{\circ}\text{C}$.

La courbe enregistre trois phases de refroidissement. Une phase liquide, une phase solide et une phase intermédiaire qui représente le changement de phase liquide-solide.

Durant l'expérience (≈ 91 min et 26 s), les résultats montrent que la solidification de paraffine ($55,21 \rightarrow 49,56^{\circ}\text{C}$) commence aux alentours de 5min30s et se termine à 12 min 10s. Le graphe montre aussi que la solidification commence toujours par le bas et se termine par le haut.

IV.4 Représentation des surfaces

Les Fig. 4.4 et 4.5 représentent le découpage des graphes de refroidissement précédents selon les surfaces A_1 , A_2 , A_3 du MCP et A'_1 , A'_2 celles du matériau de référence (l'eau). Ce découpage nous permet de faciliter le calcul des chaleurs spécifiques du MCP à l'état solide et liquide ainsi que la chaleur latente par la méthode T-history ultérieurement.

Fig. 4.4. Représentation des surfaces du MCP A_1 , A_2 et A_3

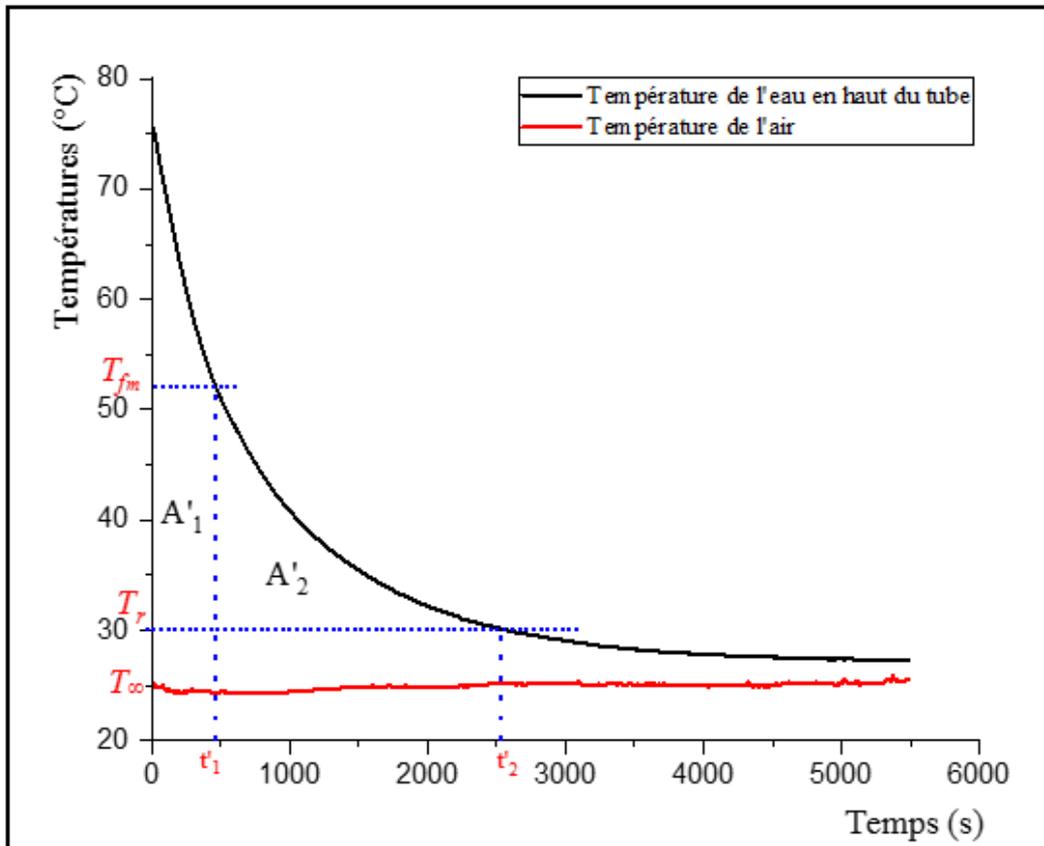


Fig. 4.5. Représentation des surfaces de l'eau A'_1 et A'_2

IV.5 Détermination des surfaces

Pour calculer les surfaces A_1 , A_2 , A_3 du MCP et A'_1 , A'_2 celles du matériau de référence (l'eau), nous avons utilisé trois méthodes de calcul : la méthode d'intégration du polynôme, la méthode des trapèzes et celle du logiciel origin-pro.

a) Méthode d'intégration de polynôme

A l'aide du logiciel Excel, nous déterminons l'équation d'interpolation polynomiale de la courbe sur l'intervalle considéré (Fig. 4.6).

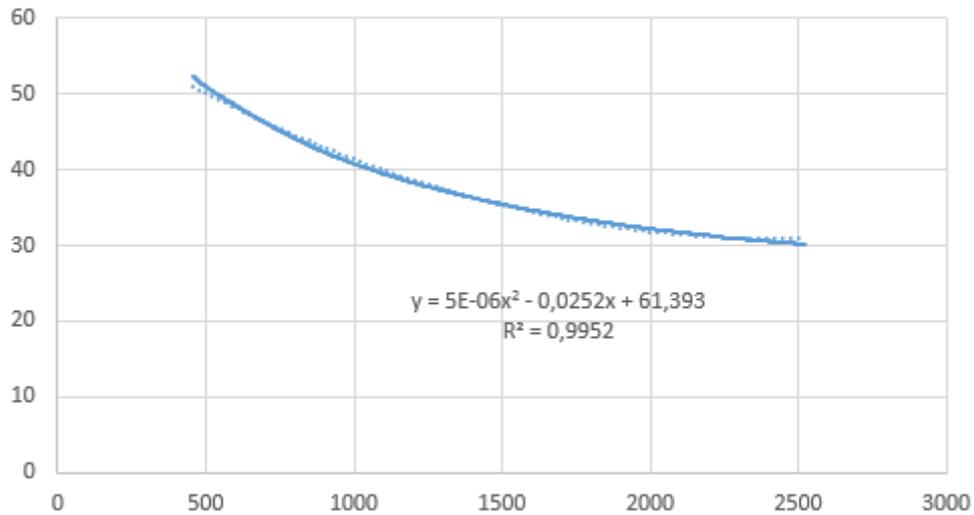


Fig. 4.6. Exemple de la méthode de polynôme

Les surfaces réelles du MCP A_1, A_2, A_3 et celles de l'eau A'_1, A'_2 calculées par la méthode des polynômes sont représentées sur le tableau 4.3. Les bornes des intégrations présentent les temps limites de chaque surface.

Tableau 4.3. Surfaces calculées par la méthode de polynôme

b) Méthode des trapèzes

La méthode des trapèzes consiste à joindre la fonction $f(t_n)$ et la fonction $f(t_{n+1})$ de l'intervalle $[t_n, t_{n+1}]$, puis calculer l'intégrale tout en calculant l'aire du trapèze par la formule :

$$S = \frac{(\text{Petite_base} + \text{Grande_base}) \times \text{Hauteur}}{2}$$

$f(t_n)$ et $f(t_{n-1})$ représentent respectivement la petite et la grande base, alors que $h = \frac{b-a}{n}$ représente la hauteur. Les surfaces réelles A_1, A_2, A_3 du MCP et A'_1, A'_2 celles de l'eau calculées par la méthode des trapèzes sont représentées sur le tableau 4.4

Tableau 4.4. Surfaces calculées par la méthode des trapèzes

Surfaces	Résultats
A'_1	17207,76
A'_2	25429,06
A_1	12456,43
A_2	11350,49
A_3	20135,10

c) Calcul par le logiciel Origin Pro

Le logiciel Origin Pro permet de tracer les graphes et de calculer directement les surfaces sélectionnées. Les Fig. 4.6 et 4.7 représentent les surfaces réelles du MCP A_1, A_2, A_3 et celles de l'eau A'_1, A'_2 tracées et calculées par le logiciel Origin Pro.

Fig. 4.7. Surfaces A_1 , A_2 et A_3 conçues par Origin Pro

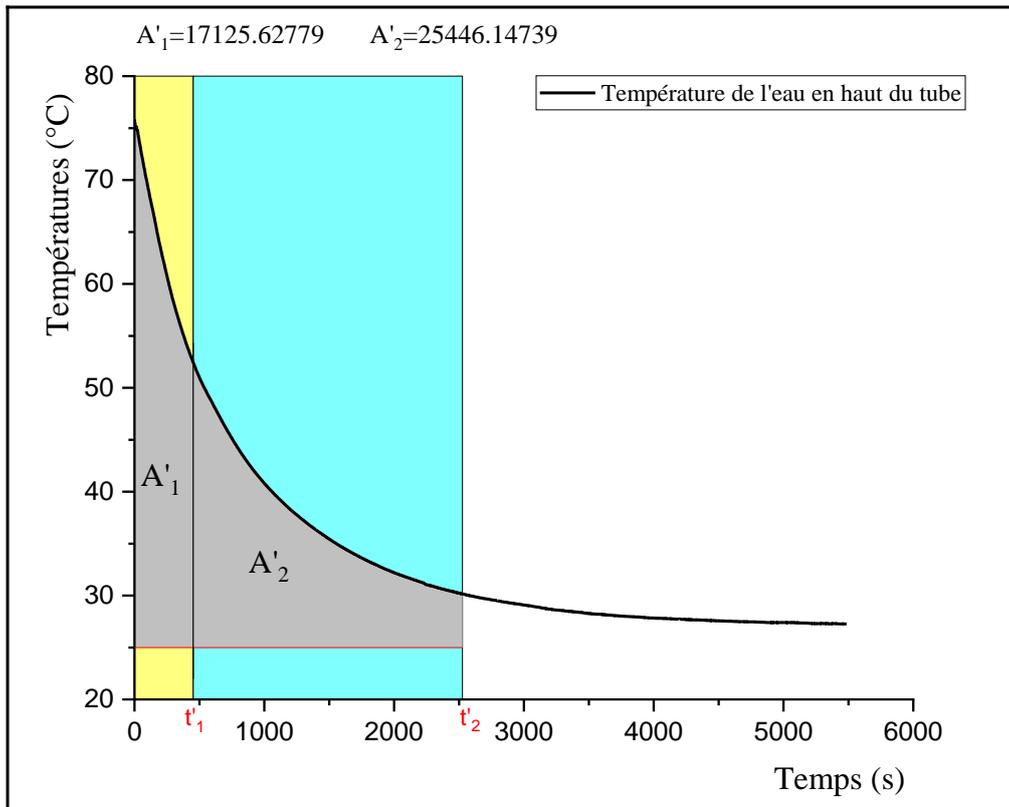


Fig. 4.8. Surfaces conçues par Origin Pro A'_1 et A'_2

Les surfaces réelles A_1, A_2, A_3 du MCP et A'_1, A'_2 celles de l'eau calculées par le logiciel Origin Pro sont représentées sur le tableau 4.5.

Tableau 4.5. Surfaces calculées par le logiciel Origin Pro

Surfaces	Résultats
A'_1	17125,62
A'_2	25446,14
A_1	10277,03
A_2	13420,75
A_3	20124,75

d) Comparaison entre les surfaces des trois méthodes

Le tableau.4.6 regroupe la comparaison des trois méthodes citées précédemment. On remarque que les valeurs calculées par la méthode des trapèzes se rapprochent des valeurs calculées par l'origin pro ; alors que les valeurs calculées par la méthode des polynômes enregistre un léger décalage par rapport aux autres méthodes à cause de l'erreur enregistrée entre la courbe expérimentale et la courbe rapprochée (Fig. 4.6).

Tableau 4.6. Comparaison des surfaces obtenues

IV.6 Détermination de la chaleur spécifique et la chaleur latente

Une fois les surfaces déterminées, les équations (3.14), (3.15) et (3.16) permettent de calculer les valeurs de la chaleur spécifique du MCP à l'état liquide C_{p_l} et à l'état

solide C_{p_s} ; ainsi que la chaleur latente de fusion L_f . Les résultats des calculs selon les trois méthodes sont regroupés sur le tableau 4.7 suivant.

Tableau 4.7. Résultats obtenus (C_{p_l} , C_{p_s} et L_f)

	C_{p_l} ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	C_{p_s} ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	L_f (kJ kg^{-1})
Méthode de polynôme	3,70	4,68	84810,97
Méthode des trapèzes	3,81	4,23	87998,18
Origin Pro	3,80	4,23	88039,73

Les résultats calculés montrent bien que les valeurs des chaleurs spécifiques et celles de la chaleur latente de fusion calculées par la méthode des trapèzes se rapprochent des valeurs calculées par l'origin pro, alors que les valeurs calculées par la méthode des polynômes enregistrent toujours le même décalage à cause de l'erreur enregistrée précédemment.

IV.7 Détermination des temps de solidification et de fusion t_s et t_f

Pour déterminer les conductivités thermiques solide et liquide au moyen des équations (3.19) et (3.20), nous devons d'abord déterminer le temps de solidification complète (t_s) et celui de la fusion complète (t_f).

Fig. 4.9. Evolution temporelle de la température et de sa dérivée durant la phase de refroidissement par l'eau.

Comme illustré sur la Fig. 4.9, t_1 et t_2 représentent respectivement le premier et le deuxième point d'inflexion de la courbe de la dérivée. t_s est déterminé comme intervalle de temps entre t_2 et t_3 , temps pour lequel le matériau se solidifie complètement. La valeur de t_3 représente le début de la stabilité de la courbe dérivée. Les valeurs temporelles calculées sont représentées sur le tableau. 4.8.

Tableau 4.8. Valeur de temps durant la phase de refroidissement par l'eau

Durée	t_1 (s)	t_2 (s)	t_3 (s)	t_s (s)
valeurs	5,64	49	169	120

Fig. 4.10. Evolution temporelle de la température et de sa dérivée durant la phase de fusion par l'eau

Le temps de fusion complète t_f est représenté par l'intervalle de temps t_1 et t_3 (Fig. 4.10), puisque le matériau subit son changement de phase solide-liquide sur cet intervalle. t_1 représente le temps où la courbe de dérivée prend une valeur limite maximale. t_3 représente le temps du début de stabilisation de la courbe de dérivée. Les valeurs des temps calculés sont représentées sur le tableau. 4.9.

Tableau 4.9. Valeur de temps durant la phase de fusion par l'eau

Durée	t_1 (s)	t_2 (s)	t_3 (s)	t_f
valeurs	13,7	128,5	274	260,3

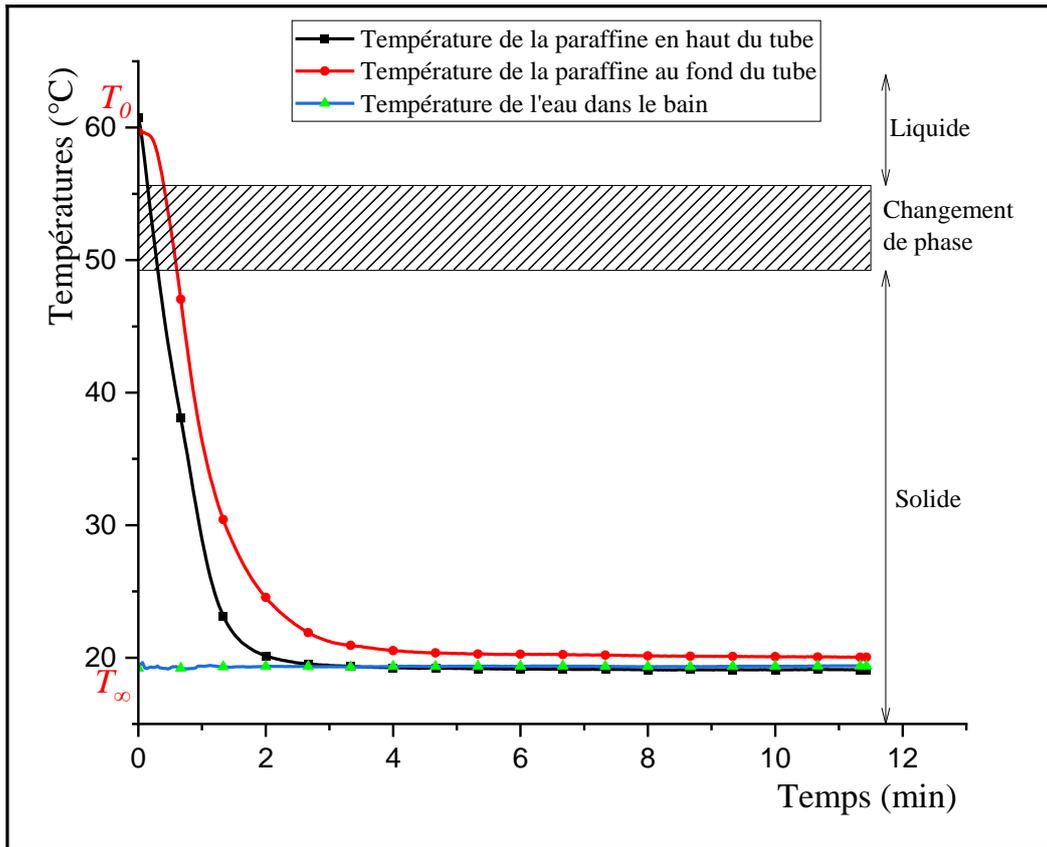


Fig. 4.11. Evolution temporelle des températures du MCP durant le refroidissement par l'eau selon un régime stationnaire.

La Fig. 4.11 représente l'évolution temporelle du refroidissement du MCP à l'intérieur d'un bain d'eau de température d'ambiance $T_{\infty} \approx 19 \text{ }^{\circ}\text{C}$ pour une température initiale ($T_0 \approx 62 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Contrairement à la Fig. 4.3 (refroidissement effectué par air), la Fig. 4.11 enregistre un seul refroidissement qui est très rapide dont on ne peut pas différencier entre les trois parties de refroidissement citée sur la même figure précédente.

En s'articulant sur la courbe de dérivée, le processus de refroidissement (liquide sensible) dure 5,64 s. Le changement de phase liquide-solide démarre de 5.64 s et se termine à 49 s. Après, le matériau continue à se refroidir jusqu'à 169 s température du bain.

On remarque aussi que la solidification commence par le point bas et se termine par le point haut. Ce phénomène est dû au mouvement thermo-convectif naturel dans la phase liquide du MCP.

La même Fig. 4.11 montre bien l'avantage d'avoir effectué un refroidissement par air (Fig. 4.3) qui nous a permis de bien localiser les différents points de température du début et de la fin de changement de phase.

On remarque aussi qu'à la fin du refroidissement du matériau (MCP), la température de celui-ci se superpose sur la température du fluide refroidissant (eau Fig. 4.11), alors qu'un décalage de température est enregistré entre la courbe de la fin de refroidissement du MCP et celle de l'air sur la Fig. 4.3.

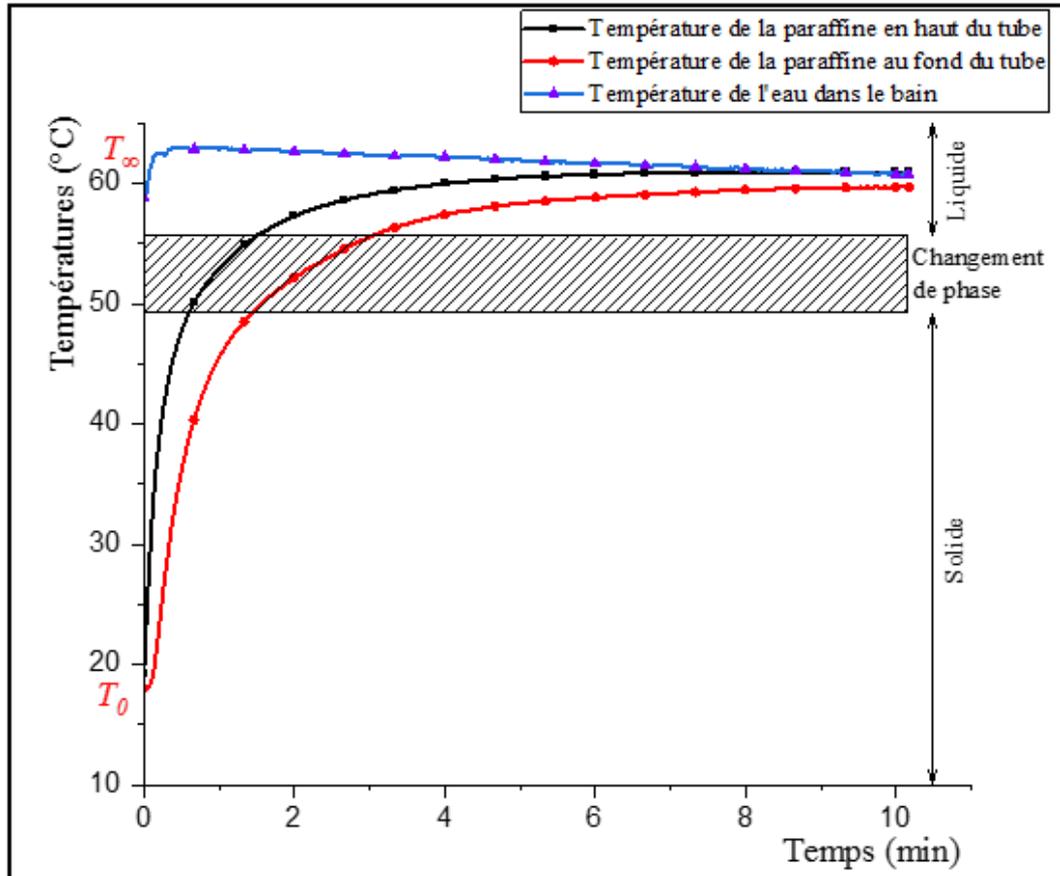


Fig. 4.12. Evolution temporelle de la fusion du MCP dans un bain d'eau chaude

La Fig. 4.12 représente l'évolution temporelle de la fusion de la paraffine dans un bain d'eau chaude, pour une température initiale $T_0 \approx 19^{\circ}\text{C}$ et une température finale $T_{\infty} \approx 62^{\circ}\text{C}$.

En s'appuyant sur la courbe de dérivée, le processus de fusion (solide sensible) dure 13,7 s. Le changement de phase solide-liquide démarre à 13,7 s et se termine à 128,5 s. Après, le matériau poursuit son chauffage à l'état liquide jusqu'à 274 s température du bain.

Contrairement à la solidification, la fusion commence par le haut et se termine par le bas.

IV.8 Détermination des conductivités thermiques solide et liquide

Une fois la détermination des temps complet de solidification t_s et celui de la fusion t_f effectuée, les équations (3.19) et (3.20) permettent de déterminer la conductivité thermique solide et liquide du matériau utilisé. Les résultats obtenus sont représentés sur le tableau.4.10

Tableau 4.10. Résultats des conductivités thermiques

	$\lambda_s (W/m.K)$	$\lambda_l (W/m.K)$
Méthode de polynôme	0,18	0,14
Méthode des trapèzes	0,17	0,15
Origin Pro	0,17	0,15

Des pages de calcul par Excel (annexes) ont été développées afin de déterminer directement les différentes valeurs thermo-physiques du matériau considéré. Nous remarquons que les valeurs obtenues sont très voisines à ceux fournies par des différents producteurs de paraffine et ceux déclarées dans la littérature (publications scientifiques). La Fig. 4.13 représente les différentes valeurs (calculées par Excel) des différents paramètres thermo physiques du matériau utilisé dans nos expériences.

m l'eau	0,0218 kg	Cp_s	4,237604 kJ kg ⁻¹ K ⁻¹		
m tube	0,01476 kg				
m paraffin	0,0164 kg	Cp_l	3,809677 kJ kg ⁻¹ K ⁻¹		
Cp l'eau	4,192 kJ kg ⁻¹ K ⁻¹				
Cp tube	0,9 kJ kg ⁻¹ K ⁻¹	Lf	88039,73 J kg ⁻¹		
Section A1	12395,99	$Teau_s$	19 °C	$Teau_l$	62,5 °C
Section A2	11301,38				
Section A3	20124,75	t_s	120 s	t_f	260 s
Section A'1	17125,62	Rho_s	820 kg m ⁻³	Rho_l	752 kg m ⁻³
Section A'2	25446,14				
T_o	77,2 °C	R	0,00362 m	R	0,00362 m
T_{fm}	52,425 °C	h_{eau}	2300 W m ⁻¹ K ⁻¹	h_{eau}	2300 W m ⁻¹ K ⁻¹
T_{f1}	55,21 °C	λ_s	0,176898 W m ⁻² K ⁻¹	λ_l	0,150532 W m ⁻² K ⁻¹
T_{f2}	49,56 °C				

Fig. 4.13. Représentation des résultats sur fichier Excel

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons appliqué la méthode T-history sur un MCP (paraffine) dont nous ignorons avec précision ses caractéristiques thermo-physiques. Les expériences de cette méthode traitent la fusion d'un MCP (paraffine) dans un bain d'eau chaude ($Bi > 0.1$) et son refroidissement à l'air libre ($Bi < 0.1$). Les expériences réalisées sur l'échantillon du MCP utilisé permettent déduire les conclusions suivantes :

- Détermination des masses volumiques liquide et solide.
- Calcul avec plus de précision des températures du début et de la fin de fusion.
- Détermination des chaleurs spécifiques (solide et liquide) et la chaleur latente est effectuée. Le calcul est basé sur l'approximation des aires obtenues dans l'évolution temporelle des températures par trois méthodes, à savoir, la méthode des polynômes, la méthode des trapèzes et celle du logiciel Origin pro.
- Le calcul des temps de solidification et de la fusion complète est utilisé pour pouvoir déterminer les conductivités thermiques solide et liquide.
- Au cours du processus de refroidissement, nous avons constaté que la solidification progresse du bas vers le haut de l'échangeur contrairement au processus de fusion. Ce comportement est dû à la présence de la convection naturelle en phase liquide, qui favorise la dissipation de la chaleur vers le haut.

L'avantage de la méthode T-history par rapport aux méthodes disponibles (telles que les méthodes de calorimétrie conventionnelles et les méthodes (DSC)), se résume comme suit :

- Elle est applicable sur un large intervalle de MCP dont on ignore ses propriétés thermo physiques.
- Elle utilise un système expérimental simple et moins coûteux.
- La précision de la mesure répond aux besoins des applications techniques.

Néanmoins, cette méthode exige d'adapter les dimensions du tube et la matière de référence utilisée (eau) en fonction de MCP considéré. Il faut s'assurer du respect théorique des valeurs du Biot pour valider les équations théoriques utilisés

Annexes

Annexe 1

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
8	m l'eau	0.0218	kg		C_{p_s}	4.683926	$kJ\ kg^{-1}\ K^{-1}$		
9	m tube	0.01476	kg						
10	m paraffin	0.0164	kg		C_{p_l}	3.702817	$kJ\ kg^{-1}\ K^{-1}$		
11	Cp l'eau	4.192	$kJ\ kg^{-1}\ K^{-1}$						
12	Cp tube	0.9	$kJ\ kg^{-1}\ K^{-1}$		L_f	84810.97	$J\ kg^{-1}$		
13									
14	Section A1		12040.05						
15	Section A2		10845.06		T_o	77.2	$^{\circ}C$		
16	Section A3		20958.16		T_{fm}	52.425	$^{\circ}C$		
17									
18	Section A'1		17027.75		T_{f1}	55.21	$^{\circ}C$		
19	Section A'2		24347.09		T_{f2}	49.56	$^{\circ}C$		
20									
21	$Teau_s$	19	$^{\circ}C$		$Teau_l$	62.5	$^{\circ}C$		
22									
23	t_s	120	s		t_f	260	s		
24									
25	Rho_s	820	$kg\ m^{-3}$		Rho_l	752	$kg\ m^{-3}$		
26									
27	R	0.00362	m		R	0.00362	m		
28									
29	h_{eau}	2300	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$		h_{eau}	2300	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$		
30									
31	λ_s	0.186372	$W\ m^{-2}\ K^{-1}$		λ_l	0.145323	$W\ m^{-2}\ K^{-1}$		
32									
33	Méthode de polynôme								
34									
35									
36									

Annexe 2

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
8	m l'eau	0.0218	kg		C_{p_s}	4.243592	$kJ\ kg^{-1}\ K^{-1}$		
9	m tube	0.01476	kg						
10	m paraffin	0.0164	kg		C_{p_l}	3.810042	$kJ\ kg^{-1}\ K^{-1}$		
11	Cp l'eau	4.192	$kJ\ kg^{-1}\ K^{-1}$						
12	Cp tube	0.9	$kJ\ kg^{-1}\ K^{-1}$		L_f	87998.18	$J\ kg^{-1}$		
13									
14	Section A1		12456.43						
15	Section A2		11350.49		T_0	77.2	$^{\circ}C$		
16	Section A3		20135.1		T_{fm}	52.425	$^{\circ}C$		
17									
18	Section A'1		17207.76		T_{f1}	55.21	$^{\circ}C$		
19	Section A'2		25429.06		T_{f2}	49.56	$^{\circ}C$		
20									
21	$Teau_s$	19	$^{\circ}C$		$Teau_l$	62.5	$^{\circ}C$		
22									
23	t_s	120	s		t_f	260	s		
24									
25	Rho_s	820	$kg\ m^{-3}$		Rho_l	752	$kg\ m^{-3}$		
26									
27	R	0.00362	m		R	0.00362	m		
28									
29	h_{eau}	2300	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$		h_{eau}	2300	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$		
30									
31	λ_s	0.177027	$W\ m^{-2}\ K^{-1}$		λ_l	0.150481	$W\ m^{-2}\ K^{-1}$		
32									
33	Méthode des trapèzes								
34									
35									
36									

Annexe 3

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
8	m l'eau	0.0218	kg		C_{p_s}	4.237604	$kJ kg^{-1} K^{-1}$		
9	m tube	0.01476	kg						
10	m paraffin	0.0164	kg		C_{p_l}	3.809677	$kJ kg^{-1} K^{-1}$		
11	Cp l'eau	4.192	$kJ kg^{-1} K^{-1}$						
12	Cp tube	0.9	$kJ kg^{-1} K^{-1}$		L_f	88039.73	$J kg^{-1}$		
13									
14	Section A1		12395.99						
15	Section A2		11301.38		T_0	77.2	$^{\circ}C$		
16	Section A3		20124.75		T_{fm}	52.425	$^{\circ}C$		
17									
18	Section A'1		17125.62		T_{f1}	55.21	$^{\circ}C$		
19	Section A'2		25446.14		T_{f2}	49.56	$^{\circ}C$		
20									
21	$Teau_s$	19	$^{\circ}C$		$Teau_l$	62.5	$^{\circ}C$		
22									
23	t_s	120	s		t_f	260	s		
24									
25	Rho_s	820	$kg m^{-3}$		Rho_l	752	$kg m^{-3}$		
26									
27	R	0.00362	m		R	0.00362	m		
28									
29	h_{eau}	2300	$W m^{-1} K^{-1}$		h_{eau}	2300	$W m^{-1} K^{-1}$		
30									
31	λ_s	0.176898	$W m^{-2} K^{-1}$		λ_l	0.150532	$W m^{-2} K^{-1}$		
32									
33	Par logiciel Origin-pro								
34									
35									
36									

Références bibliographiques

- [1] G. Alva, Y. Lin, G. Fang. An overview of thermal energy storage systems. *Energy* 144: 341-378 (2018). doi:10.1016/j.energy.2017.12.037
- [2] A. Mehari, Z.Y. Xu, R.Z. Wang. Thermally-pressurized sorption heat storage cycle with low charging temperature. *Energy* 189: 116304 (2019). doi: 10.1016/j.energy.2019.116304
- [3] A. Maldonado-Alameda, A.M. Lacasta, J. Giro-Paloma, J.M. Chimenos, L. Haurie, J. Formosa. Magnesium phosphate cements formulated with low grade magnesium oxide incorporating phase change materials for thermal energy storage. *Construction and Building Materials* 155: 209- 216 (2017). doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.227
- [4] C. N. Elias, V. N. Stathopoulos. A comprehensive review of recent advances in materials aspects of phase change materials in thermal energy storage. *Energy Procedia* 161: 385-394 (2019). doi: 10.1016/j.egypro.2019.02.101
- [5] E. Gonzalez-Roubaud, D. Perez-Osorio, C. Prieto. Review of commercial thermal energy storage in concentrated solar power plants: Steam vs. molten salts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 80: 133-148 (2017). doi: 10.1016/j.rser.2017.05.084
- [6] A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, B. Buddhi. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13: 318-345 (2007). doi: 10.1016/j.rser.2007.10.005
- [7] P. Bose, V. A. Amirtham. A review on thermal conductivity enhancement of paraffinwax as latent heat energy storage material. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 65: 81-100 (2016). doi: 10.1016/j.rser.2016.06.071
- [8] D. Feldman, M.M. Shapiro, D. Banu, C.J. Fuks. Fatty acids and their mixtures as phasechange materials for thermal energy storage. *Solar Energy Materials* 18: 201-216 (1989). doi: 10.1016/0165-1633(89)90054-3
- [9] C. Amaral, R. Vicente, P.A.A.P. Marques, A. Barros-Timmons. Phase change materials and carbon nanostructures for thermal energy storage: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79: 1212-1228 (2017). doi: 10.1016/j.rser.2017.05.093
- [10] H. Fauzi, H.S.C Metselaar, T.M.I Mahlia, M. Silakhori, H. Chyuan Ong. Thermal characteristics reliability of fatty acid binary mixtures as phase change materials (PCMs) for thermal energy storage applications. *Applied Thermal Engineering* 80: 127-131 (2015). doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.01.047
- [11] H. Nazir, M. Batool, M. Ali, A. M. Kannan. Fatty acids based eutectic phase change system for thermal energy storage applications. *Applied Thermal Engineering* 142: 466-475 (2018). doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.07.025
- [12] C. Pagkalos, G. Dogkas, M. K. Koukou, J. Konstantaras, K. Lympiris, M. Gr. Vrachopoulos. Evaluation of water and paraffin PCM as storage media for use in thermal energy storage

- [13] T. Kousksou, F. Strub, J. Castaing Lasvignottes. Second law analysis of latent thermal energy storage for solar system. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 91: 1275-1281 (2007). doi:10.1016/j.solmat.2007.04.029
- [14] Zhang P, Meng ZN, Zhu H, Wang YL, Peng SP. Melting heat transfer characteristics of a composite phase change material fabricated by paraffin and metal foam. *Appl Energy* 2017; 185: 1971–83.
- [15] Al-Jethelah M, Ebadi S, Venkateshwar K, Tasnim SH, Mahmud S, Dutta A. Charging nanoparticle enhanced bio-based PCM in open cell metallic foams: an experimental investigation. *Appl Therm Eng* 2019; 148:1029–42.
- [16] Yang X, Bai Q, Guo Z, Niu Z, Yang C, Jin L, Lu TJ, et al. Comparison of direct numerical simulation with volume-averaged method on composite phase change materials for thermal energy storage. *Appl Energy* 2018; 229:700–14.
- [17] M.M. Farid, A. Kanzawa, Thermal performance of a heat storage module using PCM's with different melting temperatures: mathematical modeling, *J. Sol. Energy Eng.* 111 (1989) 152–157.
- [18] M.M. Farid, Y. Kim, A. Kansawa, Thermal performance of a heat storage module using PCM's with different melting temperature: experimental, *J. Sol. Energy Eng.* 112 (1990) 125–131.
- [19] J. Wang, Y. Ouyang, G. Che, Experimental study on charging processes of a cylindrical heat storage capsule employing multiple-phase-change materials, *Int. J. Energy Res.* 25 (2001) 439–447.
- [20] Korti AN, Tlemsani FZ. Experimental investigation of latent heat storage in a coil in PCM. *J Energy Storage* 2016; 5:177–186.
- [21] Senthil R, Cheralathan M. Natural heat transfer enhancement methods in phase change material based thermal energy storage. *Int J Chem Tech Res* 2017;9: 563–570.
- [22] Guellil H, Korti AN, Experimental effect of inclination on the process of melting paraffin in a square cavity
- [23] Guellil H, Korti AN, Abboudi S. Experimental study of the performance of a novel latent heat charging unit on charging and discharging processes. *Heat and Mass Transf* 2019;55:855–866.
- [24] H. Guellil, Thèse pour obtenir le grade de docteur en Es-Sciences université Aboubakr belkaid Tlemcen, département Génie mécanique, Spécialité Energétique "Etude expérimentale d'un système de stockage thermique à air à base de MCP ", p .91, 2019.
- [25] 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.

Références bibliographiques

- [26] Y. Zhang, Y. Jiang, Y. Jiang, A simple method, the T–History method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials, *Measurement Science and Technology* 1999, 10, 201–205.
- [27] H. Hong, S. K. Kim, Y. Kim, Accuracy improvement of T-history method for measuring heat of fusion of various materials, *International Journal of Refrigeration*, 2004, 27, 360–366.
- [28] C. Kaviarasu, D. Prakash, Review on Phase Change Materials with Nanoparticle in Engineering Applications, *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2016, 9(4), 26- 36.
- [29] Atul Sharma«Review on thermal energy storage with phase change material and applications», *Renewable and sustainable energy reviews* 13 (2009) 318 -345.
- [30] http://fr.wikipedia.org/wiki/Stockage_d'%C3%A9nergie.
- [31] I.O.salyer and a.k.sircar«phase change materials for heating and cooling of residential building ,proceeding of the 28th intersociety energy conversion engineering conference», reno, nevada.12-17 aout 1990
- [32] Armand ERB, Utilisation des MCP dans le batiment 3E Aout 2011.
- [33] Maha AHMAD, Couplage matériaux à changement de phase, supe isolation, apports solaire.
- [34] L.L. Vasiliev, V.S. Burak, A.G. Kulakov, D.A. Mishkinis et P.V. Bohan«Latent heat storage modules for preheating internal combustion engines: application to a bus petrol engine»*A pplied Ther ma l Engineering*, Vol. 20, pp. 913-923, 2000.
- [35] C. Flory-Celini«Modélisation et positionnement de solutions bioclimatiques dans le bâtiment résidentiels existant»Thèse de Doctorat: Génie Civil, Université de Lyon 1 Claude Bernard, 2008.
- [36] A. Gil, M. Medrano, A. Lazaro, P. Dolado, B. Zabla, L. Cabeza, “State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation Part 1, concepts, materials and modellization”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 31-55
- [37] M. Pierre Pedro «développement d'un procède de stockage d'énergie thermique haute température par voie thermochimique». Institut national polytechnique de Toulouse, le lundi 9décembre 2013.
- [38] Serge Blaise Ekomy Ango «Contribution au stockage d'énergie thermique e²bâtiment : développement d'un système actifà matériaux à changement de phase» l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2011.
- [39] SHARMA S.D SAGARAK. “Latent heat storage material and system a review”. *International journal of green energy* 2: 1-56. (2005).

Références bibliographiques

- [40] ABHAT A, Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage material. *Solar energy*, VOL, 30, NO313-332.5(1983).
- [41] K. Pielichowska et K Pielichowski «phase change materials for thermal energy storage», *progresse in material science*, VOL.65, no.0, pp 67-123. Aug 2014.
- [42] Lane, 1983. *Solar Heat Storage: Latent Heat Material*, Volume 1: Background and Scientific Principles. USA: CRC
- [43] Abhat (1983). *Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage: Heat Storage Materials*. *Solar Energy*, Vol. 30, No. 4, pp. 3 13-332.
- [44] X. Py, R. Olives, S. Maurin, Paraffin/porous-graphite-matrix composite as a high and constant power thermal storage material, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 44, pp.27272737, 2001
- [45] C.K. Jotshi, D.Y. Goswami and J.J. Tomlinson, Solar thermal energy storage in phase change materials, in *proc. 1992 ASES Annual Conf, USA, 1992*.
- [46] Matthieu Martinelli. *Stockage d'energie thermique par changement de phase – Application aux réseaux de chaleur*. Thermique [physics.class-ph]. Université Grenoble Alpes, 2016. Français.
- [47] Saib Hind «Etude de simulation des phénomènes de transfert thermique lors de la solidification d'alliages», mémoire de magister 2009..
- [48] L.F. Cabeza, M. Ibanez, C. Solé, J. Roca et M. Noués «Experimentation with a water tank including a PCM module»*Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 90, pp. 1273-1282, 2006.
- [49] L.F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A.D. Gracia et A.I. Fernandez«Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings:A review,*Renewable and Sustainable Energy Reviews*», Vol. 15, pp. 1675-1695, 2011
- [50] R. Velraj, R. V Seeniraj, B. Hafner, C. Faber et K. Schwarzer «Heat transfer enhancement in latent heat storage system». *Sol. Energy*. Vol. 65. No 3, pp 171-180 Feb 1999.
- [51] A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen et D. Buddhi, «Review on thermal energy storage with phase change materials and applications»*Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, pp. 318-345, 2009.
- [52] A. Valan Arasu et Arun S. Mujumdar, Numerical study on melting of paraffin wax with Al₂O₃ in a square enclosure. *Int. Comm. in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 8–16 (2012).

الملخص

طريقة T-history هي طريقة بسيطة لتحديد الخصائص الفيزيائية الحرارية لـ MCP مقارنة بالطرق الأخرى، مثل طرق القياس الكلاسيكية، والتحليل الحراري التفاضلي (DTA) وطرق قياس المسعر التفاضلي (DSC)، فإنها تتميز بالخصائص التالية: الوحدة التجريبية بسيطة، وقادرة على قياس درجات حرارة معينة، وحرارة الانصهار، والتوصيل الحراري من عينات MCP متعددة في وقت واحد. كما أنه يجعل من الممكن مراقبة عملية تغيير الطور لكل عينة MCP. هذه الطريقة مفيدة بشكل خاص لاختيار دفعات من MCP المستخدمة للأغراض الهندسية وإعداد MCP جديدة تستخدم لأغراض أخرى.

يقدم هذا العمل دراسة تجريبية لعملية التسخين والتبريد لمادة MCP (خصائصه الفيزيائية الحرارية غير معروفة) باستخدام طريقة T-history. تسمح لنا هذه الطريقة بالتوصيف التجريبي للمواد المستخدمة من خلال سلسلة من التجارب التي أجريت داخل مختبر "Energetic and Thermal Applied ETAP التابع لجامعتنا.

الكلمات المفتاحية: MCP، حرارة الانصهار، الحرارة النوعية، التوصيل الحراري

Abstract

The T-history method is a simple method to determine the thermophysical properties of a PCM. Compared with other methods, such as classical calorimetric methods, differential thermal analysis (DTA) and differential scanning calorimetry (DSC) methods, it has the following characteristics: the experimental unit is simple, capable of measuring specific heats, heat of fusion and thermal conductivity of multiple PCM samples simultaneously. It also makes it possible to observe the phase change process of each PCM sample. This method is particularly useful for selecting batches of PCMs used for engineering purposes and preparing new PCMs used for other purposes.

This work presents an experimental study of the heating and cooling process of a PCM (whose thermophysical properties are unknown) using the T-history method. This method allows us to experimentally characterize the material used by a series of experiments carried out within the « Energétique et Thermique Appliquée ETAP » laboratory of our university.

Keywords: PCM, heat of fusion, specific heat, thermal conductivity

Résumé

La méthode T-history est une méthode simple pour déterminer les propriétés thermo physiques d'un MCP. Comparée à d'autres méthodes, telles que les méthodes calorimétriques classiques, l'analyse thermique différentielle (DTA) et les méthodes de calorimétrie à balayage différentiel (DSC), elle présente les caractéristiques suivantes : l'unité expérimentale est simple, capable de mesurer les chaleurs spécifiques, la chaleur de fusion et la conductivité thermique de plusieurs échantillons de MCP simultanément. Elle permet aussi d'observer le processus de changement de phase de chaque échantillon de MCP. Cette méthode est particulièrement utile pour la sélection de lots de MCP utilisés à des fins d'ingénierie et de préparer de nouveaux MCP utilisés à d'autres fins.

Ce travail présente une étude expérimentale du processus de chauffage et de refroidissement d'un MCP (dont nous ignorons ses propriétés thermo physiques) en utilisant la méthode T-history. Cette méthode nous permet de caractériser expérimentalement le matériau utilisé par une série d'expériences réalisés au sein du laboratoire « Energétique et Thermique Appliquée ETAP » de notre université.

Mots clés : MCP, chaleur de fusion, chaleur spécifique, conductivité thermique.