

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 Belkaid –Tlemcen-

FACULTE DE TECHNOLOGIE



Energétique et Thermique
Appliquée ETAP

MÉMOIRE

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

En : Génie Mécanique

Spécialité : Génie énergétique

Présenté par : **GHAOUTI Farah Sanaa**

Sujet

**OPTIMISATION DE STOCKAGE D'ENERGIE THERMIQUE PAR
VOIE EXPERIMENTALE**

Soutenu publiquement le **29/ 06/ 2021**, devant le jury composé de :

M. ALIANE.A	MCB	Univ. Tlemcen	Président
M. GUELLIL.H.	MCB	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
M. KORTI. A.N	Professeur	Univ. Tlemcen	Co- Directeur de mémoire
Mme. SAIB . H	MAA	Univ. Tlemcen	Examinatrice

Année universitaire: **2020-2021**

Remerciements

En tout premier lieu, je remercie le bon Dieu, tout puissant, de m'avoir donné le courage, la foi, et la patience pour bien mener ce travail

*Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à Mon Directeur de mémoire Monsieur **H. GUELLIL** ainsi qu'à mon co-directeur Monsieur **A. N. KORTI** pour leurs directives, aide, pour leur encadrement de qualité, conseils et critiques constructives, leur corrections et patience, ainsi pour le temps qu'ils ont consacré à la réalisation de ce travail*

*Je tiens aussi à remercier **K. MISSOUM** pour l'aide qu'elle m'a apportée.*

*Mes vifs remerciements au **M. A. ALIANE**. qui m'a fait l'honneur de présider le jury et aussi, **Mme. H. SAIB** qui ma fait l'honneur d'examiner et d'évaluer ce modeste travail.*

Dédicaces

Avec l'expression de ma reconnaissance, Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents M. et Yekhlef .k

*T'avoir à mes côtés a toujours été ma source de force pour
affronter les différents obstacles.*

A mes très chères sœurs khadidja, imane, asmaa, imane

*A mes nièces souhyr, narimane, cirine, mouhamed, yassmine et loubna
pour leurs encouragements inestimables*

*A mes chers amis Nacer Somia, Boussouar Ghizelen , Meziani Anas et toutes
personnes ayant participé de loin ou de près à la réalisation de ce travail*



Résumé

Les matériaux à changement de phase MCP ont suscités un intérêt croissant dans la recherche en énergétique, en raison de leur rôle important dans la réalisation des économies d'énergie dans diverses applications. Parmi le nombre important de MCP étudiés dans la littérature « les paraffines » sont considérées comme prometteuses pour le stockage en raison de leurs propriétés thermiques appropriées et leur stabilité chimique. Les travaux récents essaient de maîtriser les mécanismes qui se déroulent durant la fusion et la solidification du MCP afin d'accélérer le processus de transfert de chaleur et d'améliorer le processus de stockage et déstockage. Ce travail présente une étude expérimentale du processus de stockage et de déstockage de l'énergie thermique par l'utilisation de la paraffine comme MCP dans un stockeur thermique par chaleur latente. Il représente une suite logique aux travaux antérieurs réalisés au sein du laboratoire « Energétique et Thermique Appliquée ETAP » de notre université. Afin d'améliorer le phénomène de stockage et de déstockage, une série d'expériences sont réalisées pour établir l'influence de la puissance thermique fournie et le débit massique du fluide caloporteur (air) sur les performances du stockeur thermique réalisé.

Mots clés : *Stockage Thermique, MCP, Paraffine, transfert de chaleur, chaleur latente.*

Abstract

MCP phase change materials have attracted increasing interest in energy research, due to their important role in achieving energy savings in various applications. Among the large number of PCMs studied in the literature "paraffins" are considered promising for storage due to their suitable thermal properties and chemical stability. Recent work attempts to master the mechanisms that take place during the melting and solidification of MCP in order to accelerate the heat transfer process and improve the storage and retrieval process. This work presents an experimental study of the process of storage and release of thermal energy by the use of paraffin as MCP in a thermal storage by latent heat. It represents a logical continuation of previous work carried out in the "Energetics and Applied Thermal ETAP" laboratory of our university. In order to improve the phenomenon of storage and retrieval, a series of experiments are carried out to establish the influence of the thermal power supplied and the mass flow rate of the heat transfer fluid (air) on the performance of the thermal storage device produced.

Keywords: Thermal Storage, MCP, Paraffin, heat transfer, latent heat

المخلص

جذبت مواد تغيير طور MCP اهتمامًا متزايدًا بأبحاث الطاقة ، نظرًا لدورها المهم في تحقيق توفير الطاقة في مختلف التطبيقات. من بين العدد الكبير من MCP التي تمت دراستها في الأدبيات ، تعتبر "البارافينات" واعدة للتخزين نظرًا لخصائصها الحرارية المناسبة واستقرارها الكيميائي. محاولات العمل الأخيرة لإتقان الآليات التي تحدث أثناء ذوبان وتصلب MCP من أجل تسريع عملية نقل الحرارة وتحسين عملية التخزين والاسترجاع. يقدم هذا العمل دراسة تجريبية لعملية تخزين وإطلاق الطاقة الحرارية عن طريق استخدام البارافين كما MCP في مخزن حراري بواسطة الحرارة الكامنة. إنه يمثل استمرارًا منطقيًا للعمل السابق الذي تم تنفيذه في مختبر "Energetics and Applied Thermal ETAP" في جامعتنا. من أجل تحسين ظاهرة التخزين والاسترجاع ، يتم إجراء سلسلة من التجارب لتحديد تأثير الطاقة الحرارية المزودة ومعدل التدفق الكتلي لسائل نقل الحرارة (الهواء) على أداء جهاز التخزين الحراري المنتج.

الكلمات المفتاحية: التخزين الحراري MCP ، البارافين ، انتقال الحرارة ، الحرارة الكامنة

Table des matières

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Introduction générale 1

Chapitre 1 .Etude bibliographique

1.1 Introduction 5

1.2 Revue de la littérature et classement des MCP 5

1.3 Etude des processus de fusion et de solidification de MCP 7

1.4 Amélioration du transfert thermique dans les MCP 11

Chapitre 2 .Stockage de l'énergie thermique à chaleur latente utilisant MCP

2.1 Introduction 17

2.2 Définition..... 18

2.3 Stockage thermique 19

2.3.1 Stockage sensible..... 19

2.3.2 Stockage latent..... 20

2.3.3 Stockage thermo-chimique 21

2.4 Phénomène de changement de phase liquide-solide pour le stockage d'énergie thermique 22

2.5 Phénomènes influençant sur l'efficacité du stockage 23

2.6 Généralités sur les MCP 24

2.7 Propriétés des matériaux à changement de phase 25

2.7.1 Critères thermodynamiques 25

2.7.2 Critères cinétiques 26

2.7.3 Critères chimiques 26

2.7.4	Critères économiques	26
2.8	Différentes types des MCP.....	27
2.8.1	MCP inorganiques	27
2.8.2	MCP organiques	28
2.8.3	Comparaison entre les MCP organiques et inorganiques.....	33
2.9	Phénomènes physiques lors du changement de phase	34
2.9.1	Interface mobile solide-liquide.....	34
2.9.2	Changement de densité lors du changement de phase	35
2.9.3	Effet de flottabilité dans la région de fusion	35
2.9.4	Changement de phase sur une large plage de température.....	35
2.10	Stockage d'énergie par chaleur latente dans les MCP	35
2.11	Généralités sur les échangeurs	37
2.11.1	Principe de fonctionnement.....	38
2.12	Ailettes.....	38
2.12.1	Echangeurs à ailettes	38
2.12.2	Différents types d'ailerres.....	38

Chapitre 3 .Procédure expérimentale

3.1	Introduction	41
3.2	Présentation du dispositif expérimental	41
3.2.1	Résistance thermique.....	42
3.2.2	Ventilateur	43
3.2.3	Débitmètre à fil chaud	43
3.2.4	Stockeur thermique.....	44
3.2.5	MCP cire de la paraffine.....	45
3.2.6	Echangeurs de chaleur	45
3.3	Remplissage des tubes par la paraffine	46
3.4	Mesure des températures	47

3.5	Chaine d'acquisition.....	47
3.6	Description du logiciel LabView.....	48
3.6.1	Présentation de l'interface	49
3.7	Procédure expérimentale	51

Chapitre 4 .Résultats et interprétations

4.1	Introduction	54
4.2	Evolution de la température du MCP.....	55
4.2.1	Phase de stockage	55
4.2.2	Phase de déstockage	56
4.2.3	Différence de température de l'air.....	57
4.3	Effet du débit massique de l'air sur les températures du MCP.....	58
4.3.1	Phase de stockage	58
4.3.2	Phase de déstockage	61
4.3.3	Effet du débit massique de l'air sur la différence de sa température	62
4.4	Effet de la puissance sur les températures du MCP	64
4.4.1	Phase de stockage	64
4.4.2	Phase de déstockage	66
4.4.3	Effet de la puissance sur la différence de température de l'air	68
4.5	Evolution de l'énergie thermique.....	69
4.5.1	Effet débit sur l'énergie échangée	69
4.5.2	Effet de la puissance sur l'énergie échangée	70
4.6	Efficacité du stockeur.....	71
4.6.1	Effet de la puissance sur l'efficacité du stockeur	73

Conclusion générale	74
----------------------------------	-----------

Références bibliographiques	77
--	-----------

Liste des figures

Chapitre. 1

Fig. 1. 1. Représentation schématique d'un module d'encapsulation annulaire	7
Fig. 1. 2. Visualisation du front dans la partie basse de l'échangeur	7
Fig. 1. 3. Fusion de 3 MCP à l'instant 53 min.....	8
Fig. 1. 4. Représentation de la cavité inclinée	9
Fig. 1. 5. L'évolution de l'interface solide/liquide durant la fusion de la paraffine.....	9
Fig. 1. 6. L'évolution de l'interface solide/liquide durant la solidification de la paraffine	10
Fig. 1. 7. Comportement expérimental et numérique de la cire de paraffine	10
Fig. 1. 8. L'évolution de la température du MCP durant la période de stockage.....	12
Fig. 1. 9. Applications passives de systèmes de plafond amélioré par MCP	13
Fig. 1. 10. Applications actives de systèmes de plafond amélioré par MCP	13
Fig. 1. 11. MCP micro encapsulé	14
Fig. 1. 12. Images MEB de la paraffine micro encapsulée à différents cycles thermiques	14
Fig. 1. 13. Images MEBE de : a) Farine de grignon ; b) Comp1 : P/FG.....	14

Chapitre. 2

Fig.2. 1. Schéma de principe du déplacement de la zone de thermocline. Le stockage thermocline.....	18
Fig.2. 2. Evolution de la température d'un corps pur avec changement d'état	18
Fig.2. 3. Organigramme de stockage d'énergie thermique	22
Fig.2. 4. Stockage de chaleur par changement de phase (solide –liquide) avec paraffine	22
Fig.2. 5. Courbe de surfusion.....	23
Fig.2. 6. Famille de matériaux des MCP	27
Fig.2. 7. Hydrates salins	28
Fig.2. 8. Paraffines solide et en poudre	29
Fig.2. 9. Acides gras	30
Fig.2. 10. MCP Eutectique.	32
Fig.2. 11. Stockage de la chaleur comme	36

Liste des figures

Fig.2. 12. Stockage dans une plage de.....	36
Fig.2. 13. Paraffine	38
Fig.2. 14. Visualisation de la fusion d'une paraffine. La zone pâteuse entre le solide et le liquide est nettement visible [41].....	38
Fig.2. 15. Récapitulatif des différents types d'ailettes	39

Chapitre. 3

Fig.3 1. Canal d'air avant l'isolation	41
Fig.3 2. Banc expérimental d'un stockeur thermique à MCP	42
Fig.3 3. Résistances de chauffage d'air	42
Fig.3 4. Ventilateur à vitesse variable	43
Fig.3 5. Débitmètre d'air à fil chaud placé directement à l'intérieur du canal.....	43
Fig.3 6. Stockeur thermique équipé.....	44
Fig.3 7. Échangeur isolé dans le stockeur	44
Fig.3 8. Isolation du stockeur thermique	44
Fig.3 9. Echangeur à ailettes.....	46
Fig.3 10. Fusion de la paraffine	46
Fig.3 11. Remplissage des tubes de l'échangeur par la paraffine	46
Fig.3 12. Positon des thermocouples à l'intérieur des tubes en U.....	47
Fig.3 13. Emplacement des modules dans l'interface avec le branchement	48
Fig.3 14. Exemple de graphes enregistrés sur l'interface.....	50
Fig.3 15. Enregistrement des données sur fichier Excel.....	50
Fig.3 16. Présentation de l'interface (face avant).....	51
Fig.3 17. Laine de roche (Rockwool KRAFT).....	51
Fig.3 18. Schéma technique du banc expérimental	52

Chapitre. 4

Fig. 4. 1. Schéma technique du stockeur (Positionnement des échangeurs)	54
Fig. 4. 2. Evolution temporelle des températures du MCP durant le processus de stockage pour (36 W et 0,4002 kg/min)	55
Fig. 4. 3. Evolution temporelle des températures du MCP durant le processus de déstockage pour (36 W et 0,4002 kg/min).....	56
Fig. 4. 4. Evolution temporelle de la différence de températures de l'air pour (36 W et 0,4002 kg/min)	57
Fig. 4. 5. Evolution temporelle des températures du MCP durant la phase de stockage pour différents débits massiques d'air et 36 W de puissance	60
Fig. 4. 6. Evolution temporelle des températures du MCP pour différent puissances (avec un débit 0.4002 kg/min) durant la phase de stockage	61
Fig. 4. 7. Evolution temporelle de la différence de température de l'air pour différents débits massiques de l'air avec une puissance de 36 W	63
Fig. 4. 8. Evolution temporelle des températures du MCP pour différent puissances (avec un débit 0.4002 kg/min) durant la phase de stockage	65
Fig. 4. 9. Evolution temporelle des températures du MCP pour différentes puissances (avec un débit 0.4002 kg/min) durant la phase de déstockage	67
Fig. 4. 10. Evolution temporelle de la différence de température de l'air pour différentes puissances et un débit fixe de 0.4002 kg/min	68
Fig. 4. 11. Evolution temporelle de l'énergie du MCP pour différents débits	69
Fig. 4. 12. Evolution temporelle de l'énergie du MCP pour différentes puissances et un débit 0.4002 kg/min durant la phase de stockage et de déstockage.....	70
Fig. 4. 13. Evolution temporelle de l'efficacité pour différents débits d'air et 36 W durant la phase de stockage et de déstockage	71
Fig. 4. 14. Evolution temporelle de l'efficacité pour différentes puissances et un débit de 0,4002 kg/min durant la phase de stockage et de déstockage	73

Liste des Tableaux

Tableau 1. 1	Classification des matériaux à changement de phase	6
Tableau 2. 1	Avantages et inconvénients des types de changement de phase.....	25
Tableau 2. 2	Caractéristiques de quelques MCP organiques [36]	33
Tableau 2. 3	Résumé de la comparaison entre les MCP organiques et inorganiques.	34
Tableau 3. 1.	Propriétés thermo-physique de la paraffine	45
Tableau 3. 2.	Propriétés thermo-physique de l'air.....	45
Tableau 4. 1.	Effet du débit durant la phase de stockage	58
Tableau 4. 2.	Effet du débit durant la phase de déstockage.....	62
Tableau 4. 3.	Effet de la puissance durant la phase de stockage	64
Tableau 4. 4.	Effet de la puissance durant la phase de déstockage	66

Nomenclature

Symboles

T : Température (°C)

T12 : thermocouple profondeur 12 cm (°C)

T24 : thermocouple profondeur 24 cm (°C)

T_{en} : thermocouple d'entrée d'air (°C)

T_{sr} : thermocouple de sortie d'air (°C)

m: Masse du corps (kg)

C_p : Capacité spécifique (J/kg.K)

h: Enthalpie (J/kg)

V: Volume (l)

E : l'énergie thermique (kJ)

Symboles Grecs

Δt : Pas de temps

ε : Efficacité

ρ : masse volumique (kg/m³)

λ : conductivité thermique (W/m.K)

μ: viscosité dynamique (Pa.s)

Abréviation

MCP : Matériau à changement de phase

HTF: Fluide caloporteur

Ech: Echangeur

E1 : Echangeur n°1

E2 : Echangeur n°2

E3 : Echangeur n°3

LHTES: Latent Heat Thermal Energy Storage

Introduction générale

Introduction générale

La production de nouvelles sources d'énergie est la question majeure la plus importante selon les dernières publications effectuées dans ce domaine afin d'améliorer l'efficacité énergétique. Le stockage de l'énergie thermique est l'une des technologies clés pour la conservation de l'énergie. Pour chaque système de stockage, il existe une grande variété de matériaux en fonction de la plage de température et de l'application.

L'étude des phénomènes de stockage et de déstockage de la chaleur à l'aide des matériaux à changement de phase solide-liquide suscite jusqu'à aujourd'hui l'intérêt des scientifiques dans des secteurs technologique. Les applications peuvent être divers particulièrement ceux en rapport avec les systèmes de stockage de chaleur ou de froid développés pour l'agroalimentaire, le chauffage et la climatisation dans le secteur résidentiel ainsi que la dissipation de chaleur par voie latente dans les systèmes passifs de refroidissement des composants électroniques.

Une autre façon très pratique de stocker l'énergie calorifique consiste à utiliser les matériaux à changement de phase (MCP). L'énergie est alors emmagasinée sous forme de chaleur latente durant la fusion de ces matériaux, puis restituée au milieu ambiant au cours de leur solidification. Le stockage d'énergie thermique latente pendant le processus de fusion du MCP est exploité dans de nombreuses applications comme : l'énergie solaire, eau chaude, isolations et climatisation des bâtiments, refroidissement des composants électroniques, etc.

Un grand nombre de MCP dans toute la gamme de température de fusion requise présentent de nombreux problèmes notamment les produits organiques et inorganiques comme la corrosion, la ségrégation de phase ou inflammabilité, mais le problème crucial des MCP est leur faible conductivité thermique conduisant à des processus de charge et de décharge assez lents. Les performances thermiques des systèmes de stockage par chaleur latente (LHTES) peuvent être considérablement améliorées en utilisant des méthodes d'amélioration des mécanismes de transfert de chaleur.

Introduction générale

Le présent mémoire porte sur l'étude expérimentale du processus de stockage et déstockage de l'énergie thermique par l'utilisation de MCP type paraffine. Le but est d'établir l'influence des différentes températures relevées sur les performances thermiques du stockeur, à savoir, la température d'entrée du fluide caloporteur (air) et son débit massique. Les expériences sont réalisées au sein du laboratoire énergétique et thermique appliquée (ETAP) de la faculté de technologie, Université Aboubakr 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 présente un état d'art des matériaux à changement de phase basée sur les connaissances les plus récentes.
- Le troisième chapitre expose l'ensemble du dispositif expérimental avec les matériels de mesure utilisés pour étudier les phénomènes liés au transfert thermique et au processus de stockage et déstockage de chaleur latente.
- Le quatrième chapitre expose les résultats expérimentaux et leurs discussions.

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

Chapitre 1 :
Etude bibliographique

1.1 Introduction

L'étude de stockage d'énergie thermique joue un rôle important dans l'utilisation rationnelle de l'énergie principalement sur le stockage et le déstockage de la chaleur et l'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP). Les MCP ont suscités un intérêt croissant dans la recherche en énergétique, en raison de leur rôle important dans la réalisation des économies d'énergie dans diverses applications.

La littérature révèle que la plupart des travaux réalisés sur les problèmes de changement de phase solide-liquide (expérimentaux ou numériques) étudie la fusion et la solidification de la paraffine comme MCP, qui possède une température de fusion peu élevée. Plusieurs travaux ont été entamés dans ce contexte où Stefan en 1889 est le premier à étudier les problèmes de changement de phase. Vu leurs intérêts industriels et leurs applications, plusieurs chercheurs se sont intéressés par la suite à l'étude de ce phénomène.

1.2 Revue de la littérature et classement des MCP

De nombreux auteurs se sont intéressés aux MCP solide-liquide dans le but de stocker de l'énergie thermique à température constante, couvrant plusieurs gammes de températures variant des basses températures ($< 0\text{ °C}$), pour le stockage du froid, aux très hautes températures ($> 500\text{ °C}$). Dans la littérature, les MCP sont le plus souvent caractérisés par deux grandeurs physiques suivantes :

- La température de fusion, qui représente la température caractéristique de la transition de phase
- La chaleur latente de fusion qui représente l'énergie mise en jeu lors de cette transition de phase

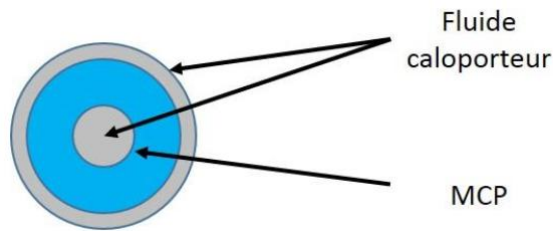


Fig. 1. 1. Représentation schématique d'un module d'encapsulation annulaire

1.3 Etude des processus de fusion et de solidification de MCP

M.Martinelli [3], conclure que les différences de temps caractéristiques expérimentalement entre les essais de charge et de décharge ne sont pas attribuables à la convection naturelle puisque l'influence de la convection naturelle sur les performances globales est négligeable. Aussi, la fusion n'est-elle pas intrinsèquement plus rapide que la solidification dans les géométries considérées et sous réserve que la conductivité thermique du MCP soit la même dans le solide que dans le liquide. Les différences observées expérimentalement sont donc attribuées aux différences de température entre le fluide caloporteur et le changement de phase (Fig. 1.2),.

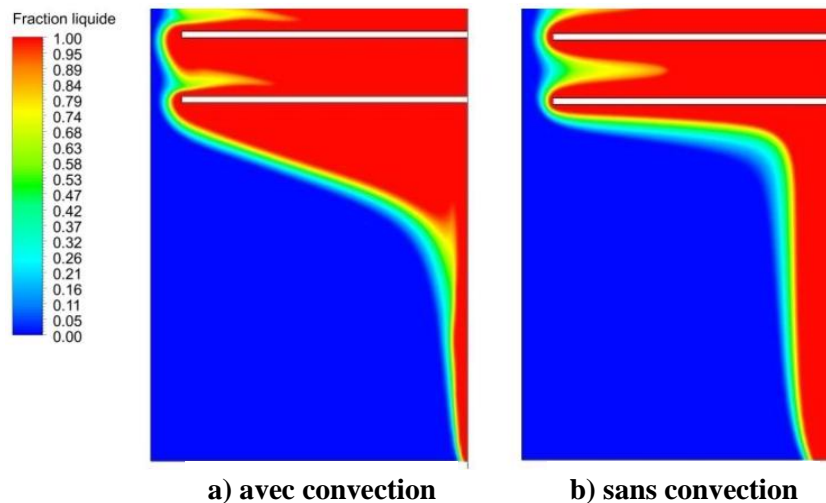


Fig. 1. 2. Visualisation du front dans la partie basse de l'échangeur, avec (a) ou sans (b) modélisation de la convection (charge par le haut).

Chapitre 1. Etude bibliographique

Tlemsani et al [4], étudient le comportement plusieurs MCP durant leur décharge dans une unité pour stocker l'énergie calorifique par chaleur latente (Fig. 1.3). L'étude a été faite avec trois différents types de paraffines en tant que matériau à changement de phase (MCP). L'eau est utilisée comme fluide caloporteur (HTF). Les effets de la température d'entrée HTF, du débit et du type de MCP ont été traités durant les deux processus de charge et de décharge. La température d'entrée a un effet significatif sur les performances de l'échangeur de telle que la phase de charge est accélérée de 54,5% et la phase de décharge est retardée de 48,5%. L'ajout de l'huile de moteur à la paraffine a amélioré la vitesse du processus de charge et de décharge respectivement de 42,4 et de 66%.



Fig. 1. 3. Fusion de 3 MCP à l'instant 53 min.

Korti et al [5], ont réalisé un banc expérimental pour visualiser le processus de changement de phase dans une enceinte thermique et étudier l'effet de l'inclinaison de l'enceinte (Fig. 1.4). Les résultats montrent qu'une cavité chauffée par le bas accélère le temps global de la fusion de 3h 25 min par rapport à une cavité inclinée à 45° et une cavité chauffée par le côté. Un seul vortex domine la convection naturelle dans une cavité chauffée par le côté. Le phénomène de Rayleigh-Bénard est démontré dans l'expérience pour lequel, la convection naturelle est dominée dans le cas d'un échauffement par le bas. Pour une inclinaison de 45°, les deux phénomènes réagissent mutuellement et le nombre de cellules diminue de onze à six rouleaux.

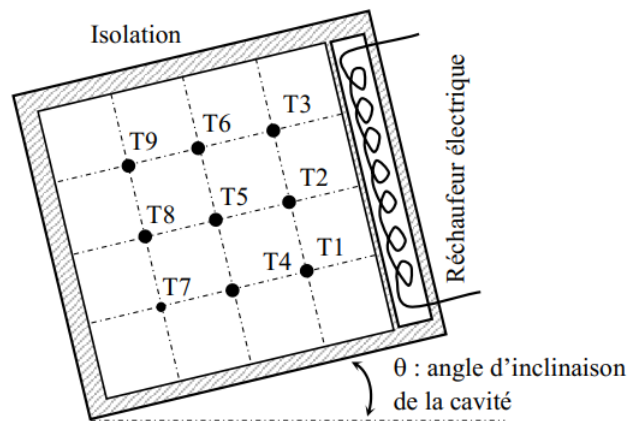


Fig. 1. 4. Représentation de la cavité inclinée

Guellil et al [6] ont montré dans des travaux expérimentaux que la fusion de la paraffine se développe en trois zones : solide, liquide et pâteuse. Au cours du processus de fusion, la phase liquide monte vers le haut et la phase solide reste en bas sous forme conique. La zone pâteuse sépare les deux phases. La paraffine liquide descend le long de l'interface solide-liquide en libérant graduellement la chaleur. La fusion de la paraffine est accompagnée par une dilatation volumétrique assez importante de l'ordre de 3 %. La fusion complète est atteinte après 1h15min (Fig.1.5). Le temps de la solidification complète est assez long par rapport au temps de fusion, il dure jusqu'à 135min (Fig.1.6) car le refroidissement s'effectue par convection naturelle moins intense que celle de la phase de fusion.

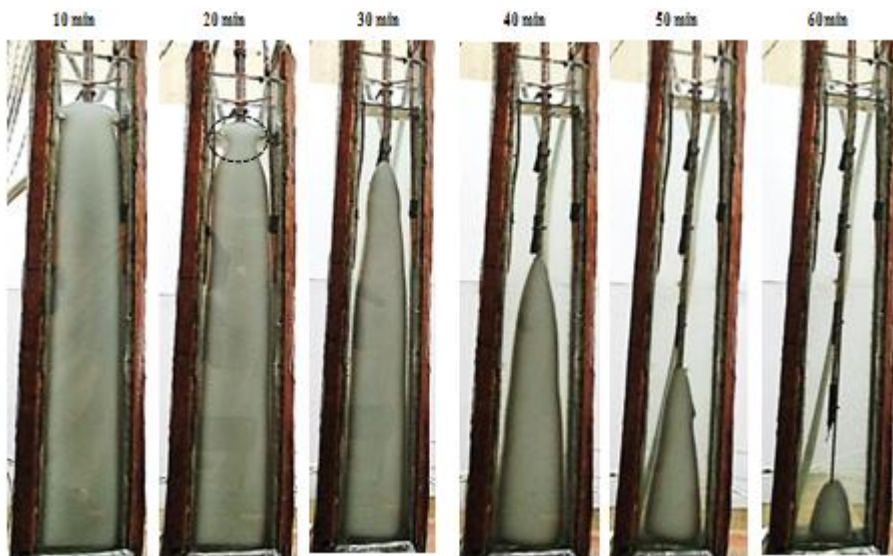


Fig. 1. 5. L'évolution de l'interface solide/liquide durant la fusion de la paraffine

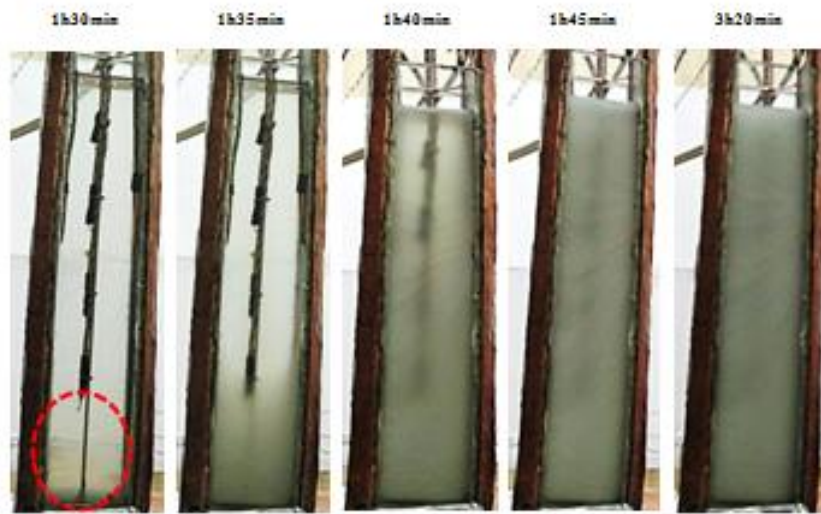


Fig. 1. 6. L'évolution de l'interface solide/liquide durant la solidification de la paraffine

Assis et al. [7] ont étudié le processus de fusion d'un matériau à changement de phase (MCP) basé sur la cire de paraffine disponible sur le marché. Les expériences ont été effectuées dans un réservoir transparent, rempli d'eau de température uniforme. Le MCP est rempli dans des enceintes sphériques de 40, 60 et 80 mm de diamètre (Fig. 1.7). Les simulations ont fourni des champs détaillés de phase et d'écoulement dans le système et montrent l'importance de fusion par contact étroit du début à la fin, et incorporent ainsi des phénomènes tels que la convection dans la phase liquide et l'augmentation du volume de MCP dû au changement de phase.

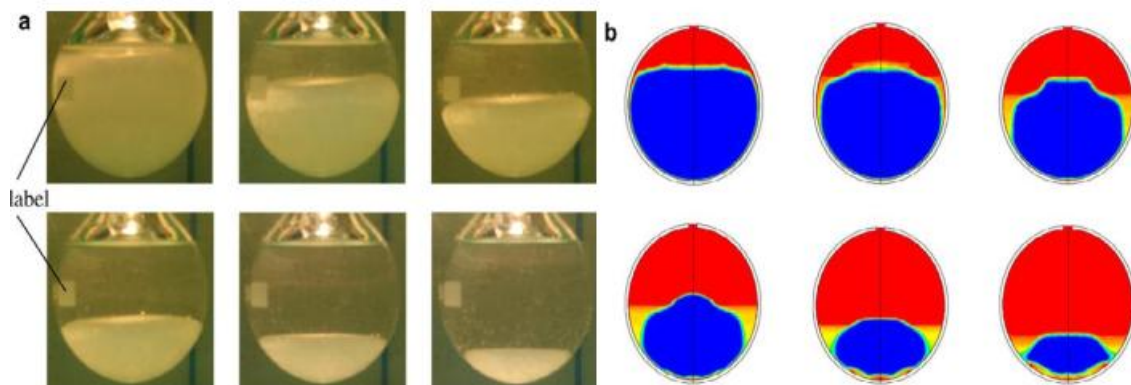
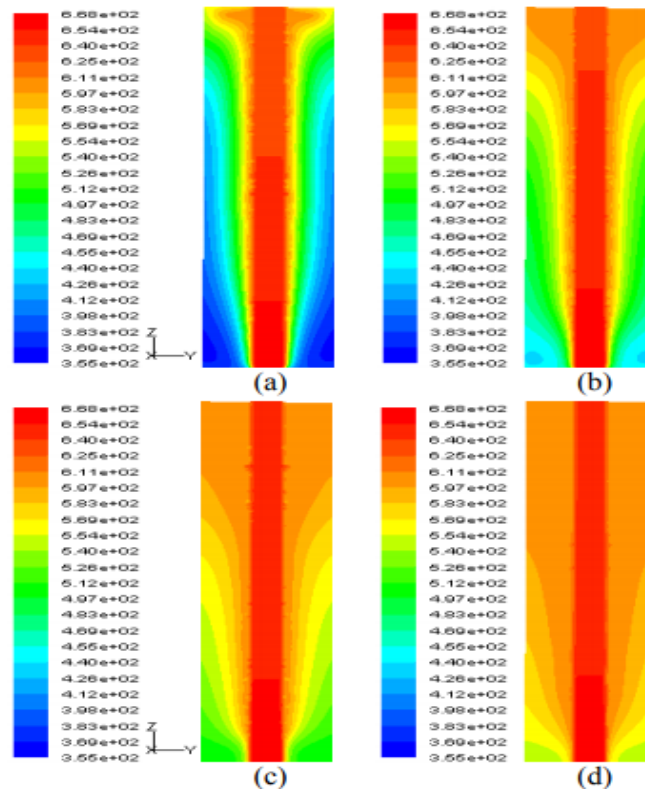


Fig. 1. 7. Comportement expérimental et numérique de la cire de paraffine

1.4 Amélioration du transfert thermique dans les MCP

Liu et al [8]. ont quant à eux synthétisé dans leur publication des travaux de recherche concernant les MCP et l'amélioration des performances pour les systèmes de stockage par chaleur latente. Une partie de la publication est consacrée à la revue bibliographique des MCP ayant une température de fusion supérieure à 300 °C. D'après leurs travaux, seuls les sels inorganiques et les métaux sont adaptés à une utilisation à ce niveau de température. Quatre corps purs et six mélanges ont une température de fusion correspondante à notre gamme de température étendue (1 corps pur et 2 mélanges pour la gamme préférentielle).

J. H. Booa et al [9], ont réalisé une analyse numérique transitoire à trois dimensions afin de prédire le transfert de chaleur caractéristiques d'un système de stockage d'énergie thermique pour la gamme de température moyenne-élevée inséré tuyaux. Dans cette étude l'unité de stockage a été remplie d'un matériau à changement de phase (MCP), le nitrate de potassium est traversé par un tube circulaire de 1m de longueur et 25,4 mm de diamètre étendu entre deux échangeurs de chaleur situées aux extrémités opposées et dans lequel circule de la vapeur chaude pendant la période de stockage de chaleur. Les températures de la vapeur au cours du stockage et de déstockage sont respectivement de 668 K et 513 K. La capacité du transfert de chaleur du tube a été représentée par une structure solide avec une très haute conductivité thermique efficace estimée par les données expérimentales dans le domaine de température moyenne-élevée. Deux cas de tubes d'échangeurs de chaleur avec et sans ailettes ont été comparés (Fig. 1.8).



**Fig. 1. 8. L'évolution de la température du MCP durant la période de stockage
Pour un tube sans ailettes. a) 1h, b) 2h, c) 3h, d) 4h**

Les applications de refroidissement de MCP dans les plafonds sont faites soit par un système passif naturel (Fig. 1.9) soit à l'aide d'un système actif par l'intermédiaire de systèmes de conditionnement d'air dynamique plus complexe à savoir les systèmes hydrauliques, les échangeurs de chaleur à micro-tubes et les canaux d'air (Fig. 1.10). Pasupathy et al. [10] ont réalisé l'étude théorique et expérimentale des performances thermiques d'un toit de bâtiment incorporé avec MCP, pour la conservation de l'énergie thermique basée sur le climat de la ville. La salle d'essai avec des panneaux MCP sur le toit a été construite et ses performances thermiques ont été mesurées. L'introduction de MCP a contribué à réduire la fluctuation de la température dans la pièce MCP et à atteindre une température constante au plafond de décembre à avril ; Néanmoins, il y a eu un effet négatif (Augmentation de la température de la toiture) pendant l'été. Une optimisation a été effectuée par la suite, en incorporant un autre panneau supplémentaire aux MCP avec une température de fusion plus élevée (6-7 °C) [11]. Selon les résultats, le MCP à double couche était utile pour maintenir une température confortable et constante tout au long de la journée et pour toutes les saisons.

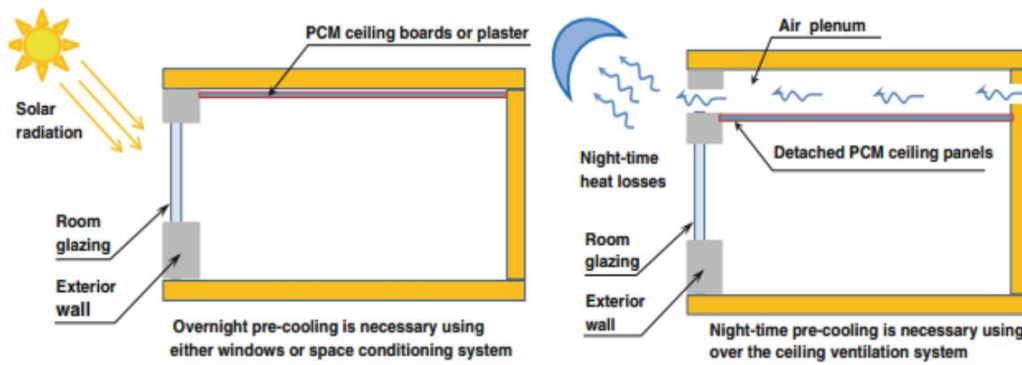


Fig. 1. 9. Applications passives de systèmes de plafond amélioré par MCP

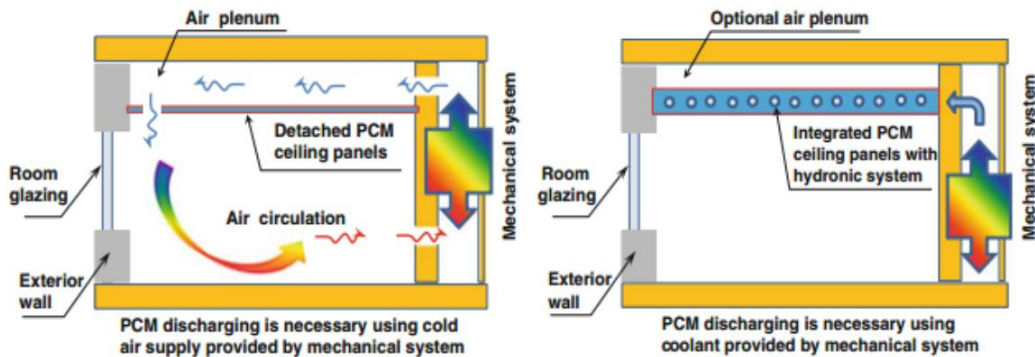


Fig. 1. 10. Applications actives de systèmes de plafond amélioré par MCP

Hawlader et al. [12] ont effectué des essais de cycles de chaleur sur la paraffine micro encapsulée et ont découvert que la capacité de stockage d'énergie et le profil géométrique restent stable même après 1000 cycles comme illustré dans la (Fig. 1.11) les effets de la géométrie des capsules sont également signalés. La géométrie est déterminée comme un paramètre significatif pour améliorer la performance thermique des MCP



Fig. 1. 11. MCP micro encapsulé

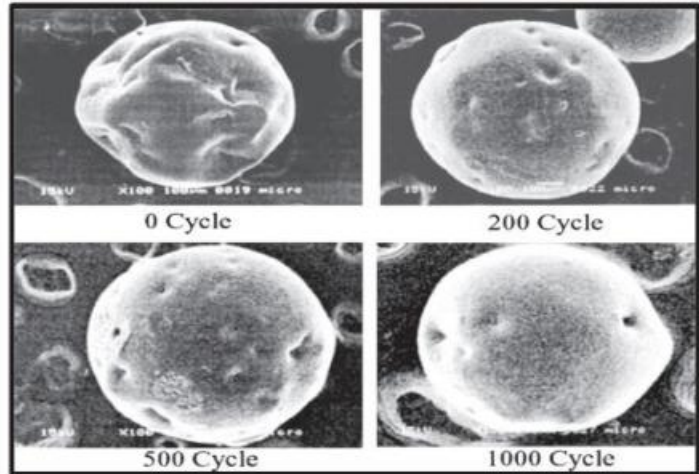


Fig. 1. 12. Images MEB de la paraffine micro encapsulée à différents cycles thermiques

La Fig. 1.13 représente l'image MEBE du composite: P/FG, elle montre que la paraffine est absorbée dans les pores et en surface des particules de farine. La structure poreuse des particules de farine assure la tenue mécanique de l'ensemble composite et empêche la fuite du MCP fondu. Les résultats MEBE révèlent que la paraffine est distribuée de façon homogène dans la structure réseau de la farine de grignon. Les résultats FT-IR montrent qu'il n'y a pas d'interaction chimique entre la paraffine et la poudre utilisée. Ces résultats combinés à ceux du MEBE confirment la bonne compatibilité entre la paraffine et la farine de grignon [13].

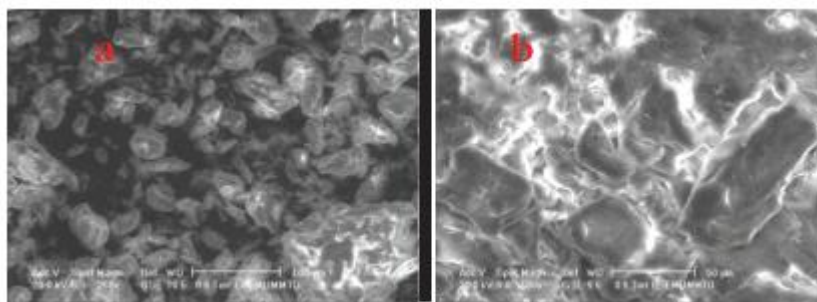


Fig. 1. 13. Images MEBE de : a) Farine de grignon ; b) Comp1 : P/FG

Kenisarin. [14] présente une revue assez exhaustive de MCP dans l'optique du stockage d'énergie thermique. Il concentre sa revue sur les matériaux inorganiques, des corps purs et des mélanges à la concentration eutectique, rassemblant des données sur la température de fusion et sur la chaleur latente de fusion, mais aussi des données partielles sur la conductivité thermique, les chaleurs spécifiques solide et liquide, la masse volumique, la variation de volume au changement de phase ainsi que quelques informations sur le prix de revient. Il est possible de dénombrer dans cette synthèse 5 corps purs et 27 mélanges eutectiques dont la température de fusion concorde avec les limites de notre gamme étendue (2 corps purs et 8 mélanges eutectiques en ne considérant que la gamme préférentielle).

Une étude plus globale sur l'intégration des MCP dans l'enveloppe est réalisée par Ahmad [15] durant ses travaux de thèse de doctorat. Des paraffines et des eutectiques sont notamment comparées de façon expérimentale, dans des cellules test de 1m^3 et numériquement à l'aide d'un modèle 3D implanté dans l'environnement Transies. L'effet du stockage par chaleur latente est mis en évidence sur des températures intérieures plus basses de près de 10 °C en été et plus hautes de plus de 5 °C en hiver. Le couplage des MCP avec les systèmes actifs (chauffage, climatisation, ventilation) a pour objectif de diminuer les besoins énergétiques des systèmes sans dégrader leur efficacité.

Chapitre 2 :
Stockage de l'énergie thermique à chaleur
latente utilisant MCP

2.1 Introduction

Le stockage d'énergie joue un rôle crucial dans la récupération de chaleur et contribue considérablement en améliorant les performances des systèmes thermiques. Les systèmes de stockage thermique peuvent stocker et libérer de la chaleur respectivement pendant la charge ou la décharge.

Le stockage basé sur la chaleur latente a une capacité thermique beaucoup plus élevée que chaleur sensible mais ce n'est pas encore largement commercialisé. Les systèmes de stockage ont le nom commun « les matériaux à changement de phase (MCP) ». Les MCP incluent les produits organiques, matériaux inorganiques et eutectiques. Les matières organiques sont, tout d'abord les composés de paraffine. Matériaux inorganiques inclus les hydrates de sel et la couverture métallique et eutectique, composés organiques-organiques, inorganiques-inorganiques et inorganiques.

Un grand nombre de MCP dans toute la gamme de température de fusion requise est disponible, connaissent de nombreux problèmes avec les produits organiques et inorganiques comme la corrosion, la ségrégation de phase ou inflammabilité mais le problème crucial, c'est leur faible température et conductivité thermique conduisant à une charge et une décharge lentes.

Ce chapitre présente une étude théorique sur le stockage d'énergie thermique à l'aide du processus de changement de phase par solidification et par fusion, en se basant majoritairement sur la propriété de stockage de chaleur par voie latente.

2.2 Définition

Le concept de stockage de chaleur est d'apporter de la flexibilité et de renforcer la fiabilité des systèmes énergétiques. Il s'agit d'équilibrer la production d'énergie à la demande. Il existe de nombreuses technologies de stockage de chaleur sous diverses formes telles que l'énergie mécanique, l'énergie électrique et l'énergie thermique. L'énergie thermique peut être stockée dans les liquides ou les solides par trois modes: latent, sensible et thermochimique [16].

Les systèmes de stockage de chaleur représenté (Fig.2 1) peuvent être classés en systèmes actifs ou passifs. Les systèmes actifs comportent des mécanismes de contrôle de la charge et de la décharge de chaleur (Fig.2 2). Les systèmes passifs fonctionnent sans composants mécaniques.

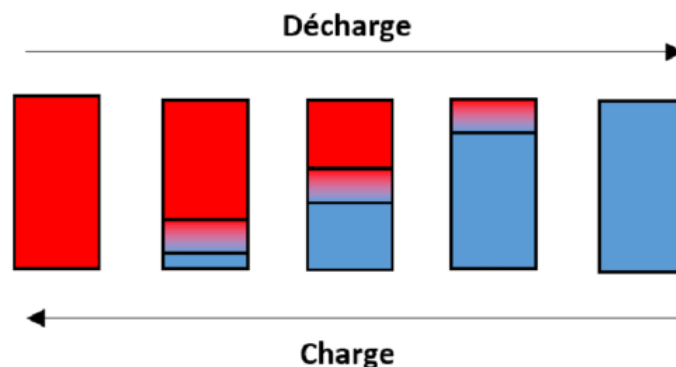


Fig.2. 1. Schéma de principe du déplacement de la zone de thermocline. Le stockage thermocline

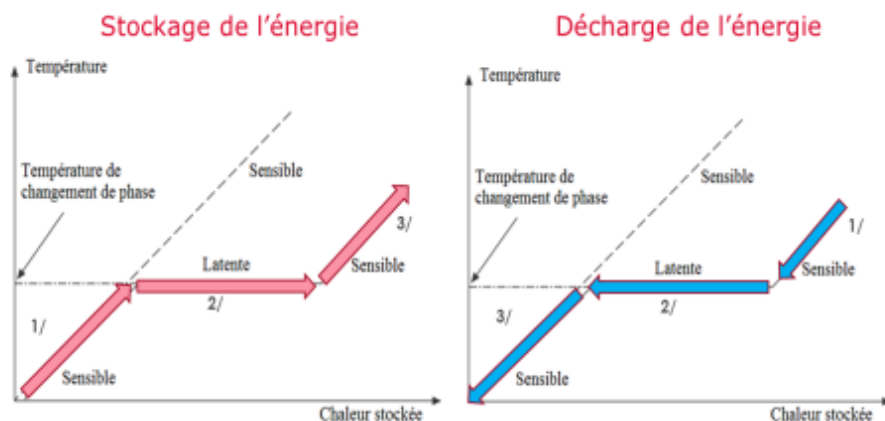


Fig.2. 2. Evolution de la température d'un corps pur avec changement d'état

Chapitre 2. Stockage de l'énergie thermique à chaleur latente utilisant MCP

Les paramètres importants d'un système de stockage [17] sont :

- la durée de stockage
- la densité énergétique (ou l'énergie spécifique)
- les caractéristiques de charge et de décharge (stockage et récupération)
- La densité énergétique conditionne la taille du système de stockage.

2.3 Stockage thermique

Le stockage de l'énergie thermique permet à la chaleur d'être utilisée en différé. La chaleur peut être stockée sous plusieurs formes:

- La chaleur sensible : stockage dans des matériaux inertes
- La chaleur latente : utilisation de matériaux à changement de phase
- La chaleur des réactions : thermochimie et absorption

2.3.1 Stockage sensible

Le stockage sensible est le moyen le plus commun de réutiliser la chaleur [18]. Dans les enceintes de stockage sensible, la température du moyen de stockage augmente avec la chaleur transférée. Ce stockage, non isotherme accumule une quantité de chaleur proportionnelle à sa masse et à sa capacité calorifique telle que présentée dans l'équation.

$$E_{\text{sensible}} = m C_p \Delta T \quad (2.1)$$

Dans ce type de stockage, le matériau de stockage se présente soit sous forme liquide, soit sous forme solide ou soit les deux. Dans les réservoirs de stockage solide, le matériau de stockage est conditionné sous forme de lit granulaire ou matriciel fixe et l'échange de chaleur est réalisé via un fluide caloporteur qui transfère sa chaleur via un échangeur de chaleur qui traverse directement le matériau de stockage poreux. Dans ce cas, le réservoir de stockage s'appelle un régénérateur [19].

Chapitre 2. Stockage de l'énergie thermique à chaleur latente utilisant MCP

Il existe par ailleurs des systèmes de stockage thermique liquide où le chaud et le froid sont stockés dans deux réservoirs différents, si bien que les volumes de stockage sont multipliés par deux. C'est le cas dans certaines centrales solaires à concentration, comme Solar Two aux Etats-Unis [21]. Dans la catégorie des liquides, on trouve les sels fondus, les huiles minérales ou synthétiques ou plus communément l'eau, utilisée notamment dans les ballons d'eau chaude qui représentent le stockage de chaleur sensible le plus répandu [20].

2.3.2 Stockage latent

Le stockage par chaleur latente consiste à chauffer un matériau jusqu'à ce qu'il change de phase, c'est-à-dire soit de la phase solide à la phase liquide, soit de la phase liquide à la phase gazeuse ou encore lors de sa transition solide-solide. Lorsque le matériau atteint sa température de changement de phase, il absorbe une quantité de chaleur pour réaliser la transformation, connue sous le nom de chaleur latente de fusion ou de vaporisation selon le cas. A l'inverse lorsque le matériau liquide ou gaz est refroidi, il retourne à la phase solide ou liquide en restituant sa chaleur latente. La quantité de chaleur stockée et restituée dépend de la masse du matériau et selon l'équation:

$$E_{\text{latent}} = m \cdot \Delta h_{\text{S-L ou L-G}} \quad (2.2)$$

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

Chapitre 2. Stockage de l'énergie thermique à chaleur latente utilisant MCP

exprimée pour le cas de la transition solide-liquide selon l'équation.

$$Q = \int_{T_{\text{initiale}}}^{T_{\text{fusion}}} m C_{P_s} dT + m \Delta H_{s,l} + \int_{T_{\text{fusion}}}^{T_{\text{finale}}} m C_{P_l} dT \quad (2.3)$$

Les matériaux utilisés pour le stockage thermique latent sont connus sous le nom de Matériaux à Changement de Phase (MCP). Les MCP peuvent être employés pour leur transition solide-solide, solide-liquide ou liquide-gaz. La transition solide-solide a été envisagée pour remplacer l'encapsulation des MCP utilisée en batch dans certains containers de stockage. Cette transition est simple à gérer dans la mesure où il n'y pas ou peu d'expansion volumique, ce qui limite les risques de fuites et de surpression. Cependant, peu de matériaux ont été identifiés, parfois car la chaleur latente de transition solide-solide est trop faible devant celle de la transition solide-liquide, ou parfois car le matériau n'est pas stable thermiquement. Les transformations liquide-gaz sont attractives car elles présentent la plus grande chaleur latente. Néanmoins, l'énorme changement de volume associé à l'évaporation du liquide rend le stockage complexe et souvent inutilisable. C'est pourquoi cette transition est écartée des systèmes de stockage latent. Bien que la chaleur latente de fusion soit plus faible que la chaleur latente d'évaporation, la transition solide-liquide est la plus prometteuse puisqu'elle permet de limiter l'expansion volumique et ainsi l'augmentation de pression due au changement de phase. Lors d'une fusion, il faut compter une augmentation volumique d'environ 10 % [18]. Si un volume d'expansion est prévu dans le container, alors le solide comme le liquide peuvent être contenus dans le système de stockage limitant ainsi la pression subie par le réservoir.

2.3.3 Stockage thermo-chimique

La troisième façon de stocker l'énergie thermique consiste en l'utilisation de l'énergie endothermique des réactions chimiques réversibles. La chaleur de réaction qui est stockée est souvent associée à la dissociation des réactifs chimiques en deux composants. Tout ou partie de cette chaleur peut être récupérée plus tard lorsque la réaction de synthèse a lieu [18].

Chapitre 2. Stockage de l'énergie thermique à chaleur latente utilisant MCP



A : Réactif solide ou liquide

ΔH_r : Chaleur de réaction en J/mol

B et C : Produits sous forme gaz, liquide ou solide

Dans ce type de stockage, les produits obtenus sont stockés pour être utilisés ultérieurement et ce système est propice au stockage inter-saisonnier.

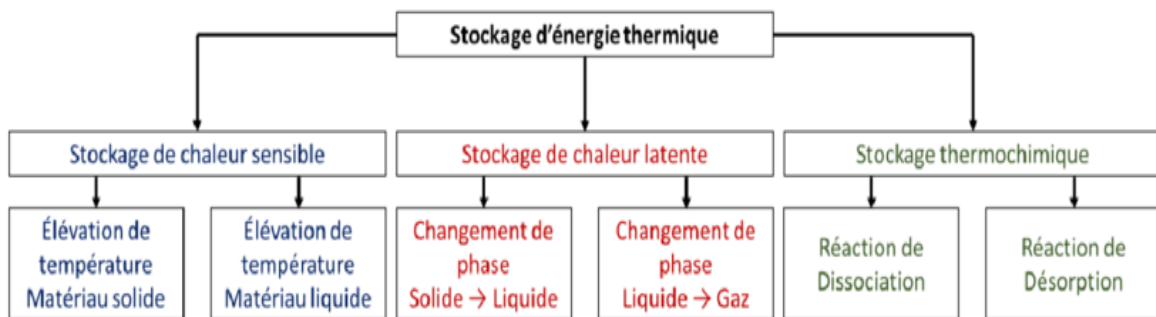


Fig.2. 3. Organigramme de stockage d'énergie thermique

2.4 Phénomène de changement de phase liquide-solide pour le stockage d'énergie thermique

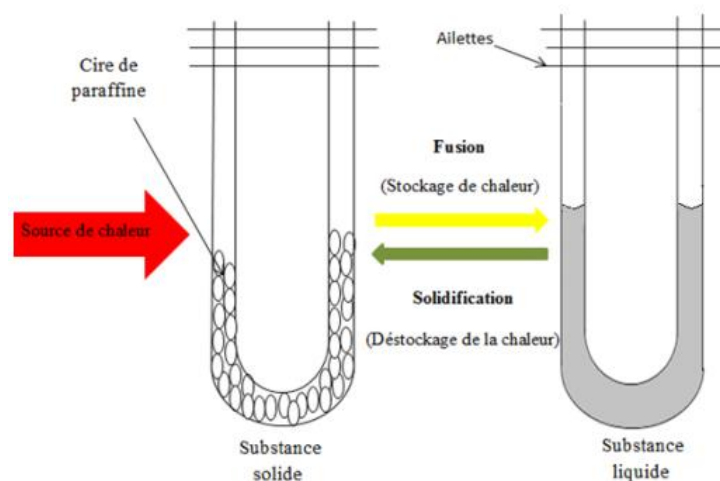


Fig.2. 4. Stockage de chaleur par changement de phase (solide –liquide) avec paraffine

Chapitre 2. Stockage de l'énergie thermique à chaleur latente utilisant MCP

Un changement de phase est tout d'abord une transition thermodynamique réversible entre deux corps (Fig.2.4). Cependant ce phénomène est reflété par une phase de passage d'un état bien défini à un autre à des intervalles de températures précis. La Fusion/solidification de la paraffine consiste à apporter (ou extraire) de l'énergie. En effet, la restitution de la chaleur est le changement de phase du liquide au solide. Le stockage de la chaleur est le changement de phase du solide au liquide [21].

2.5 Phénomènes influençant sur l'efficacité du stockage

Il existe plusieurs phénomènes qui peuvent avoir un impact important sur le processus de stockage thermique de l'énergie, dont les trois coexistant [22].

2.5.1 Surfusion

Quand on refroidit un liquide, on n'observe pas en général la solidification au moment où on atteint la température de solidification. Le matériau peut rester à l'état liquide jusqu'à plusieurs dizaines de degrés au-dessous de la température de changement d'état. Lorsque la solidification se déclenche, elle dégage de la chaleur et si la masse de liquide est assez grande et les échanges de chaleur avec l'extérieur faibles, le déclenchement de la solidification provoque une remontée de la température du matériau jusqu'à la température de changement d'état. Ce phénomène réduit l'efficacité thermique des unités de stockage par chaleur latente par rapport à ceux par chaleur sensible.

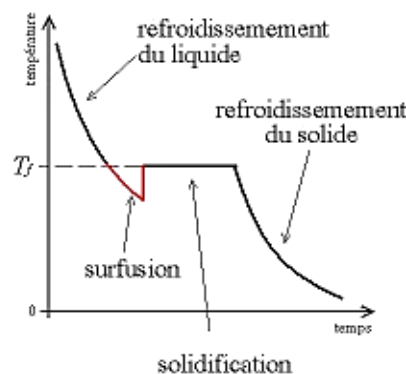


Fig.2. 5. Courbe de surfusion

Chapitre 2. Stockage de l'énergie thermique à chaleur latente utilisant MCP

2.5.2 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 s'effectue pendant une courte durée, elle n'est considérée que comme une chaleur sensible supplémentaire stockée dans le système. Si elle s'effectue pendant une longue durée, le stockage par chaleur latente perd l'essentiel de ses avantages par rapport au stockage par chaleur sensible [23].

2.5.3 Dilatation

Pendant le changement de phase de solide à liquide, le matériau change de densité et donc de volume. Ceci peut causer des problèmes dans quelques applications en particulier lorsqu'on utilise un conteneur fermé qui doit supporter l'augmentation de pression.

2.6 Généralités sur les MCP

On appelle matériau à changement de phase ou MCP, tout matériau capable de changer son état physique dans une plage de température restreinte. Cette plage est grossièrement située entre 10 et 80 °C. Dans cet intervalle de température, le changement de phase prépondérant reste la fusion/solidification. Ces températures sont accessibles naturellement et sont omniprésentes dans notre vie quotidienne (température d'ambiance d'une maison, température d'un corps humain, de l'eau chaude sanitaire...).

Les matériaux à changement de phase (MCP) ont pour particularité de pouvoir stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente. Le stockage de chaleur latent de MCP peut être réalisé par le changement solide-solide, solide-liquide, solide-gaz et de phase de liquide gaz (ne sont pas pratiques pour l'usage en tant que stockage thermique dû aux grands volumes ou pressions exigées pour stocker les matériaux dans leur phase gazeuse) [22].

Chapitre 2. Stockage de l'énergie thermique à chaleur latente utilisant MCP

Tableau 2. 1 Avantages et inconvénients des types de changement de phase.

Changement de phase	Avantage	Inconvénients
Liquide/Gaz	Grande valeur de la chaleur Latente	Grand changement de volume
Solide/Solide	Faible changement de volume. Pas de formation de fluide.	Faible valeur de la chaleur Latente.
Solide/Liquide	Faible changement de volume	Valeur moyenne de la chaleur latente.
Solide/Gaz	Grande valeur de la chaleur Latente	Grand changement de volume

2.7 Propriétés des matériaux à changement de phase

Un grand nombre de matériaux à changement de phase possède une température de fusion dans la gamme de température (0 -120°C). Cependant ils ne peuvent être utilisés comme matériaux de stockage que lorsqu'ils possèdent certaines propriétés thermodynamiques, cinétiques et chimiques qui sont définies à partir d'un certain nombre de critères [23].

2.7.1 Critères thermodynamiques

Le matériau à changement de phase doit avoir :

- Une température de fusion dans la gamme de température souhaitée ;
- Une chaleur latente par unité de masse élevée (une petite quantité du matériau doit pouvoir emmagasiner une grande quantité de chaleur)
- Une chaleur spécifique élevée de sorte que le matériau puisse disposer d'une chaleur sensible significative
- Une fusion congruent
- Une petite augmentation de volume pendant la phase de transition.

2.7.2 Critères cinétiques

Le matériau à changement de phase ne doit montrer ou presque pas de phénomène de surfusion. Le matériau fondu doit se cristalliser à la température de solidification indiquée par les tables thermodynamiques [23].

2.7.3 Critères chimiques

Le matériau à changement de phase doit montrer :

- Une stabilité chimique
- Aucune décomposition chimique de sorte qu'un système de stockage par chaleur latente soit viable
- Aussi le matériau ne doit pas être nocif, il doit être non inflammable et non explosif

2.7.4 Critères économiques

Le matériau à changement de phase doit être :

- Disponible en grande quantité
- A bon marché

A priori aucun matériau à changement de phase ne peut satisfaire tous ces critères. Beaucoup des matériaux ont été étudiés comme de potentiels matériaux à changement de phase, mais peu d'entre eux sont commercialisés. Les matériaux à changement de phase se classent en trois grandes familles : les composés inorganiques et organique et les mélange de ces composés (Eutectique).

2.8 Différentes types des MCP

2.8.1 MCP inorganiques

Les matériaux où les substances inorganiques ont une température ou une plage de températures de fusion comprise entre -100 °C et $+1000\text{ °C}$. Les plus utilisés sont : l'eau (température de fusion 0 °C à la pression atmosphérique), les solutions aqueuses de sel (température de fusion inférieure à 0 °C), des sels hydratés (température de fusion comprise entre 5 °C et 130 °C), des mélanges de sels, des mélanges de métaux (température de fusion supérieur à 150 °C) [24].

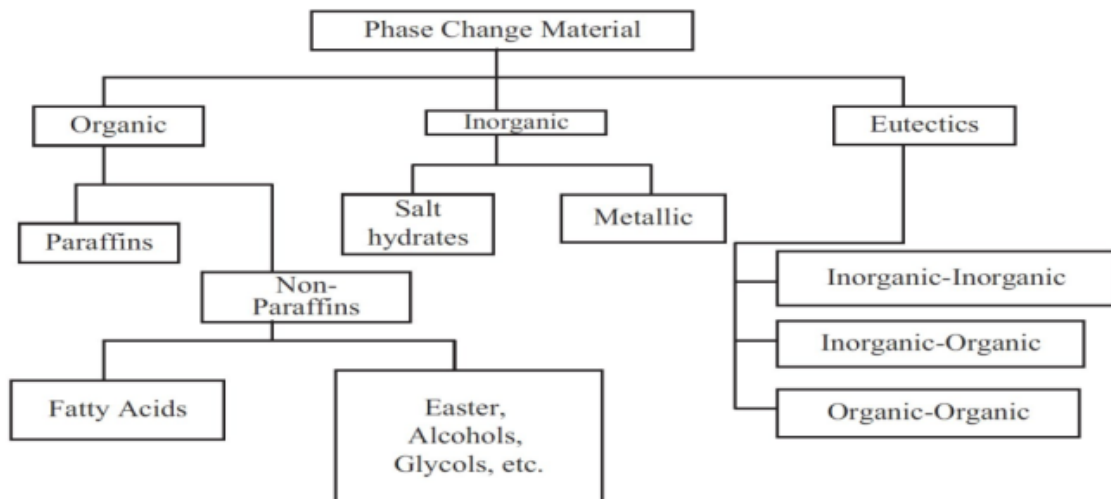
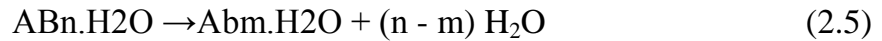


Fig.2. 6. Famille de matériaux des MCP

a) Hydrates de sels

Les hydrates de sel sont des sels inorganiques qui contiennent de l'eau et dont la formule générale est AB_nH_2O . Pendant la charge, la déshydratation du sel aura lieu. Le produit de cette déshydratation peut être un hydrate de sel avec moins molécules d'eau selon la formule :

Chapitre 2. Stockage de l'énergie thermique à chaleur latente utilisant MCP



Le sel hydraté le plus utilisé par son faible coût est le $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ($T_{\text{fusion}} = 28\text{-}30\text{ }^\circ\text{C}$). On peut citer aussi le $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ pour les applications de climatisation, et un nouveau matériau obtenu à partir d' $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ utilisé avec des additifs pour des applications industrielles autour de $100\text{ }^\circ\text{C}$ [25].



Fig.2. 7. Hydrates salins

Avantages

Les hydrates de sel sont appropriés pour leur utilisation dans le stockage thermique parce qu'ils présentent une grande chaleur latente ($\approx 100 - 300\text{ kJ/kg}$), une température de fusion adaptée aux applications à basse température ($\approx 8 - 100\text{ }^\circ\text{C}$) et sont largement compétitifs en termes de coût et de rentabilité [26].

Inconvénients

Le principal problème qui se pose lors de l'utilisation des hydrates de sels est leur fusion non congruente, ce qui veut dire que le sel n'est pas totalement soluble dans l'eau d'hydratation au niveau du point de fusion.

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

2.8.2 MCP organiques

Les matériaux ou les substances organiques ont une température ou une plage de température comprise entre $0\text{ }^\circ\text{C}$ et $150\text{ }^\circ\text{C}$. Les plus utilisés sont essentiellement à base de paraffine, des acides gras et des alcools de sucre. Ils comportent certains

Chapitre 2. Stockage de l'énergie thermique à chaleur latente utilisant MCP

inconvenients, comparés aux avantages des MCP inorganiques : ils ont une plus faible conductivité à l'état solide et à l'état liquide, ils ont une chaleur latente de fusion plus faible, ils sont inflammables. Par contre, ils ont des avantages majeurs ; ils sont disponibles dans une large gamme de températures et sont compatibles avec les matériaux conventionnels de construction, ils sont chimiquement stables et ne nécessitent pas l'utilisation d'agents de nucléation. Ils sont non réactifs la plupart du temps et ils sont recyclables [25].

b) Paraffine

Les paraffines sont des matériaux organiques, constitués par des mélange d'hydrocarbures saturés qui eux-mêmes sont alcanes de formule générale C_nH_{2n+2} [25].



Fig.2. 8. Paraffines solide et en poudre

Avantages

Parmi les avantages des paraffines, on distingue :

- La masse volumique de la phase liquide des paraffines varie de 750 à 850 kg/m^3 , et celle de la phase solide est de 800 à 900 kg/m^3 . La dilatation volumique est donc environ de 15 % pendant le processus de changement de phase.
- L'enthalpie de fusion varie entre 180 et 230 kJ/kg . Cette valeur est grande par rapport à celle des autres matériaux organiques dont la capacité thermique massique est de 2,1 $kJ/(kg.K)$. En tenant compte des deux valeurs (chaleur sensible et chaleur latente), on obtient une densité importante d'énergie de stockage.

Chapitre 2. Stockage de l'énergie thermique à chaleur latente utilisant MCP

- Les cires paraffinées ne présentent aucun danger écologique. Elles n'ont pas d'effets négatifs sur les plantes, les animaux, l'eau ou les micro-organismes. Elles sont non-toxiques et 100 % recyclables.
- Les paraffines ordinaires sont souvent des mélanges d'hydrocarbures et ont un prix raisonnable. En fonction de leur composition, elles présentent des points de fusion variés. Par contre les cires paraffinées pures sont très coûteuses.

Inconvénients

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

c) Acides gras

Les acides gras sont des matériaux ayant pour origine les huiles végétales ou animales. Ils ont la formule chimique générale suivante : $\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_n \text{COOH}$.



Fig.2. 9. Acides gras

Avantages

Les acides gras présentent une chaleur latente de fusion du même ordre que celle des paraffines. Par ailleurs, plus le nombre de carbones dans leur chaîne carbonée est élevé, plus la température de fusion, la chaleur latente ainsi que le degré de cristallisation sont grands [27]. La possibilité d'obtenir des mélanges eutectiques d'acides gras a permis d'élargir la plage de température des matériaux et ainsi la plage des applications [28]. Les acides gras sont facilement produits à partir d'huiles végétales et animales. Ainsi, ils donnent l'assurance d'un approvisionnement bio-sourcé.

Inconvénients

Quelques auteurs constatent un problème de stabilité des acides gras au-dessus du point de fusion [29]. Cette dégradation peut être cependant due à la vaporisation du produit lorsqu'il est sous forme liquide et non à une réelle dégradation du produit.

d) Alcools de sucre

Les alcools de sucre sont des composés organiques appartenant à la famille des polyols. Les plus connus sont le sorbitol, le mannitol, le xylitol, le lactitol, le malititol et l'érythritol [30]. Ces produits sont extraits des plantes et peuvent être qualifiés de bio-sourcés. Par exemple, le mannitol provient des algues alors que le sorbitol est extrait du sirop de maïs.

Avantages

Akihide et al [31]. Les alcools de sucre possèdent des valeurs d'enthalpie de phase élevées. Ils présentent aussi une grande masse volumique de l'ordre de 1500 kg/m³, ce qui conduit à une densité énergétique très élevée. Ce sont par ailleurs des produits peu coûteux et non toxiques.

Inconvénients

Un des inconvénients les plus connus des alcools de sucre est leur tendance à la surfusion, qui peut d'ailleurs être utilisée pour faire du stockage inter-saisonnier [29] car elle permet de maintenir le MCP liquide sous le point de solidification sans qu'il libère ainsi sa chaleur. Seulement, cet état métastable empêche la restitution de la chaleur à la température de changement d'état souhaitée. Plusieurs techniques ont été développées pour pallier ce problème de surfusion. Les ultrasons, la micro-encapsulation, le bullage, l'ensemencement ou encore l'agitation sont proposés comme techniques pour maîtriser l'apparition des premiers cristaux [32].

2.7.3. Les MCP Eutectique

Les MCP eutectiques (Fig. 2.10) 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. Quelques-uns des eutectiques envisagés sont répertoriés dans A. Sharma *et al.* [33] ou encore F. Roget *et al.* [34]. Sari *et al.* [35] ont déterminé les propriétés thermiques des différents eutectiques d'acides gras par DSC. Les résultats montrent que les eutectiques d'acide laurique – acide stéarique, acide myristique-acide palmitique et acide palmitique-acide stéarique sont très attractifs pour le stockage de la chaleur dans les systèmes de chauffage solaire passif.



Fig.2. 10. MCP Eutectique.

Chapitre 2. Stockage de l'énergie thermique à chaleur latente utilisant MCP

Avantages

- Leur changement de phase se fait sur une plage de température restreinte comparable à celle des corps purs.
- Leur chaleur latente est supérieure à celle des composés purs.
- Ils ne présentent pas de ségrégation de phase contrairement aux hydrates de sels.

Inconvénients

L'inconvénient majeur de ce type de mélange est de réussir à déterminer le point eutectique exact afin d'avoir une température de fusion unique, comme pour un corps pur.

Les caractéristiques de quelques MCP inorganiques et organique sont rassemblées dans le Tableau (2.2) [36].

Tableau 2. 2 Caractéristiques de quelques MCP organiques [36]

Type substance	Composé	Température de fusion (°C)	ΔH_{fusion} (kJ/kg)	Conductivité thermique ($w.m^{-1}.k^{-1}$)	Densité (kg,m^{-3})
Substances organiques	Paraffine C ₂₁ -C ₅₀	66-68	189	0.21 sol	0.830 liq. 70°C 0.930 sol. 20°C
	Naphtalène	80	147.7	0.132 liq. 83.8°C 0.341 sol. 49.9°C	976 liq. 84°C 1145 sol. 20°C
Eutectique organique	67.1% Naphtalène +32.9% Acide benzoïque	67	123.4	0.130 liq. 100°C 0.282sol. 38°C	N.D.
Acides gras	Acide caprique	32	152.7	0.153liq. 38.5°C	878 liq. 45°C 1004 sol. 24°C
	Acide stéarique	69	202.5	0.172 sol. 70°C	848 liq. 100°C 965 sol. 24°C

2.8.3 Comparaison entre les MCP organiques et inorganiques

Une comparaison entre les MCP organiques et inorganiques est résumée dans le tableau 2.3. Chaque type a ses avantages qui représentent une solution efficace et ses inconvénients qui limitent ses performances [35].

Chapitre 2. Stockage de l'énergie thermique à chaleur latente utilisant MCP

Tableau 2. 3 Résumé de la comparaison entre les MCP organiques et inorganiques.

Inorganique	Organique
<ul style="list-style-type: none">- Cout modère.- Capacité de stockage de chaleur supérieure par unité de volume.- Tendance à la surfusion et à la fusion non.- Congruente, pouvant conduire à la ségrégation.- Haute densité de stockage volumétrique.- Conductivité thermique relativement élevée.	<ul style="list-style-type: none">- Cout élève.- Capacité de stockage de chaleur inférieure par unité de volume.- Bonne stabilité physique .- Bon comportement.- zone de transition réglable

2.9 Phénomènes physiques lors du changement de phase

Selon Regin [37], l'analyse du transfert de chaleur du problème de changement de phase est beaucoup plus compliquée que les problèmes monophasés en raison de:

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

2.9.1 Interface mobile solide-liquide

Elle reflète sur la quantité de MCP qui est déjà fondue ou s'est solidifiée à un moment donné. Cette mesure est d'une grande importance car elle peut révéler la quantité de chaleur stockée ou évacuée du MCP [38].

2.9.2 Changement de densité lors du changement de phase

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

- En raison du changement de température dans une phase, car la densité dépend de la température.
- En raison de la différence de densité entre le solide et le liquide à la température de fusion. Lors de la fusion, le MCP occupe plus de volume, ce qui augmente la pression sur le récipient, tandis que pour la solidification, lorsque le retrait se produit, le MCP occupe moins de volume, sous-pressurant le récipient [37].

2.9.3 Effet de flottabilité dans la région de fusion

La différence de température non seulement entraîne une modification de la densité du MCP, mais elle induit également des écoulements dans le MCP liquide en raison de la présence de la gravité [38].

2.9.4 Changement de phase sur une large plage de température

Les substances pures offrent une température de changement de phase nette et bien définie. Néanmoins, il existe des MCP commerciaux présentant des plages de température attractives. Dans les deux cas, ce paramètre doit être pris en compte lors de la conception et de la modélisation des systèmes MCP.

2.10 Stockage d'énergie par chaleur latente dans les MCP

Le principe de fonctionnement des systèmes de chaleur latente (LHS) repose sur l'absorption où la libération de la chaleur latente pendant la transformation de phase du solide au liquide ou vice versa. Sur la base du processus de transformation de phase, la capacité de stockage par chaleur latente est obtenue grâce à une transformation en phase solide-solide, solide-liquide, gaz-solide et liquide-gaz [39-40]. Lors de la fusion, pendant que la chaleur est transférée au matériau de stockage, le matériau garde sa

Chapitre 2. Stockage de l'énergie thermique à chaleur latente utilisant MCP

température constante à la température de fusion, également appelée température de changement de phase. Si la fusion est terminée, un autre transfert de chaleur entraîne de nouveau un stockage de chaleur sensible. La chaleur fournie lors de la fusion est donc appelée chaleur latente.

$$\Delta Q = m \times \Delta h \quad (2.6)$$

Les champs d'application potentiels du MCP peuvent être trouvés directement à partir de la différence fondamentale entre le stockage de chaleur sensible et latente.

2.10.1 Stockage de chaleur à une température constante

Le MCP peut être utilisé pour stabiliser la température dans une application comme par exemple, l'utilisation de la glace pour garder les boissons et les aliments froids où dans la stabilisation de la température intérieure dans un bâtiment [39].

2.10.2 Stockage de chaleur à une plage de température

D'un autre point de vue, la fig. 2.12 illustre le stockage d'une grande quantité de chaleur ou de froid par le MCP avec des variations de température relativement faibles [40].

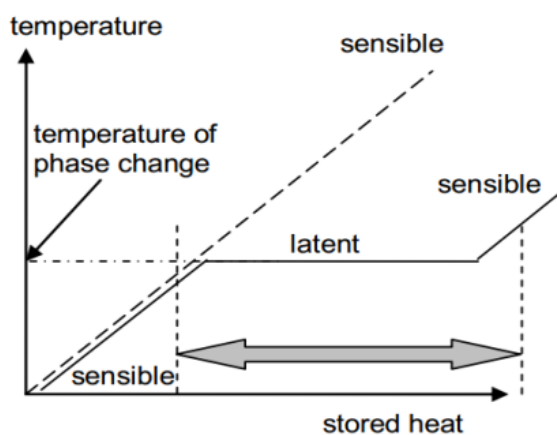


Fig.2. 11. Stockage de la chaleur comme chaleur latente

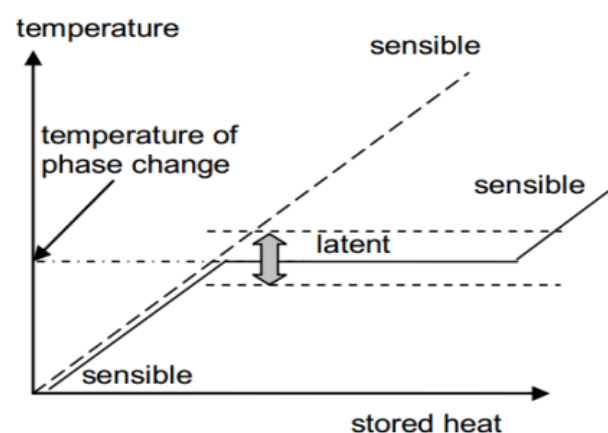


Fig.2. 12. Stockage dans une plage de température

Chapitre 2. Stockage de l'énergie thermique à chaleur latente utilisant MCP

2.10.3 Applications des MCP

Le stockage thermique par les MCP peut être utilisé dans diverses applications et industries:

- Stockage de chaleur issue de la récupération de chaleur fatale
- Le stockage de l'énergie thermique : Les MCP stockent l'énergie en changeant de phase solide-liquide (fusion) puis ils restituent la chaleur par le changement de phase liquide-solide (solidification)
- Stockage de chaleur produite par du solaire thermique

2.11 Généralités sur les échangeurs

Un système est dit totalement chargé ou déchargé si le MCP est entièrement fondu ou solidifié, respectivement.

[41]. Une grandeur définie comme étant le rapport du volume de MCP sur le volume total, interne du système. Il s'agit uniquement du volume de MCP, du fluide caloporteur et de l'échangeur s'il y en a un. Il n'est pas tenu compte de l'épaisseur des parois externes, de l'isolant, des distributeurs. Cette variable a pour objectif de rendre possible une comparaison des technologies d'échangeur en terme de densité énergétique. A volume équivalent, elle permet de définir quel échangeur contient le plus de MCP. Mathématiquement, cette variable est définie telle que :

$$CF = \frac{VMCP}{VMCP+V_{\text{échangeur}}+VFC} \quad (2.7)$$

- La densité de puissance d'une installation correspond à la puissance moyenne du système divisée par le volume interne total de celui-ci (volumes du MCP, de l'échangeur et du fluide caloporteur).
- La zone pâteuse est la zone du matériau qui est en train de fondre/se solidifier.
- Parfois, le changement d'état s'accompagne d'une modification optique (Fig.2.13). La zone pâteuse est la zone intermédiaire (Fig. 2.14).

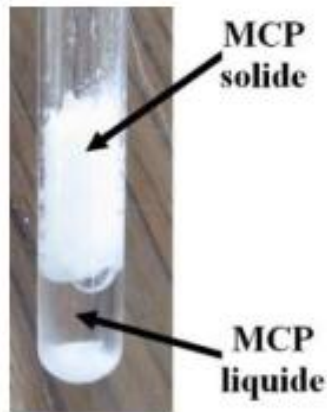


Fig.2. 13. Paraffine

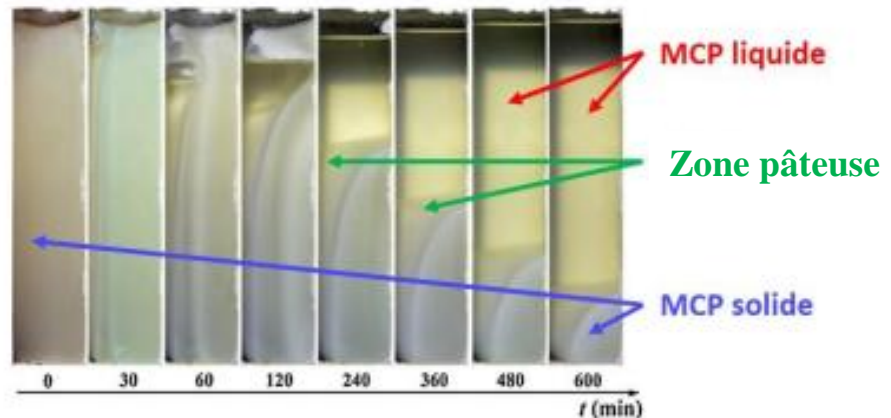


Fig.2. 14. Visualisation de la fusion d'une paraffine. La zone pâteuse entre le solide et le liquide est nettement visible [41]

2.11.1 Principe de fonctionnement

Un échangeur de chaleur est un système qui permet d'échanger la chaleur entre deux fluides ou plus. Dans un échangeur la chaleur est transmise d'un fluide à un autre. Le même fluide peut être conservé son état physique ou se présenter successivement sous les deux phases.

2.12 Ailettes

Une ailette est un dispositif thermique visant à augmenter la surface de contact avec un fluide extérieur pour augmenter les échanges convectifs (transfert de chaleur).

2.12.1 Echangeurs à ailettes

L'amélioration des transferts thermiques par l'ajout d'ailettes se décompose en deux facteurs. Le premier est l'augmentation de la surface d'échange et le second est la diminution de la distance caractéristique de solidification.

2.12.2 Différents types d'ailettes

Fig. 2.15 représente les différents types d'ailettes. Les ailettes axiales qui sont disposées le long des tubes (Fig. a) sont distinguées des ailettes radiales (Fig. b, Fig.j) Il existe aussi des tubes à ailettes ponctuelles : les tubes cloutés (Fig. l) ou bien les tubes hérissés (Fig. k). Il existe également des ailettes continues (Fig. i), pour les

Chapitre 2. Stockage de l'énergie thermique à chaleur latente utilisant MCP

quelles le moyen de fabrication est bien distinct. Les ailettes sont usuellement comparées en termes de surface d'échange spécifique. Les ailettes cloutées ont la plus mauvaise surface spécifique tandis que les tubes à ailettes radiales offrent souvent les meilleurs rapports surface-sur-volume. Les ailettes axiales permettent une augmentation de la surface d'échange qui est limitée par le nombre d'ailettes qu'il est possible de placer sur le périmètre du tube. Les ailettes sont soit rapportées, soit extrudées (Fig. g). Dans le premier cas, elles sont conçues dans un matériau généralement différent de celui du tube, dans le second cas elles sont nécessairement dans le même matériau que le tube duquel elles sont issues. Le cas du tube à ailettes extrudées bimétalliques (Fig. h) est particulier [42].

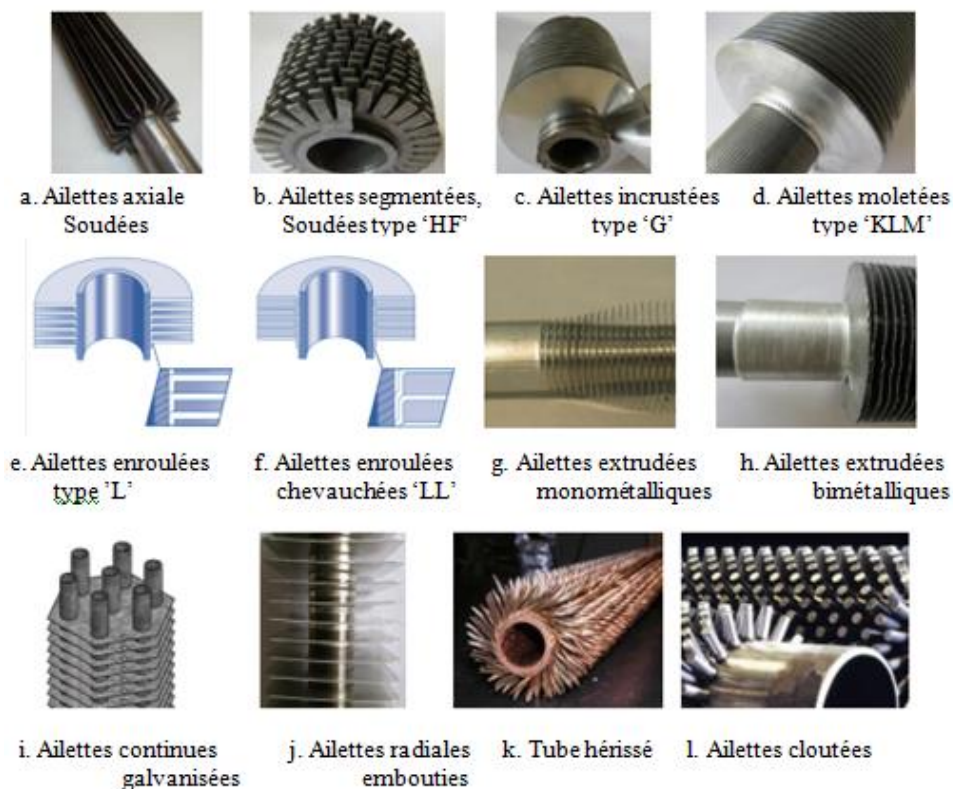


Fig.2. 15. Récapitulatif des différents types d'ailettes

Chapitre 3 :

Procédure expérimentale

3.1 Introduction

Le stockage de l'énergie permet d'assurer l'équilibre entre la production et la consommation de l'énergie. L'utilisation des MCP dans le stockage thermique a suscité un grand intérêt de telle façon qu'une vaste littérature sur les problèmes de changement de phase s'est développée. Le stockeur de chaleur est un appareil thermique de grand importance dans les diverses installations thermique et énergétique de l'industrie. Il est nécessaire d'analyser les paramètres qui permettent d'améliorer les performances d'un stockeur thermique et de bénéficier d'avantage de son installation.

L'objectif de ce chapitre est d'exploiter expérimentalement et analyser les performances thermiques du stockeur à chaleur latente et comprendre le comportement de la paraffine (MCP) lors du changement de phase (stockage et déstockage latent).

3.2 Présentation du dispositif expérimental

L'installation expérimentale (Fig. 3.2) est destinée à étudier les échangeurs de chaleur dont les tubes en forme U sont remplis de MCP (paraffine liquide). Ils permettent de réaliser les cycles de stockage et déstockage de la chaleur latente et sensible [6]. Elle est constituée de :



Fig.3 1. Canal d'air avant l'isolation

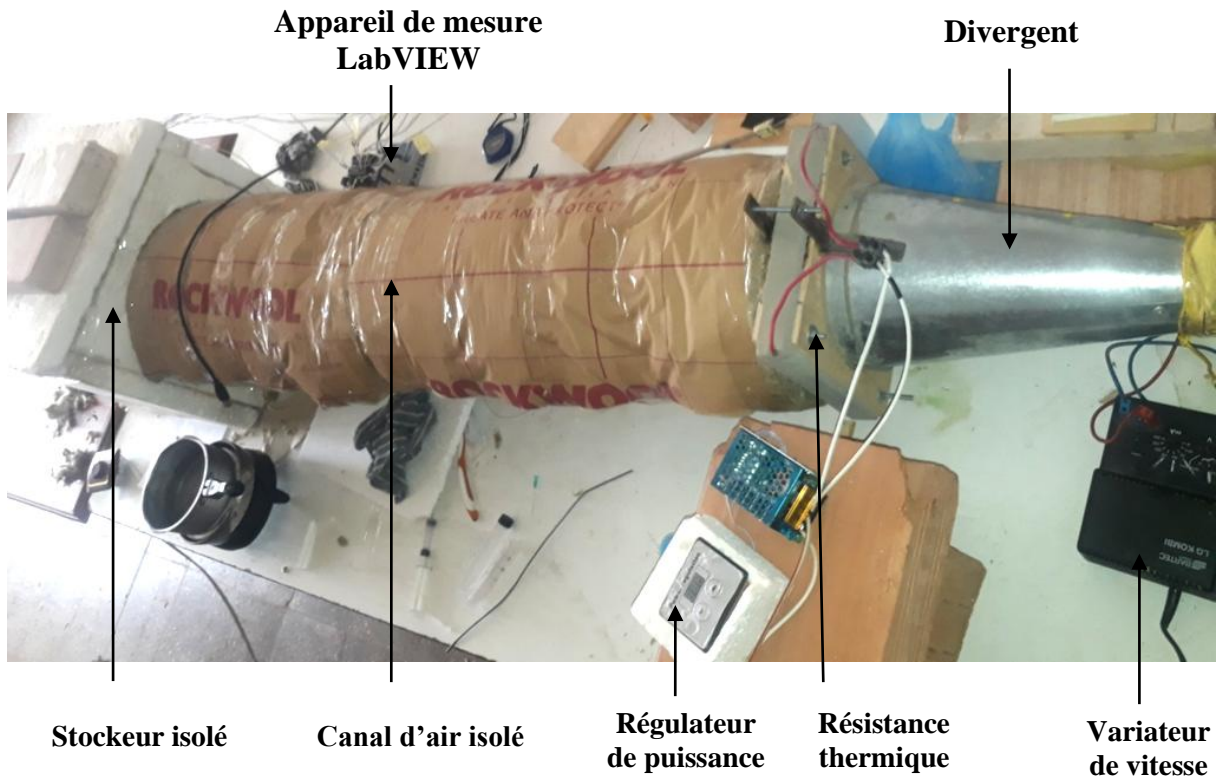


Fig.3 2. Banc expérimental d'un stockeur thermique à MCP

3.2.1 Résistance thermique

La résistance thermique variable fonctionnant à courant alternatif, permet de chauffer l'air (fluide caloporteur) à l'entrée du canal (Fig. 3.3).

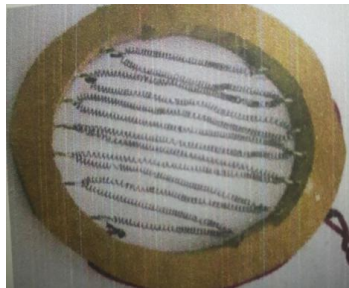


Fig.3 3. Résistances de chauffage d'air

3.2.2 Ventilateur

Le ventilateur à vitesse variable fonctionnant à courant continu assure la circulation de différents débits d'air dans le canal par le biais d'un potentiomètre (Fig. 3.4).



Fig.3 4. Ventilateur à vitesse variable

3.2.3 Débitmètre à fil chaud

Le débitmètre à fil chaud (Fig. 3.5) est utilisé pour contrôler le débit d'air circulant dans le canal.



Fig.3 5. Débitmètre d'air à fil chaud placé directement à l'intérieur du canal

3.2.4 Stockeur thermique

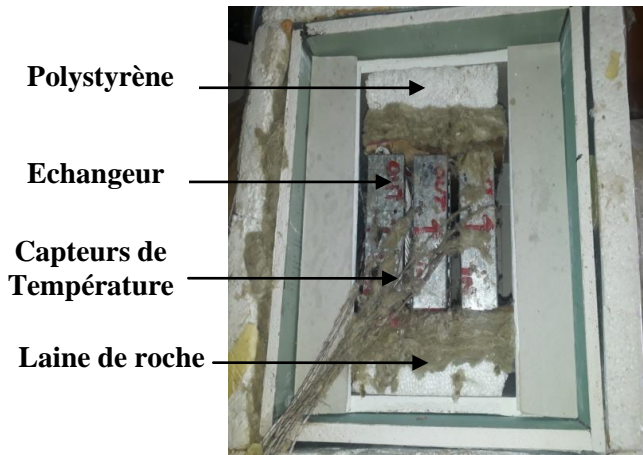


Fig.3 6. Stockeur thermique équipé de 3 échangeurs



Fig.3 7. Échangeur isolé dans le stockeur



Fig.3 8. Isolation du stockeur thermique

Le stockeur thermique réalisé est sous forme d'enceinte rectangulaire (Fig. 3.6), peut abriter plusieurs échangeurs de chaleur identiques. L'enceinte est sous forme d'un caisson de dimensions 43 x 38 x 36 cm, isolée du bas par le bois et sur les côtés par le polystyrène et de laine de roche.

3.2.5 MCP cire de la paraffine

Le MCP utilisé est une cire de paraffine de formule chimique C_nH_{2n+2} . La cire de paraffine est utilisée comme MCP en raison de son faible coût, sa densité de stockage à haute énergie, sa disponibilité à grande échelle ainsi que sa température de fusion convenable dans les applications à moyenne températures (jusqu'à 80°C) avec peu de maintenance et n'ayant besoin d'aucun apport d'énergie préalable.

Tableau 3. 1. Propriétés thermo-physique de la paraffine

Propriétés	ρ_s à 25°C (kg/l)	ρ_l à 80°C (kg/l)	λ (W/m.K)	Cp (kJ/kg.K)	Température de fusion
Nanocosane $C_{29}H_{60}$	0,86	0,80	0,2	2	$60 \div 64^\circ\text{C}$

Tableau 3. 2. Propriétés thermo-physique de l'air

Propriétés	ρ (kg/m ³)	λ (W/m.K)	Cp (kJ/kg.K)	μ (Pa.s)
Air	1,293	0,0234	1004	$1,60 \cdot 10^{-5}$

3.2.6 Echangeurs de chaleur

Les échangeurs thermiques utilisés sont de type tubulaire. Chaque échangeur est constitué de 7 tubes en forme U (Fig. 3.7) rempli de paraffine est muni de 360 ailettes rectangulaires minces. Les tubes sont remplis de 0.6 litre de paraffine qui joue le rôle du MCP

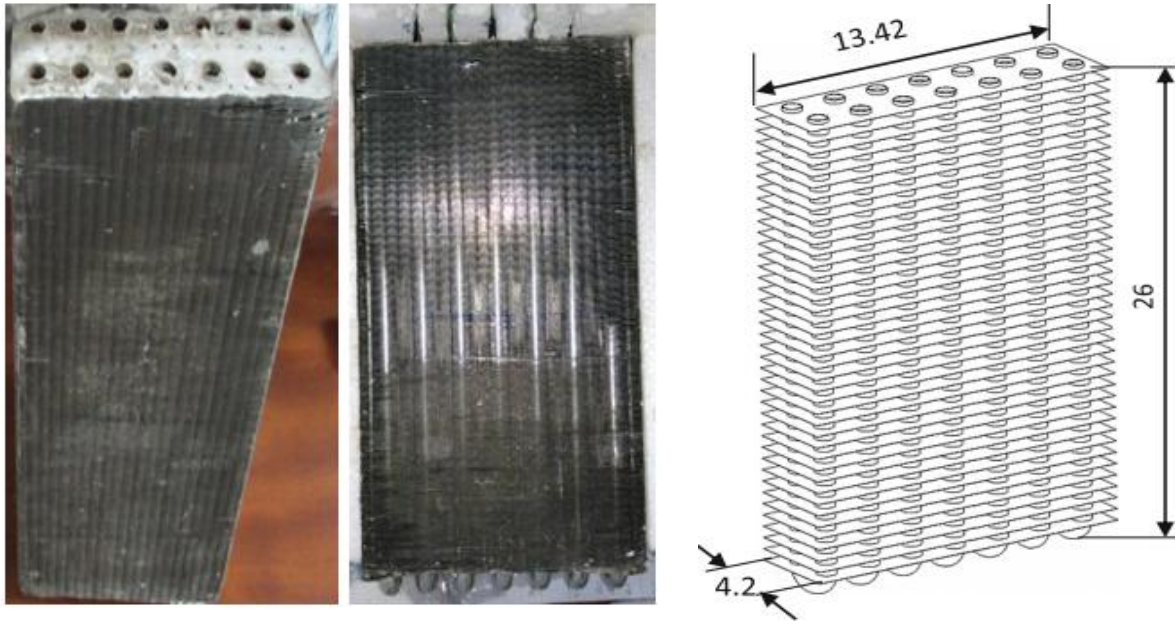


Fig.3 9. Echangeur à ailettes

3.3 Remplissage des tubes par la paraffine

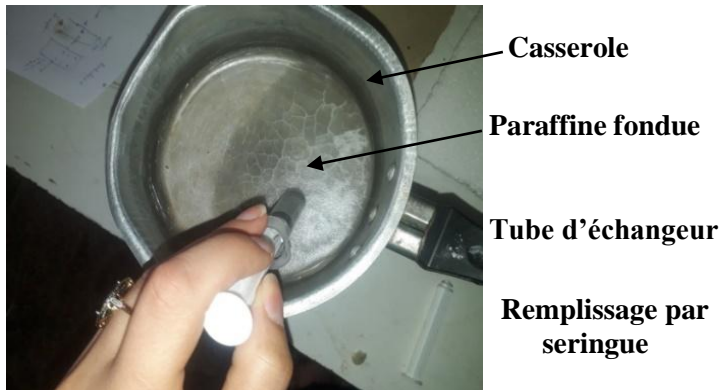


Fig.3 10. Fusion de la paraffine



Fig.3 11. Remplissage des tubes de l'échangeur par la paraffine

La paraffine est d'abord fondue à petite quantité dans une casserole sur une résistance de 42 W (Fig. 3.8.a), pour garder les tubes des échangeurs chauds et pour éviter toute solidification de la paraffine durant le remplissage, on laisse passer de l'air chaud à travers les échangeurs les tubes qui seront remplis par la paraffine à quantité égale (tout en utilisant une seringue graduée) sur un seul côté afin d'éviter les poches d'air et le débordement de la matière durant de la fusion (Fig. 3.8.b). Cette opération est vérifiée durant chaque deux ou trois expérience, afin de garantir une masse de MCP constante.

3.4 Mesure des températures

Les capteurs de température utilisés sur les trois (3) échangeurs de chaleur dans les différentes expériences sont de types K. Ils sont bon marché (disponible et moins cher) et permettent la mesure dans une grande gamme de température. Leur principal défaut est leur précision qui varie de $0.1 \div 0.2$ °C. Un thermocouple est placé entre chaque échangeur pour mesurer la température de l'air à l'entrée et à la sortie de chaque échangeur et celle du stockeur. Deux (02) autres thermocouples sont immergés dans la paraffine à l'intérieur des tubes (Fig. 3.9) selon les profondeurs 12 et 24 cm en amont et en aval des tubes de chaque échangeur.

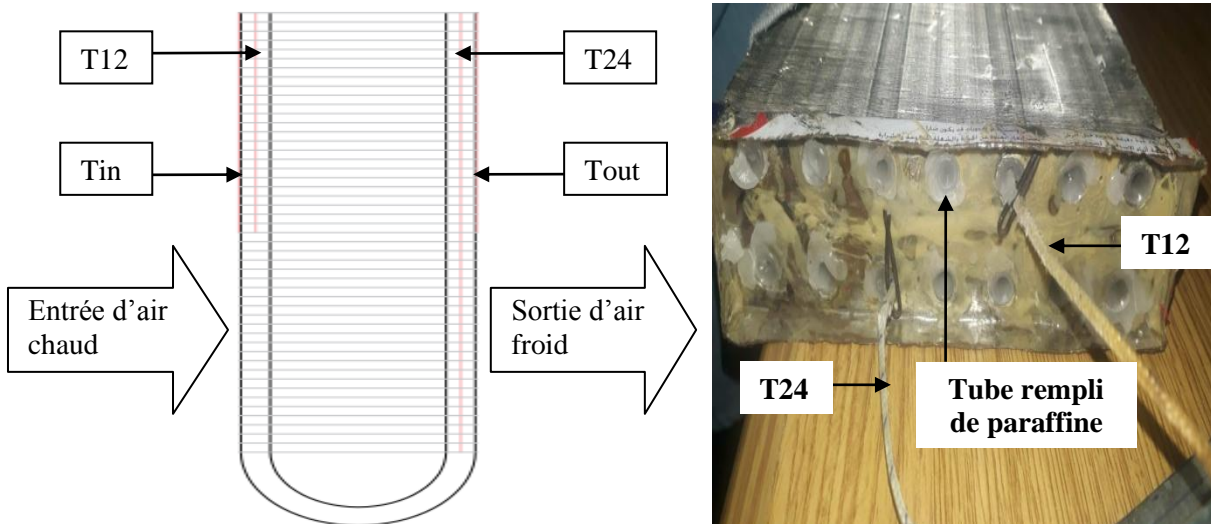


Fig.3 12. Positon des thermocouples à l'intérieur des tubes en U

3.5 Chaine d'acquisition

Pour mesurer la température de l'air à l'entrée et à la sortie des échangeurs, les 10 différents capteurs de température sont reliés aux modules de l'interface de mesure (LabView) (Fig. 3.10) pour enregistrer les valeurs des températures et voir directement l'évolution des graphes durant toute l'expérience.

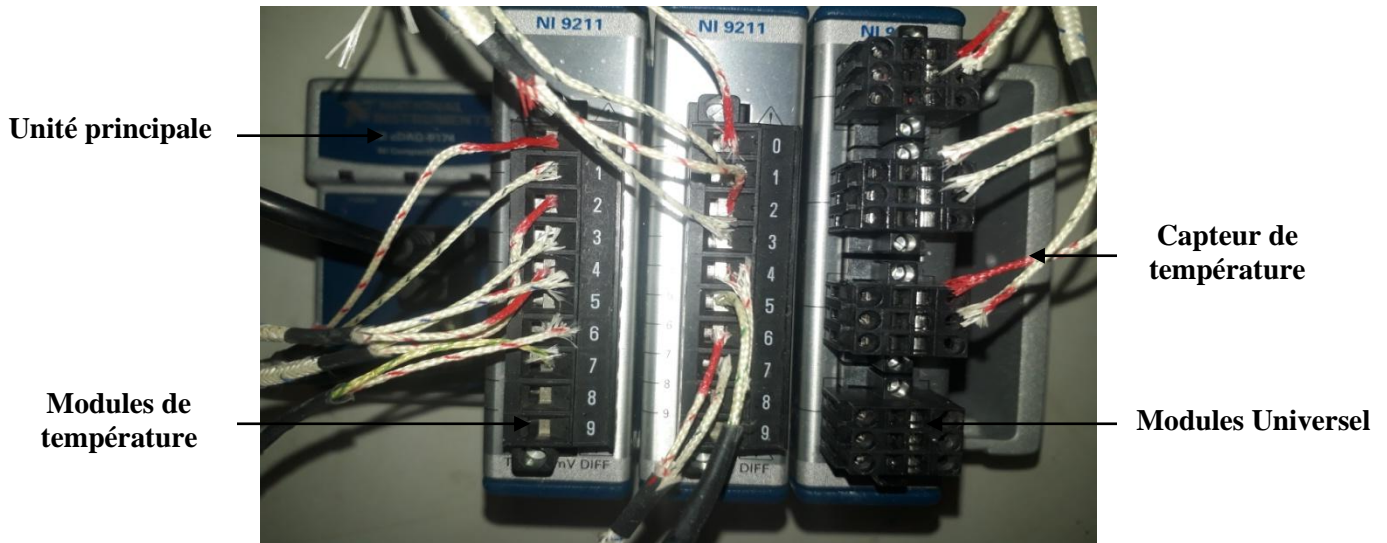


Fig.3 13. Emplacement des modules dans l'interface avec le branchement des capteurs de température

3.6 Description du logiciel LabVIEW

LabVIEW (contraction de Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) est le cœur d'une plate-forme de conception de systèmes de mesure et de contrôle, fondée sur un environnement de développement graphique de National Instruments. Les domaines d'application traditionnels de LabVIEW sont le contrôle/commande, la mesure, l'instrumentation ainsi que le test automatisé à partir d'un PC (acquisition de données, contrôle-commande, contrôle d'instruments de mesure, de dispositifs expérimentaux, de bancs de test). Cette vocation est consacrée par des bibliothèques de fonctions spécialisées (cartes d'acquisition DAQ, traitement de données...), mais aussi par les particularités du langage G (parallélisme inhérent à l'exécution par flux de données) et de l'environnement de développement (pilotes de périphériques standards, assistants pour l'installation du matériel). Le concept d'instrument virtuel qui a donné son nom à LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), se manifeste par la permanence d'une interface graphique pour chaque module (fonction) d'un programme.

Un programme LabVIEW permet donc d'automatiser un montage associant plusieurs appareils programmables et réunit, ainsi l'accès aux fonctionnalités de ce montage dans une interface utilisateur unique, véritable face avant d'un instrument virtuel [43].

3.6.1 Présentation de l'interface

Afin d'œuvrer l'acquisition numérique des températures mesurées, on a développé un programme graphique à l'aide de Labview. Ce dernier comporte deux interfaces : une interface arrière de programmation graphique et une interface avant pour la gestion des données.

a) Interface arrière (blockdiagram)

Elle englobe tous les programmes terminaux des commandes tels que les terminaux d'affichage, les connecteurs et fils, les constantes et aussi les nœuds (sous programmes, structures, interfaces code). DAQ Assistant est un système d'acquisition de données (DAQ) qui utilise un périphérique d'acquisition de données pour transmettre un signal électrique conditionné à un ordinateur à des fins d'analyse et d'enregistrement des données dans un fichier Excel. Cette interface comporte des indicateurs, DAQ assistant, boucle while, tableaux, et graphes.

b) Graphes

Le graphe est utilisé pour le tracé d'un ou de plusieurs mesures de températures. La fonction tracée est sous la forme $y = f(x)$ avec des points égaux le long de l'axe x, permettant ainsi de visionner directement la variation des mesures (Fig. 3.11)

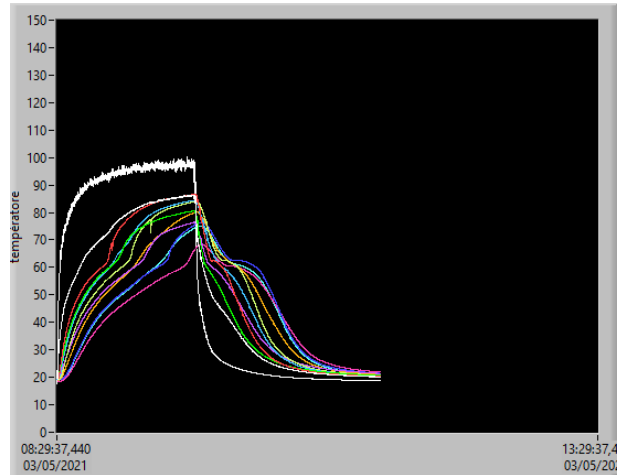


Fig.3 14. Exemple de graphes enregistrés sur l'interface

c) Enregistrement des données sur fichier Excel

Les données générées et analysées à partir du programme développé sont enregistrées sous un fichier Excel qui permet d'afficher à la fois la date, l'heure et le temps, mais aussi les températures de chaque thermocouple. Ces données sont répertoriées à partir d'une commande (Fig. 3.12) pour faciliter l'organisation et la recherche des données.

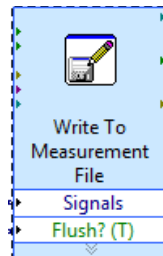


Fig.3 15. Enregistrement des données sur fichier Excel

d) Interface avant (front panel)

Afin de pouvoir gérer numériquement les différentes mesures de température, une interface de commande a été développée (Fig. 3.13) pour visualiser l'évolution graphique et numérique de températures. Plusieurs contrôles et afficheurs de données sont inclus dans cette partie d'interface qui comporte des interrupteurs, tableaux, boîtes de messages et graphes

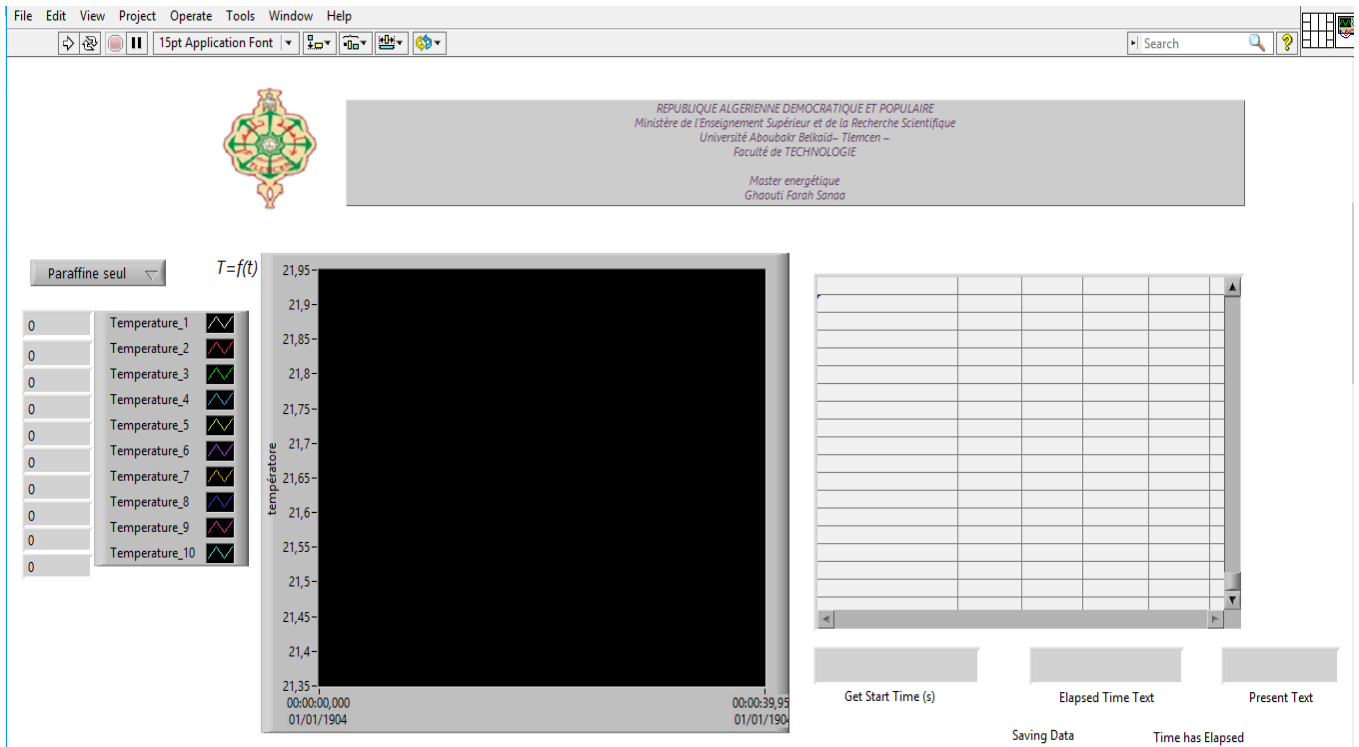


Fig.3 16. Présentation de l'interface (face avant)

3.7 Procédure expérimentale

L'air ambiant (fluide caloporteur HTF) circule par le ventilateur à vitesse variable placé à l'entrée. Cet air se chauffe en traversant la résistance thermique puis il est refoulé à travers le canal isolé par 3 couches de papier kraft et de laine de roche (Rockwool KRAFT), de dimensions de vente 7000 Longueur, 1200 Largeur et 70 d'épaisseur).



Fig.3 17. Laine de roche (Rockwool KRAFT)

Chapitre. 3 Procédure expérimentale

Afin d'optimiser le processus de stockage/déstockage, le stockeur a été étudié pour 3 échangeurs tubulaire à ailettes rectangulaire espacés de 2 cm. (Fig. 3.15).

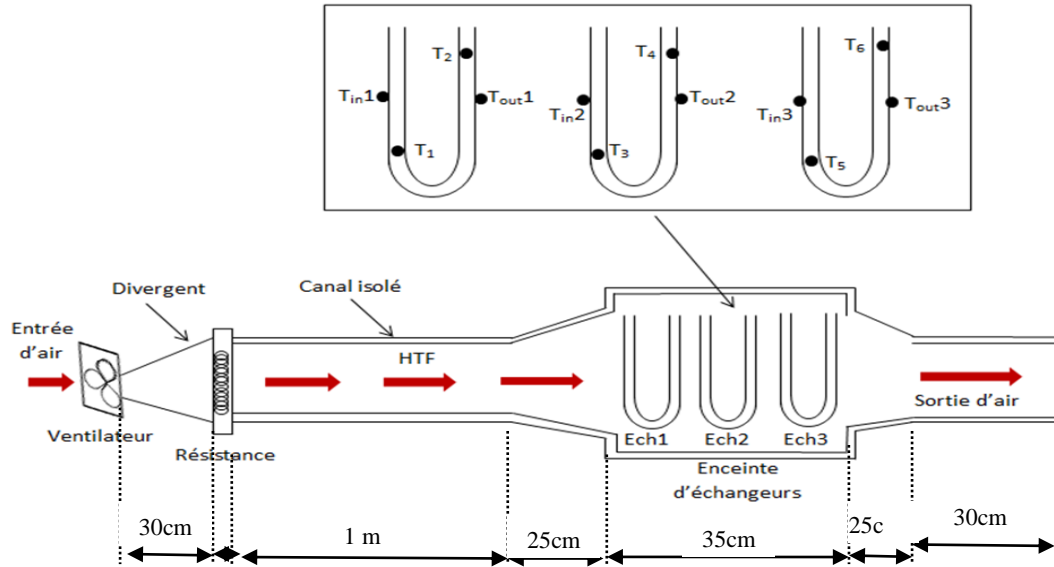


Fig.3 18. Schéma technique du banc expérimental

En premier lieu, la puissance délivrée par la résistance thermique est fixée à 36 W. On impose 3 débits 0,1716 kg/min, 0,4002 kg/min et 0,4764 kg/min. Ces débits sont mesurés par un anémomètre à fil chaud. Cette étape est considérée comme étant la puissance est fixe et les débits sont variables. Ensuite comme seconde étape, on fixe le débit d'air à 0,4002 kg/min et on varie la puissance de 34 à 38 W tout en passant par 36 W.

Le processus de stockage démarre avec l'enregistrement des températures. L'air chaud traverse le canal isolé puis les échangeurs à ailettes pour chauffer la paraffine et actionner la fusion à l'intérieur des tubes. Le processus de stockage s'arrête après 1 heure 15 min. A cet instant, la résistance thermique est arrêtée pour laisser passer l'air froid (ambient) avec le même débit d'air afin de décharger toute la chaleur stockée ultérieurement dans les mêmes débits d'air afin de décharger toute la chaleur stockée ultérieurement dans les échangeurs. Cette opération s'appelle le déstockage.

Chapitre 4 :

Résultats et interprétations

4.1 Introduction

Dans les travaux antérieurs [44,6], il a été noté que le cycle de stockage et de déstockage est d'environ 50 min. Afin de prolonger le temps de ce dernier, plusieurs idées peuvent être exploitées parmi lesquelles, on peut citer

- L'augmentation de la surface de l'échangeur en utilisant un seul stockeur. Cette solution entraîne l'utilisation d'un seul type de MCP avec des dimensions qui peuvent être assez importantes.
- Utiliser plusieurs échangeurs identiques à l'intérieur du stockeur. Cette solution permet de varier le nombre d'échangeurs selon l'application et d'utiliser plusieurs MCP de différentes températures de fusion.

On propose d'étudier l'effet du nombre d'échangeurs sur la quantité de MCP stockée, l'influence de la puissance et du débit d'air sur l'évolution de la température du MCP, la différence de température de l'air (HTF), la quantité d'énergie thermique ainsi que l'efficacité du stockeur.

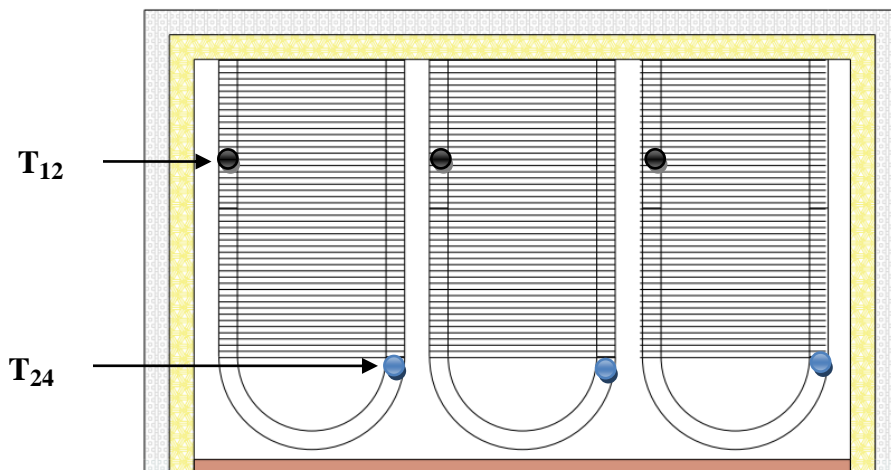


Fig. 4. 1. Schéma technique du stockeur (Positionnement des échangeurs)

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux du processus de stockage /déstockage thermique pour trois échangeurs. Les expériences s'articulent d'une part sur l'influence de différents débits à puissance constante et d'autre part sur l'influence des puissances pour un débit constant.

4.2 Evolution de la température du MCP

4.2.1 Phase de stockage

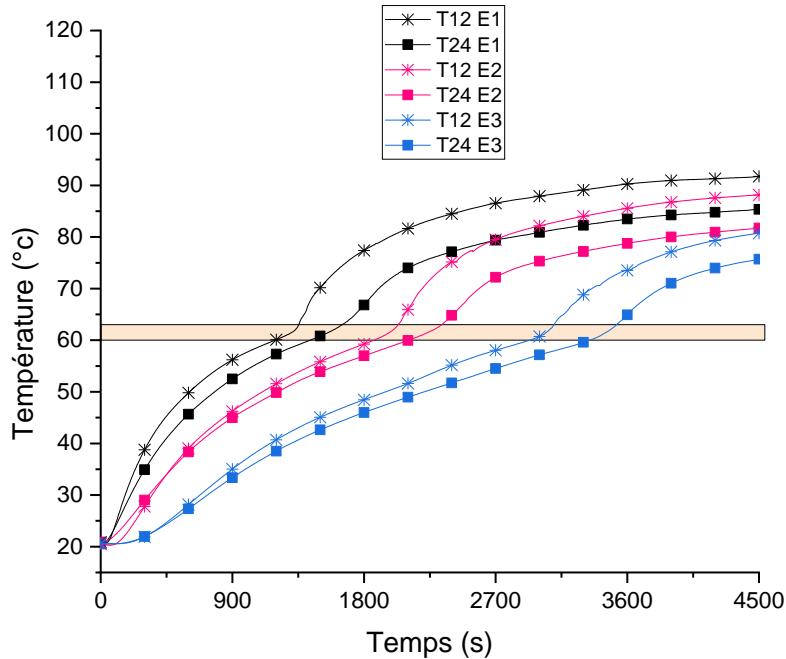


Fig. 4. 2. Evolution temporelle des températures du MCP durant le processus de stockage pour (36 W et 0,4002 kg/min)

La Fig.4.2 représente l'évolution temporelle de la température de la paraffine pour une puissance de chauffage de 36 W et un débit massique de 0,4002 kg/min.

Durant la phase de stockage (≈ 75 min, (4500 s)), les résultats montrent que la fusion ($T_f = 60 \div 64$ °C) commence aux alentours de 1202, 1880 et 2946 s et s'achève après 1656, 2336 et 3530 s respectivement pour les échangeurs E1, E2 et E3. On remarque aussi que la fusion commence toujours par le point haut T_{12} et se termine par le point bas T_{24} , ce qui nous permet de prédire que la fusion démarre du haut et se dirige vers le bas.

Durant le stockage par chaleur sensible (phase solide) les températures au niveau haut (T_{12}) sont supérieures à celles du niveau bas (T_{24}) dues aux forces de flottabilité au sein de l'écoulement d'air (convection naturel). À partir de la fusion, l'écart de température entre (T_{12}) et (T_{24}) augmente grâce au développement de l'écoulement thermo-convectif (des forces de flottabilité) dans la phase liquide du MCP. Les

résultats montrent que E2 et E3 enregistrent respectivement un retard moyen de la fusion de 48,5 % et 129 % par rapport à E1.

A la fin du processus de stockage, les températures atteignent respectivement 92, 88 et 82 °C pour E1, E2 et E3. Il est remarqué que, plus l'échangeur s'éloigne de l'entrée, plus sa température diminue entraînant avec elle la diminution de la chaleur stockée. En effet, l'échangeur E1 est plus proche de l'air chaud que les échangeurs E2 et E3.

4.2.2 Phase de déstockage

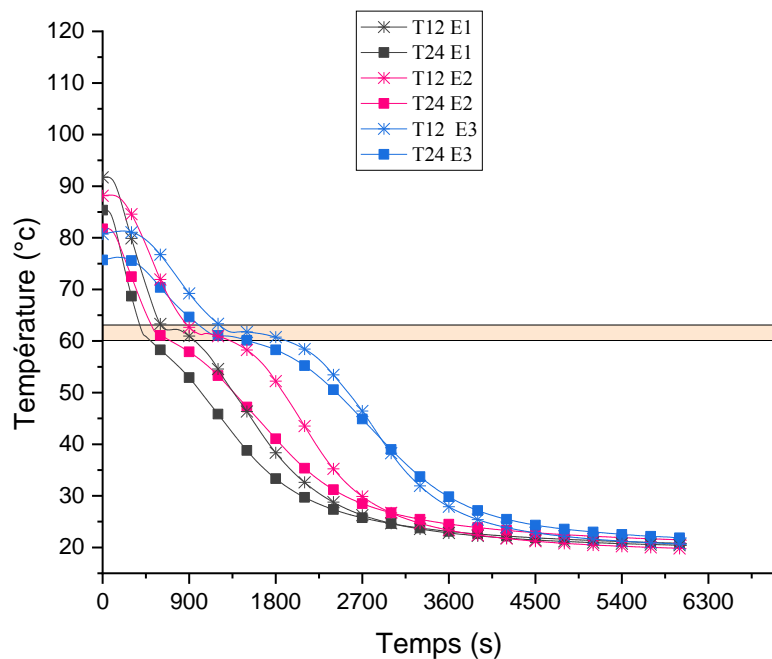


Fig. 4. 3. Evolution temporelle des températures du MCP durant le processus de déstockage pour (36 W et 0,4002 kg/min)

Après 4500 s (1h15min), les résistances de chauffage sont arrêtées et permettent à l'air froid (ambient) de circuler, c'est le début de la phase de déstockage. Durant cette phase, la solidification commence aux alentours de 386, 506 et 996 s et s'achève après 954, 1318 et 1898 s respectivement pour les échangeurs E1, E2 et E3 (Fig. 4.3).

Lorsque l'air froid traverse les échangeurs, la paraffine cède sa chaleur à l'air en se solidifiant (récupération de la chaleur latente). E1 subit un refroidissement plus rapide que les 2 autres échangeurs puisqu'il est exposé directement à l'air froid.

On remarque, contrairement à la fusion que la solidification commence toujours par le bas (T_{24}) et se termine par le haut (T_{12}). Ce phénomène est dû au mouvement thermo-convectif naturel dans la phase liquide du MCP. Les forces de flottabilité entraînent la montée de la chaleur vers le haut, causant le démarrage de la solidification du MCP par le bas. Après 6070 s (1 heure 40 min), les échangeurs libèrent leur chaleur totale pour atteindre la température ambiante.

4.2.3 Différence de température de l'air

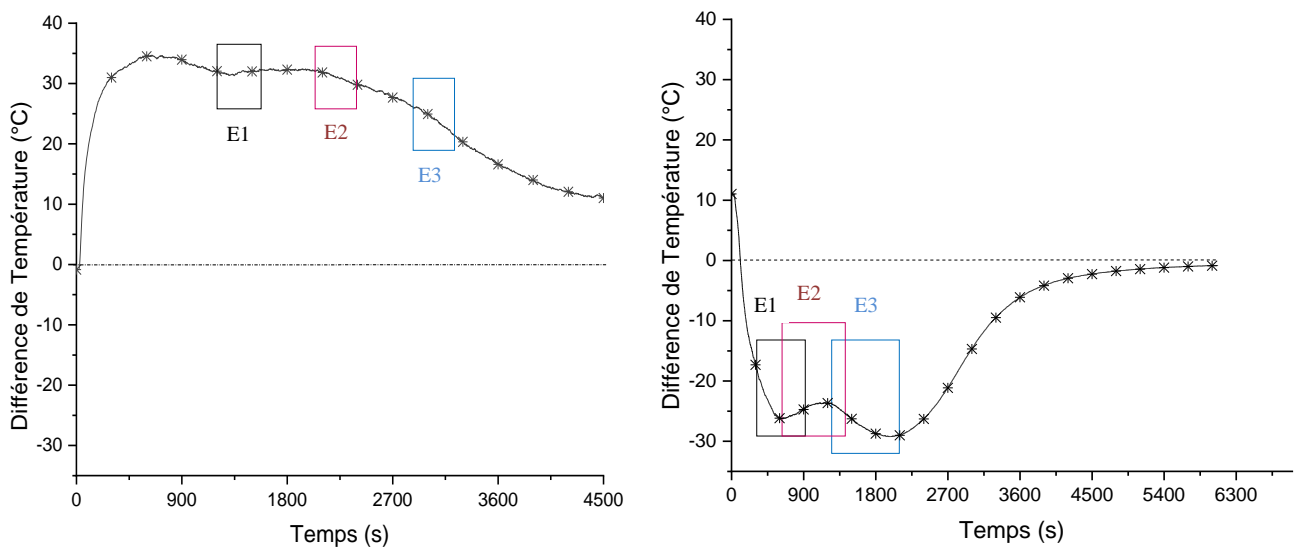


Fig. 4. 4. Evolution temporelle de la différence de températures de l'air pour (36 W et 0,4002 kg/min)

La Fig.4.4 représente la différence de température de l'air entre l'entrée et la sortie des 3 échangeurs. La différence de température de l'air augmente rapidement et atteint 34,6 °C à 600 s. Ensuite, elle commence à diminuer graduellement jusqu'à atteindre 32 °C à 1216 s et se stabilise dans un intervalle de 5 °C (fusion de la paraffine dans E1 et E2). Cette différence de température diminue par la suite pour atteindre 11 °C après 75 min (fin de la phase de stockage). Cet écart de température est dû aux pertes thermiques.

Chapitre 4. Résultats et interprétations

Durant la phase de déstockage, la différence des températures devient négative car la température de l'air à la sortie est plus importante que celle à l'entrée. Le graphe enregistre 3 extrémums, le 1^{er} est durant la solidification de E1 pour une différence de température de 26 °C à 604 s. Le début de la solidification de E2 entraîne une diminution de la différence de température jusqu'à 23 °C aux alentours de 1150 s, c'est le temps du début de solidification de E3. Le 3^{ème} extrémum est enregistré aux alentours de 1900 s pour une différence de température de 29 °C, c'est la fin de solidification E3. Ensuite, elle diminue exponentiellement pour atteindre 1 °C à 6100 s, temps pour lequel le stockeur devient hors service.

4.3 Effet du débit massique de l'air sur les températures du MCP

4.3.1 Phase de stockage

Dans cette expérience, on fixe la puissance à 36 W et on varie le débit d'air respectivement de 0,1716, 0,4002 et 0,4764 kg/min. Les Fig.4.5 représentent cette évolution temporelle des températures durant la phase de stockage pour la puissance et les débits d'air sus-indiqués. Les températures du début et de la fin de fusion du MCP sont représentées sur le tableau suivant :

Tableau 4. 1. Effet du débit durant la phase de stockage

	0,1716 kg/min		0,4002 kg/min		0,4764 kg/min	
	Début de fusion	Fin de fusion	Début de fusion	Fin de fusion	Début de fusion	Fin de fusion
E1	1578 s	2078 s	1194 s	1682 s	980 s	1534 s
E2	2564 s	3182 s	1858 s	2354 s	1484 s	2138 s
E3	4310 s	5500 s	2920 s	3548 s	2354 s	3168 s

Chapitre 4. Résultats et interprétations

- A la fin de la phase de stockage, le maximum de température atteint par le MCP dans E1 est de 109, 91 et 89 °C respectivement pour les débits 0,1716, 0,4002 et 0,4764 kg/min. L'augmentation du débit massique de 133 et 178 %, entraine la diminution de la température maximale de 16,5 % et 18,4 %.
- Le maximum de température atteint par le MCP dans E2 est de 95 °C pour un débit de 0,1716 et 88 °C pour 0,4002 et 0,4764 kg/min. L'augmentation du débit massique de 133 % entraine la diminution de la température maximale de 7,3 %.
- Le maximum de température atteint par le MCP dans E3 est de 61, 80 et 82 °C respectivement pour les débits 0,1716, 0,4002 et 0,4764 kg/min. L'augmentation du débit massique de 133 et 178 % entraine l'augmentation de la température maximale de 31 et 34 %.
- Ainsi l'augmentation de débit entraine la diminution de la température au niveau de E1 et E2 et l'augmentation de la température de E3. Cela est dû probablement à la diminution de la vitesse de l'air le long du canal entraîné par les forces de frottement qui augmentent avec l'augmentation du nombre d'échangeurs.
- L'augmentation du débit massique de 133 et 178 % avance le processus du début de fusion en moyenne de 27 et 41 % et réduit l'intervalle de fusion en moyenne de 45,9 % et 32,9 %. En effet, l'augmentation du débit entraine l'augmentation de l'intensité de chauffage de l'unité de stockage.

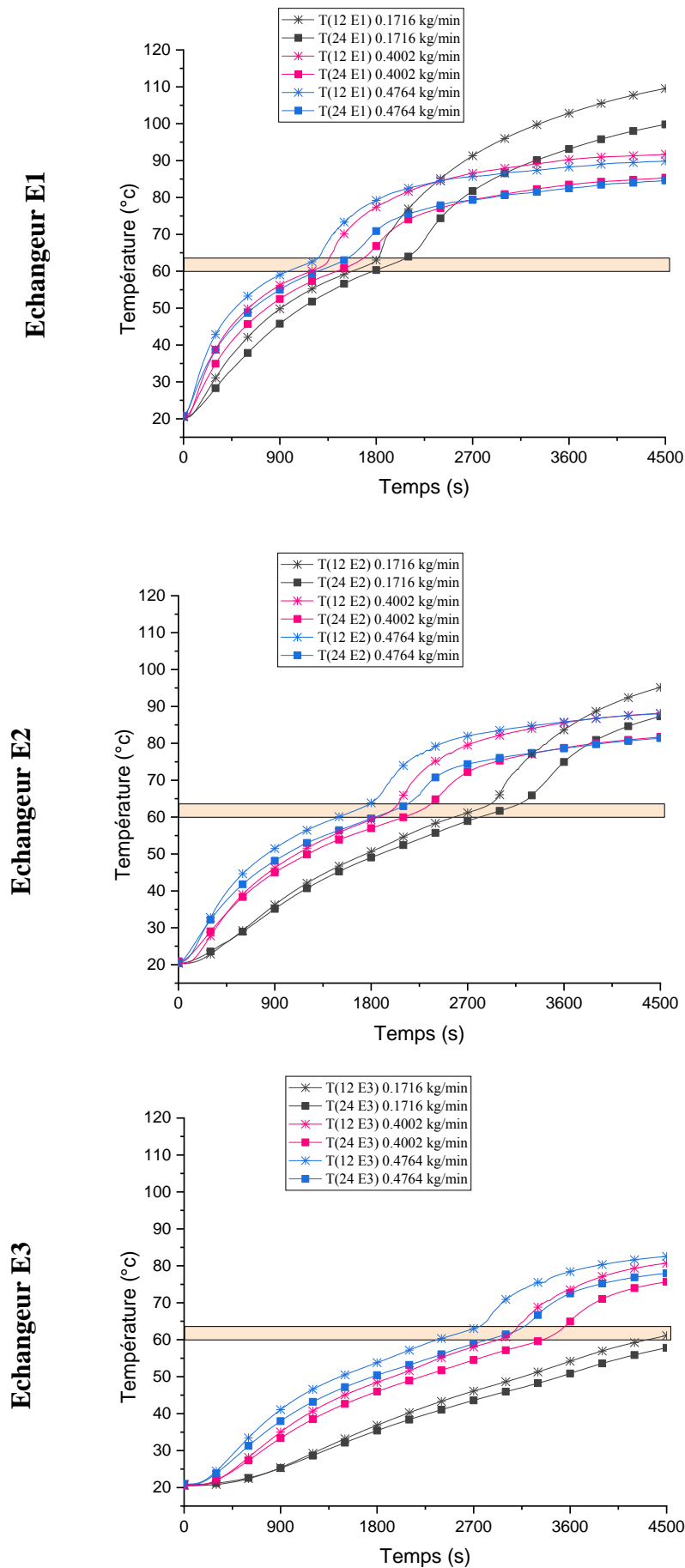


Fig. 4. 5. Evolution temporelle des températures du MCP durant la phase de stockage pour différents débits massiques d'air et 36 W de puissance

4.3.2 Phase de déstockage

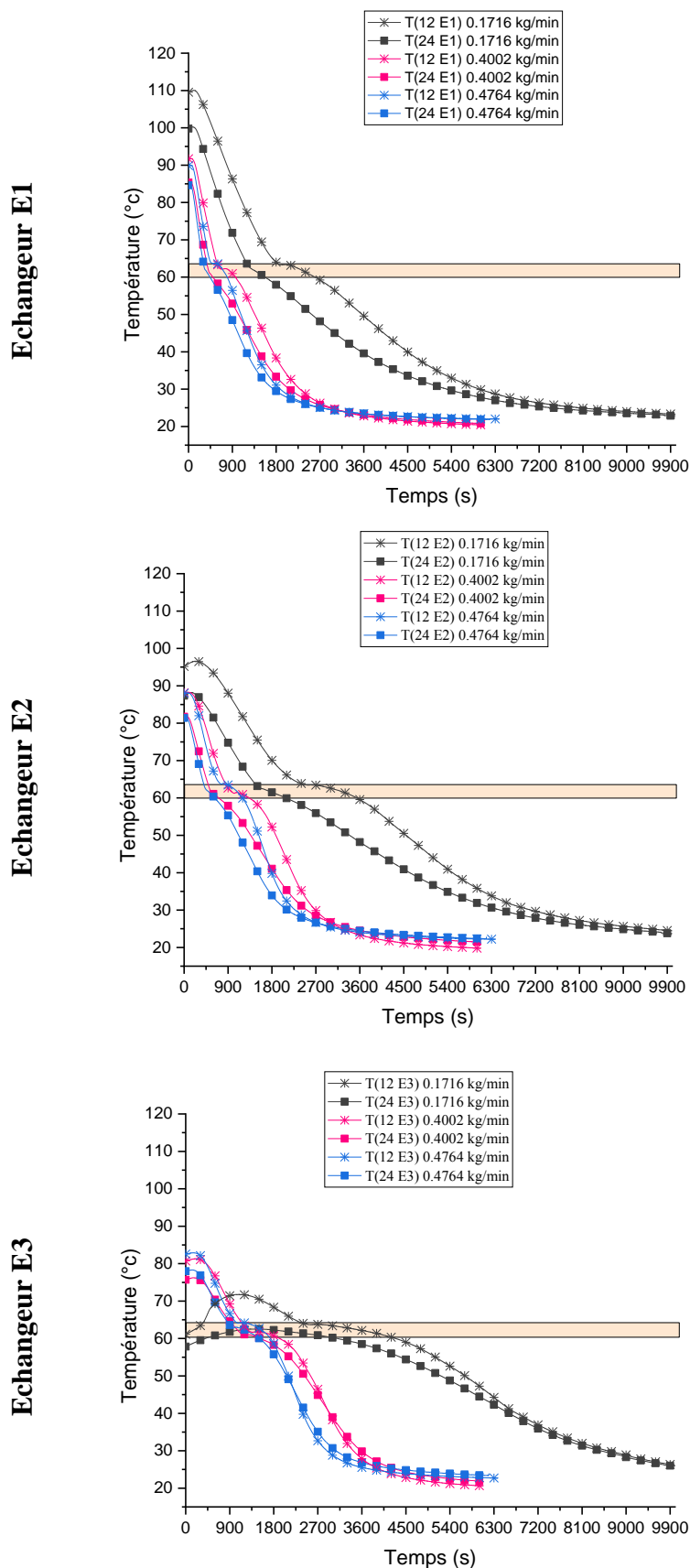


Fig. 4. 6. Evolution temporelle des températures du MCP pour différent puissances (avec un débit 0.4002 kg/min) durant la phase de stockage

Chapitre 4. Résultats et interprétations

Les Fig.4.6 représentent l'évolution temporelle des températures durant la phase de déstockage pour une puissance de 36 W et pour les différents débits d'air. Les températures du début et de la fin de solidification du MCP sont représentées sur le tableau suivant :

Tableau 4. 2. Effet du débit durant la phase de déstockage

	0,1716 kg/min		0,4002 kg/min		0,4764 kg/min	
	Début de solidification	Fin de solidification	Début de solidification	Fin de solidification	Début de solidification	Fin de solidification
E1	1200 s	2594 s	378 s	962 s	306 s	794 s
E2	1462 s	3540 s	494 s	1346 s	404 s	1204 s
E3	2396 s	4206 s	922 s	1876 s	860 s	1714 s

- L'augmentation du débit massique de 133 et 178 % a accéléré le processus de solidification en moyenne de 65 et 70 % et réduit l'intervalle de solidification en moyenne de 27,6 et 33,9 %.

4.3.3 Effet du débit massique de l'air sur la différence de sa température

La Fig.4.7 représente l'effet du débit massique de l'air sur le comportement de la différence de température de l'air. Pendant la phase de stockage, les différences de température augmentent et atteignent un maximum de (42 ; 36,6 et 34,4 °C) à (1522, 732 et 546 s) respectivement pour les débits massiques de 0,1716, 0,4002 et 0,4764 kg/min. Les différences de température de l'air commencent à diminuer pour se stabiliser et atteindre à la fin de la phase de stockage un minimum de 11 et 9 °C pour 0,4002 kg/min et 0,4764 kg/min. Par contre, le faible débit d'air de 0,1716 kg/min continue à augmenter et se stabilise autour 52 °C jusqu'à la fin du stockage. Avec l'augmentation du débit, le temps de séjour de l'air dans le stockeur diminue entraînant la réduction l'énergie stockée.

Chapitre 4. Résultats et interprétations

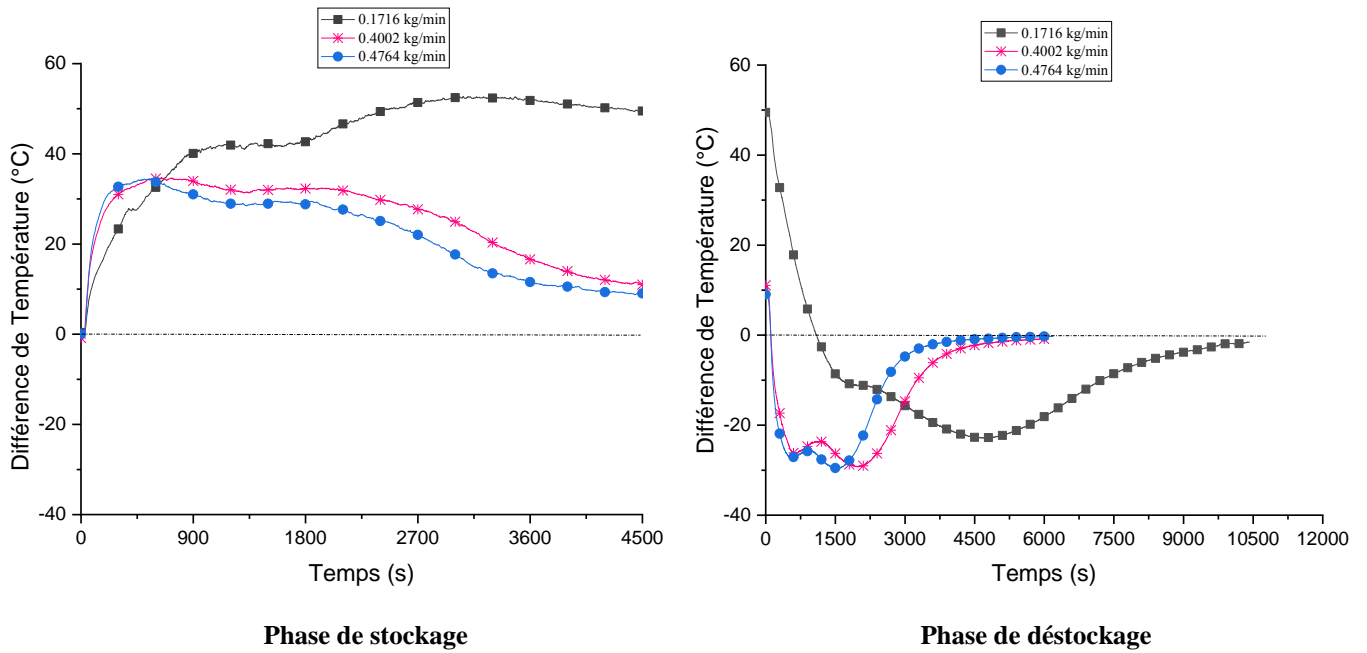


Fig. 4. 7. Evolution temporelle de la différence de température de l'air pour différents débits massiques de l'air avec une puissance de 36 W

Pendant la phase de déstockage, la différence de température de l'air prend une valeur absolue maximale de 22,8 ; 29 et 29,6 °C après 4718, 2100 et 1512 s respectivement pour les débits d'air 0,1716, 0,4002 et 0,4764 kg/min. Ces valeurs représentent respectivement la fin de solidification du 3^{ème} échangeur. Après ces instants, le déstockage continue par chaleur sensible en phase solide. Les débits 0,4002 kg/min et 0,4764 kg/min mettent fin au processus de déstockage (l'air atteint la température ambiante) après 6072 et 6200 s. Par contre, le faible débit massique de 0,1716 kg/min prolonge considérablement la phase de déstockage jusqu'à 10425 s (2 heure 54 s). Inversement au processus de stockage, l'augmentation du débit massique de l'air entraîne l'augmentation de la différence de sa température, ce qui augmente l'énergie libérée et réduit le temps du déstockage.

4.4 Effet de la puissance sur les températures du MCP

4.4.1 Phase de stockage

Dans cette seconde expérience, on fixe le débit d'air massique à 0,4002 kg/min, puis on varie les puissances respectivement de 34, 36 et 38 W. Les Fig.4.8 représentent cette évolution temporelle des températures durant la phase de stockage pour les débits d'air et la puissance sus-indiqués. Les températures du début et de fin de fusion du MCP sont représentées sur le tableau suivant :

Tableau 4. 3. Effet de la puissance durant la phase de stockage

	38 W		36 W		34 W	
	Début de fusion	Fin de fusion	Début de fusion	Fin de fusion	Début de fusion	Fin de fusion
E1	1002 s	1384 s	1196 s	1684 s	1708 s	2232 s
E2	1500 s	2018 s	1872 s	2354 s	2406 s	3060 s
E3	2402 s	3258 s	2936 s	3546 s	3608 s	4478 s

- L'augmentation de la puissance de 5,8 % et 11,8 % entraine l'augmentation de la température maximale moyenne de 18,5 %, 20 % et 20 % respectivement pour E1, E2 et E3.
- L'augmentation de la puissance 5,8 et 11,8 %, entraine l'augmentation de la température de l'air, ce qui avance le processus du début de fusion en moyenne de 25 % et 38 % et réduit l'intervalle de fusion dans tout le stockeur de 22 % et 72 %. En effet, l'augmentation de la puissance entraine l'augmentation des températures de l'air qui traverse l'unité de stockage et donc l'intensité du chauffage du MCP.

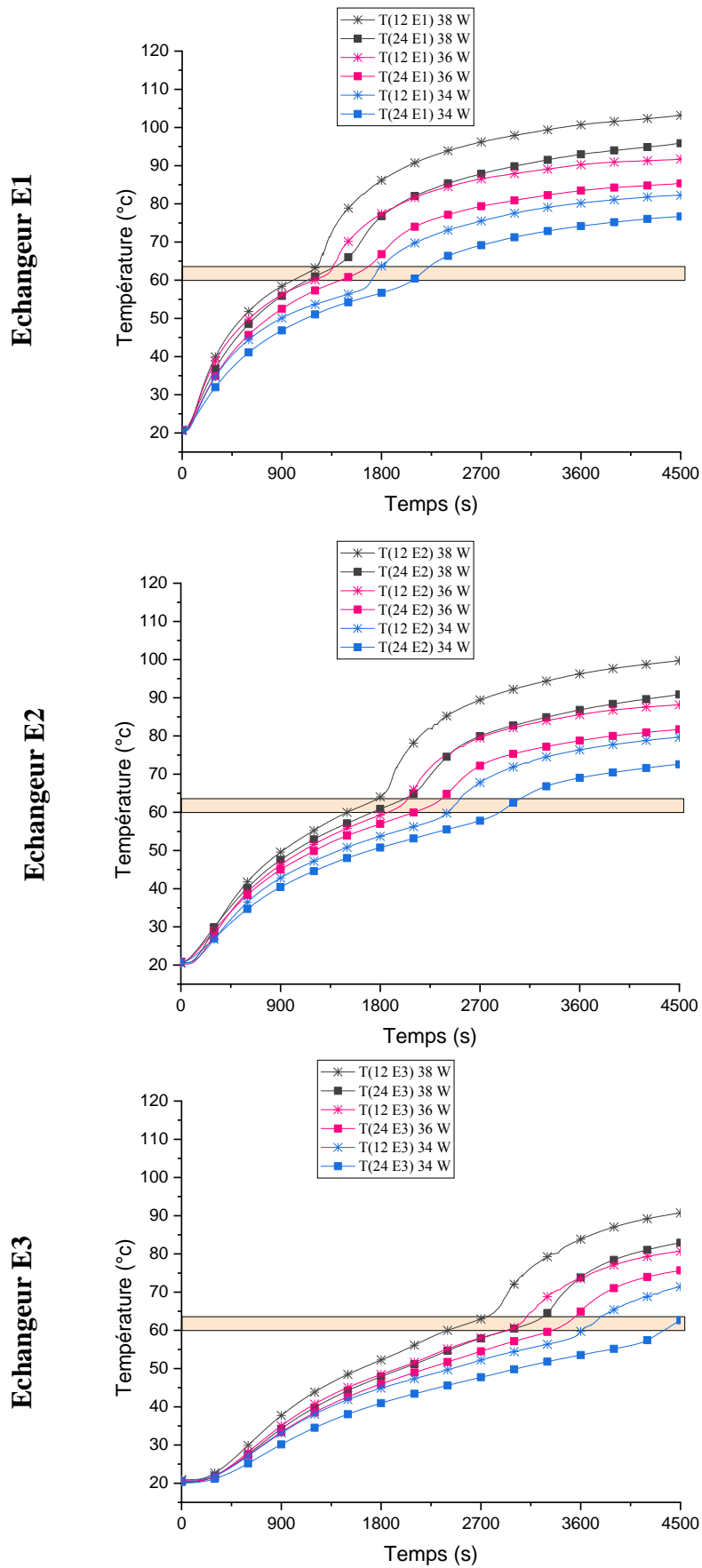


Fig. 4. 8. Evolution temporelle des températures du MCP pour différent puissances (avec un débit 0.4002 kg/min) durant la phase de stockage

4.4.2 Phase de déstockage

Les Fig. 4.9 représentent l'évolution temporelle des températures durant la phase de déstockage pour le débit d'air massique de 0,4002 kg/min et pour les différentes puissances. Les températures du début et de la fin de la solidification du MCP sont représentées sur le tableau suivant :

Tableau 4. 4. Effet de la puissance durant la phase de déstockage

	38 W		36 W		34 W	
	Début de solidification	Fin de solidification	Début de solidification	Fin de solidification	Début de solidification	Fin de solidification
E1	532 s	1280 s	378s	962 s	342 s	644 s
E2	712 s	1818 s	494 s	1330 s	486 s	1080 s
E3	1344 s	2466	966	1914 s	608 s	1270 s

- L'augmentation de la puissance de 5,8 et 11,8 % retarde le démarrage de la solidification en moyenne de 182 et 293 %.
- Avec une faible puissance de 34 W, E3 entame à peine son processus de fusion qui se prolonge même durant le processus de déstockage. Ainsi, on peut considérer cette puissance comme limite inférieure pour le fonctionnement optimal du stockeur.

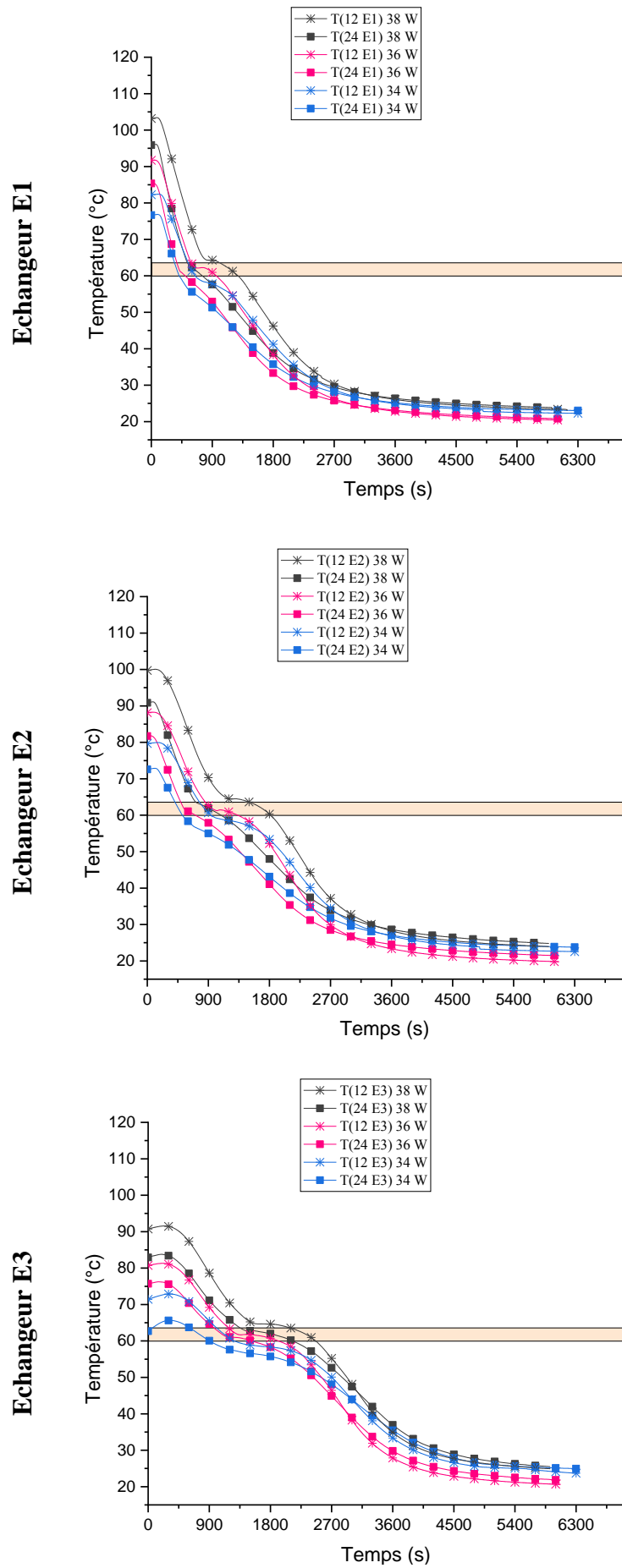


Fig. 4. 9. Evolution temporelle des températures du MCP pour différentes puissances (avec un débit 0.4002 kg/min) durant la phase de déstockage

4.4.3 Effet de la puissance sur la différence de température de l'air

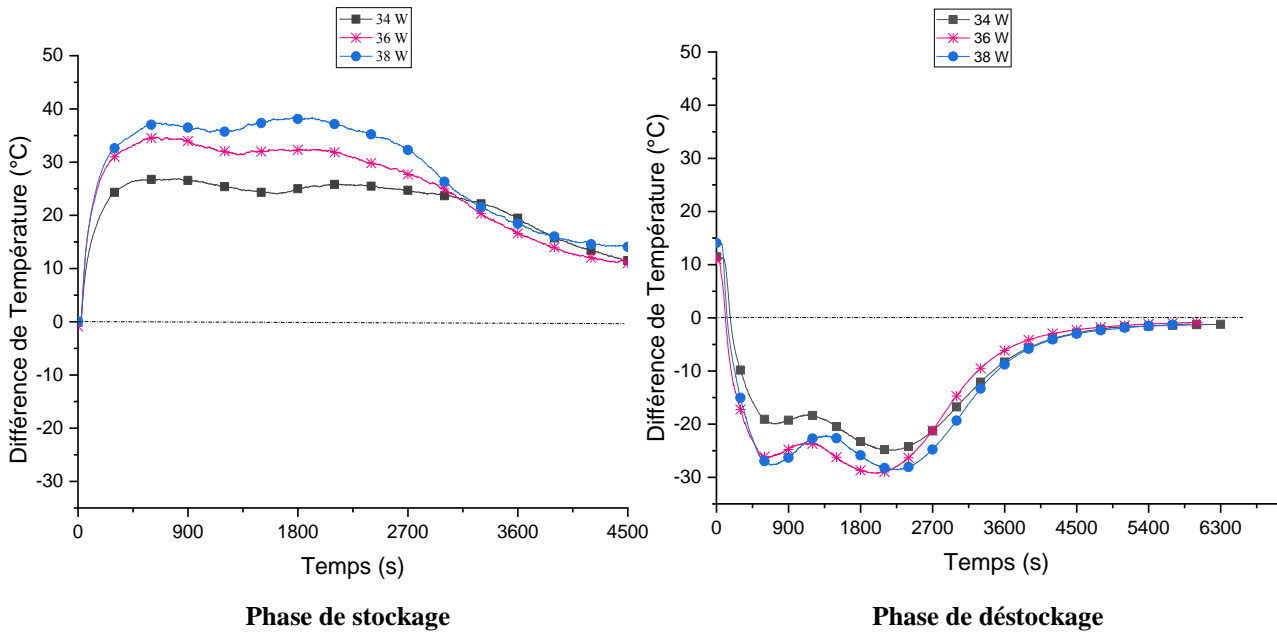


Fig. 4. 10. Evolution temporelle de la différence de température de l'air pour différentes puissances et un débit fixe de 0.4002 kg/min

La Fig. 4.10 représente l'effet de la variation de la puissance sur la différence de température de l'air entre l'entrée et la sortie pour un débit massique constant de 0.4002 kg/min. L'augmentation de la puissance de 5,8 et 11,8 %, entraîne l'augmentation de la température de la différence de température maximale de 22,8 et 28,4 %. Ensuite, elle commence à diminuer pour se stabiliser et atteindre à la fin du stockage un minimum de 11, 10 et 14 °C respectivement pour 34, 36 et 38 W.

Pendant la phase de déstockage la différence de température de l'air atteint un maximum en valeur absolue de 25, 29 et 28 °C à 2228 ,1848 et 2112 s respectivement pour 34, 36 et 38 W. En conclusion, en augmentant la puissance thermique, le flux de chaleur fourni au MCP augmente aussi entraînant avec lui l'augmentation de la différence de température de l'air résultat de l'amélioration du stockage de la chaleur.

4.5 Evolution de l'énergie thermique

La quantité de la chaleur stockée par le MCP dans les trois échangeurs peut être quantifiée selon l'expression :

$$E = \sum_{t=0} \{ m_{MCP} C_{P_{MCP}} \sum_{E1,E1,E3} [T_m^{t+\Delta t}(E_i) - T_m^t(E_i)] \} \quad (4.1)$$

E : l'énergie thermique libérée ou récupérée

m_{MCP} : la masse de MCP dans les 3 échangeurs

$C_{P_{MCP}}$: Capacité calorifique de MCP

$T_m^{t+\Delta t}$ et T_m^t : Température moyenne de MCP dans chaque échangeur E_i aux temps présent et précédent.

4.5.1 Effet débit sur l'énergie échangée

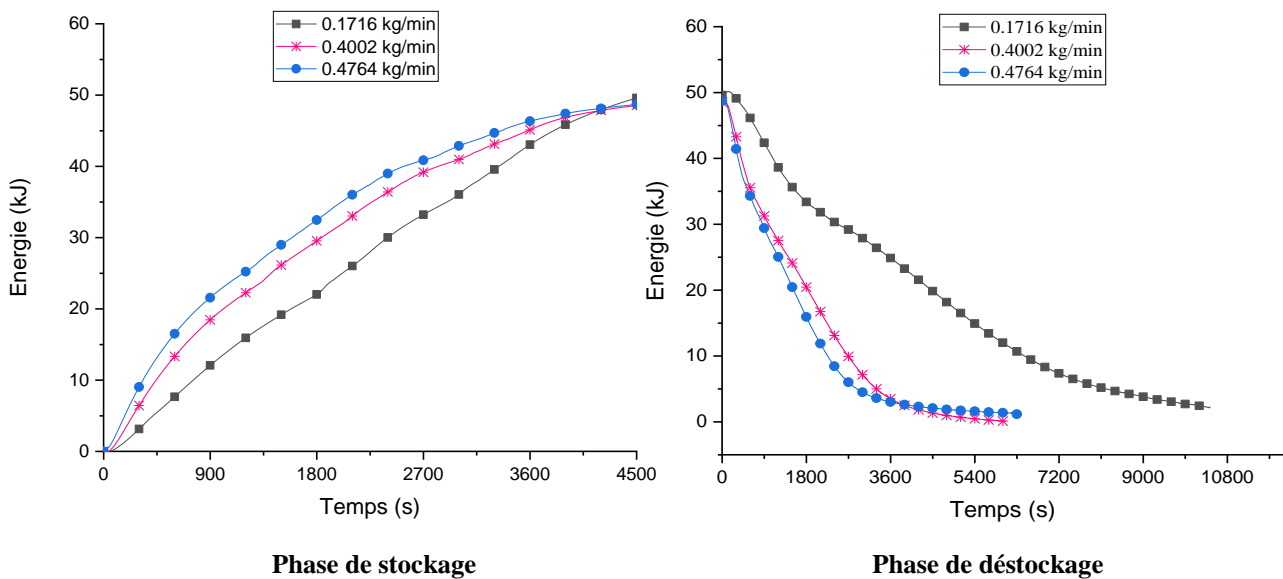


Fig. 4. 11. Evolution temporelle de l'énergie du MCP pour différents débits

La Fig.4.11 représente l'évolution temporelle de l'énergie stockée/déstockée par le MCP pour différents débits d'air et une puissance de 36 W. Durant la phase de stockage et après une demi-heure, l'augmentation du débit d'air de 133 et 178 % accélère le processus de stockage dont la quantité d'énergie stockée peut augmenter de 34 et 57 %. A la fin du processus, le stockeur enregistre une quantité d'énergie allant jusqu'à 50 kJ pour les trois débits. Pendant la phase de déstockage, le stockeur libère totalement son énergie après 2 heure 51 min, 1heure 39 min et 1 heure 46 min respectivement pour les débits de 0,1716, 0,4002 et 0,4764 kg/min. Le faible débit massique prolonge considérablement la phase de déstockage, tandis que les débits massiques élevés augmentent la quantité d'énergie libérée.

4.5.2 Effet de la puissance sur l'énergie échangée

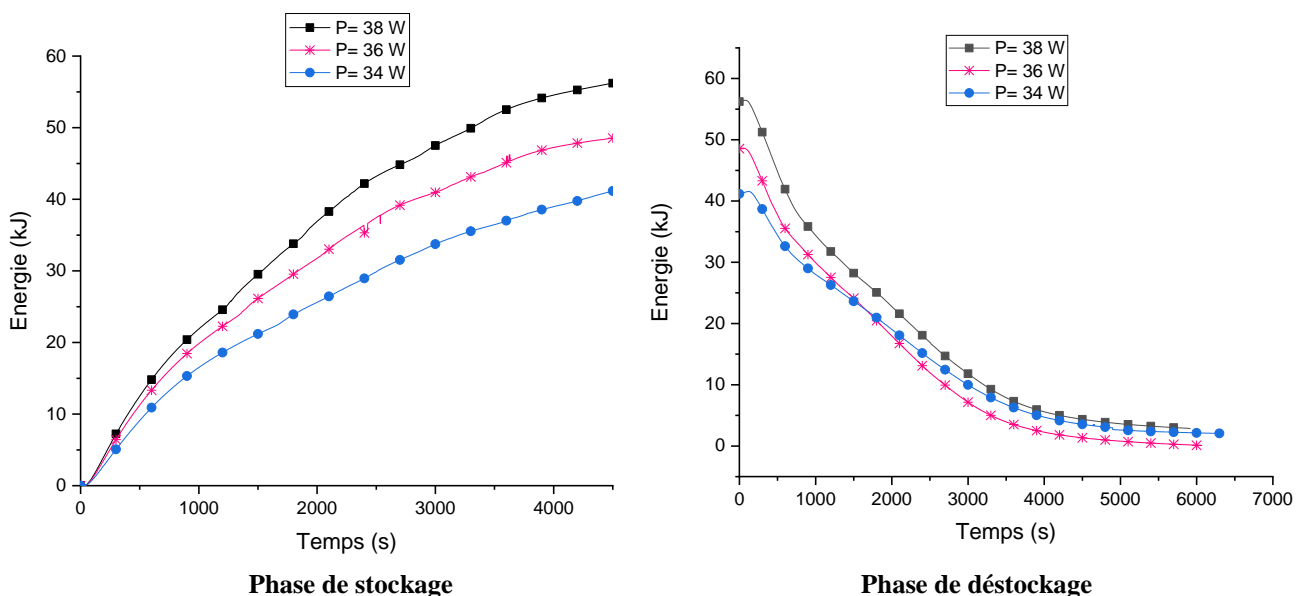


Fig. 4. 12. Evolution temporelle de l'énergie du MCP pour différentes puissances et un débit 0.4002 kg/min durant la phase de stockage et de déstockage

La Fig.4.12 représente l'évolution temporelle de l'énergie stockée/déstockée par le MCP pour différentes puissances et pour le débit de 0.4002 kg/min. Pendant la phase de stockage, les échangeurs peuvent stocker à la fin du processus une énergie thermique de 41,5, 48,6 et 56,4 kJ respectivement pour 34, 36 et 38 W (l'augmentation de la puissance de 5,8 et 11,8 % augmente la quantité d'énergie stockée de 14,6 et 26,4 %). Pendant la phase de déstockage, le stockeur libère totalement son énergie après 1 heure 40 min dont l'énergie atteint autour de 2, 0,2 et 3 kJ pour 34, 36 et 38 W.

En conclusion, l'augmentation de la puissance thermique provoque l'augmentation de chaleur véhiculée par le fluide caloporteur entraînant ainsi l'amélioration de la chaleur stockée.

4.6 Efficacité du stockeur

Pour caractériser les performances thermiques d'un stockeur, la démarche la plus naturelle paraît être de comparer sa puissance thermique réelle Φ_r avec la puissance maximum Φ_{max} . On appelle l'efficacité thermique ε du stockeur comme le rapport Φ_r par rapport à Φ_{max} , qui est évidemment sans dimension [45] :

$$\varepsilon = \frac{\Phi_r}{\Phi_{max}} = \left(\frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in} - T_{initial}} \right)_{Stockage} = \left(\frac{T_{out} - T_{in}}{T_{initial} - T_{in}} \right)_{Déstockage} \quad 0 \leq \varepsilon \leq 1 \quad (4.2)$$

Avec $T_{initial} = 20 \text{ °C}$ est la température initiale de l'air mesurée

4.3.3. Effet du débit sur l'efficacité du stockeur

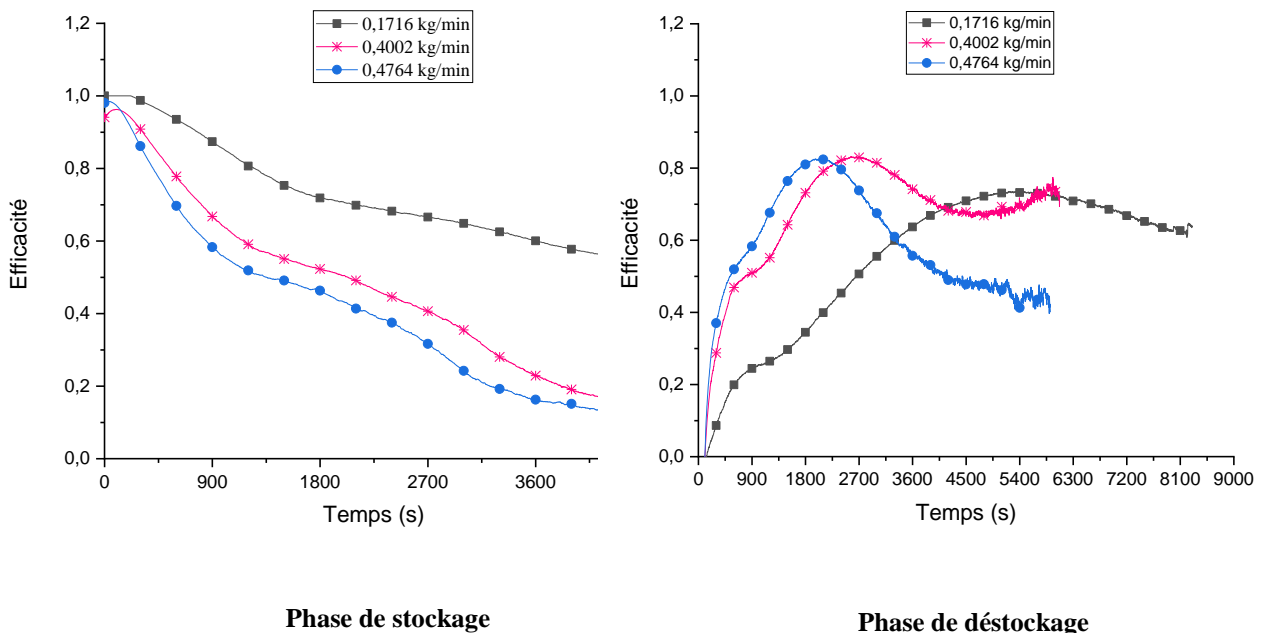


Fig. 4. 13. Evolution temporelle de l'efficacité pour différents débits d'air et 36 W durant la phase de stockage et de déstockage

Chapitre 4. Résultats et interprétations

La Fig. 4.13 représente l'effet du débit massique sur l'évolution temporelle de l'efficacité pour 36 W. Au début de la phase de stockage, l'efficacité est maximale d'environ 99,9, 98 et 95 % respectivement pour 0,1716, 0,4002 et 0,4764 kg/min. En effet, la température de l'air à la sortie avoisine la température ambiante entraînant une efficacité maximale autour de 100%. Ensuite, la température de l'air à la sortie diminue entraînant la diminution de l'efficacité du stockage jusqu'à la fin de processus pour atteindre environ 15 et 13 % pour les débits de 0,4002 et 0,4764 kg/min et 54 % pour un débit de 0,1716 kg/min. Il est remarqué que le faible débit de 0,1716 kg/min offre une meilleure efficacité puisque la différence de température de l'air reste assez importante jusqu'à la fin du processus. Un débit massique de 0,1716 kg/min assure une efficacité moyenne de 72,7 %, alors que son augmentation de 133 et 178 % diminue l'efficacité moyenne du stockeur de 46,4 et 40,2%.

de Durant la phase de déstockage, l'efficacité augmente et atteint un maximum de 73, 83 et 82 % aux instants 5070, 2606 et 2054 s. Ensuite, elle diminue progressivement jusqu'à la fin déstockage pour atteindre 62, 70 et 40 % respectivement pour 0,1716, 0,4002 et 0,4764 kg/min. L'efficacité moyenne atteint 44,6, 65,7 et 54,7 % respectivement pour les débits 0,1716, 0,4002 et 0,4764 kg/min.

Globalement, les résultats montrent que l'efficacité augmente avec la diminution du débit d'air durant la phase de stockage.

4.6.1 Effet de la puissance sur l'efficacité du stockeur

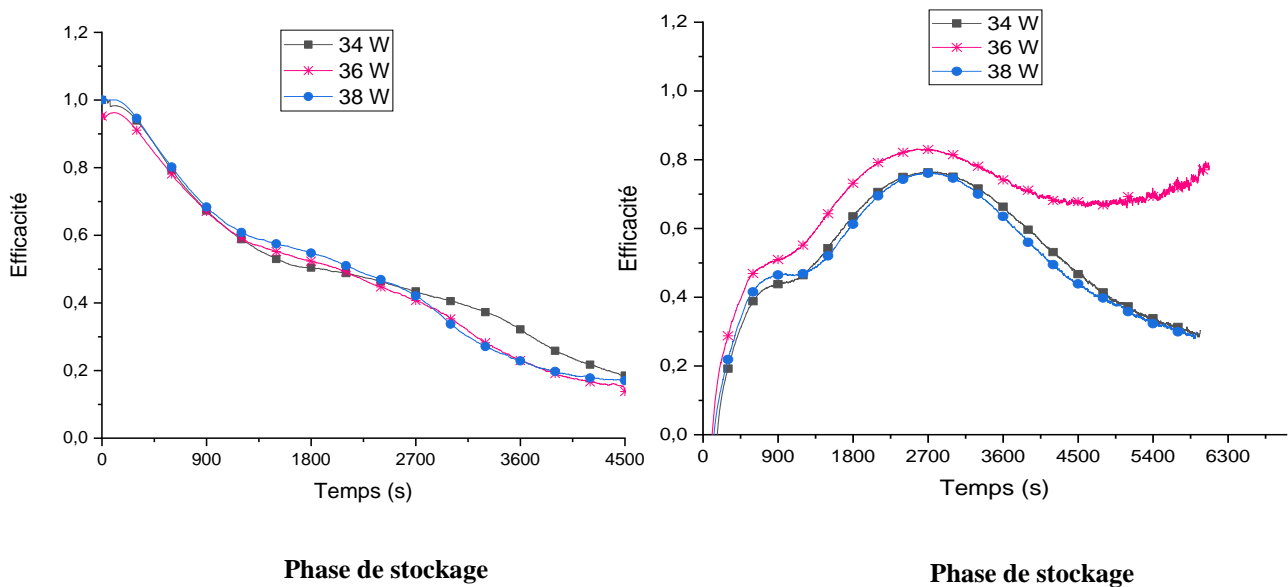


Fig. 4. 14. Evolution temporelle de l'efficacité pour différentes puissances et un débit de 0,4002 kg/min durant la phase de stockage et de déstockage

La Fig.4.14 représente l'effet de la puissance sur l'évolution de l'efficacité pour un débit de 0,4002 kg/min. Au début de la phase de stockage, l'efficacité est d'environ 99 ; 95 et 98 % respectivement pour 34, 36 et 38 W. Ensuite, elle diminue jusqu'à la fin de la phase pour atteindre 18, 14 et 17 %. La puissance de 34 W assure une efficacité moyenne de 50,5 %. Son augmentation de 5,8 et 11,8 % diminue l'efficacité moyenne du stockeur de 46,4 et 49 %.

Durant la phase de déstockage, l'efficacité augmente et atteint un maximum de 76, 83 et 75 % à l'instant 2672, 2604 et 2702 s respectivement pour 34, 36 et 38 W. L'efficacité diminue pour atteindre environ 29 % pour 34 et 38 W et 78 % pour 36 W. En terme d'efficacité moyenne, le stockeur enregistre 47,2, 65,7 et 49,8 % respectivement pour 34, 36 et 38 W.

Les résultats montrent que, une puissance thermique de 36 W offre une meilleure efficacité thermique et que l'échangeur atteint ces limites de performances.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail porte sur l'étude expérimentale du phénomène de stockage et de déstockage de l'énergie thermique par chaleur latente. Le stockeur est réalisé dans le laboratoire de recherche «Energétique et Thermique Appliquée ETAP» de notre université. Les expériences traitent l'effet de la puissance thermique fournie et du débit massique du fluide caloporteur traversant l'unité de stockage. Les conclusions suivantes peuvent être tirées des résultats

- Pendant le processus de stockage, la fusion se développe selon deux phénomènes. Le premier 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.
- Au cours du processus de décharge, 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.
- En s'éloignant de l'entrée, la température de l'échangeur diminue entraînant avec elle la diminution de sa chaleur stockée. Le premier échangeur E1 est exposé directement à l'air chaud/froid, alors il subit un chauffage/refroidissement plus rapide (de la chaleur stockée/déstockée) que les 2 autres échangeurs.
- Le faible débit massique prolonge considérablement la phase de déstockage, tandis que les débits massiques élevés accélèrent la quantité d'énergie libérée.
- L'augmentation du débit massique de 133 et 178 % avance le processus du début de fusion en moyenne de 27 et 41 % durant la phase de stockage et accélère le processus de solidification en moyenne de 65 et 70 % durant la phase de déstockage. En effet, l'augmentation du débit entraîne l'augmentation de l'intensité de chauffage de l'unité de stockage.

Conclusion général

- L'augmentation de la puissance de 5,8 et 11,8 %, retarde le démarrage de la solidification en moyenne de 182 et 293 % durant la phase de déstockage.
- Durant la phase de stockage l'efficacité augmente avec la diminution du débit d'air.
- Les expériences montrent qu'une puissance de 36 W offre une meilleure efficacité et donc un fonctionnement optimal de l'unité de stockage.
- L'augmentation de la puissance augmente la quantité d'énergie stockée, alors que, l'augmentation du débit augmente la quantité d'énergie transférée dans l'air.
- Finalement, un fonctionnement optimal d'un stockeur thermique par chaleur latente type air nécessite d'optimiser la puissance thermique fournie en terme de stockage et le débit massique du fluide caloporteur en terme de déstockage.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] **B. Zalba, J. M. Marín, L. F. Cabeza, et H. Mehling**, “ Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications “, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 23, no 3, p. 251–283, 2003.
- [2] **S. Mat, A. A. Al-Abidi, K. Sopian, M. Y. Sulaiman et A. T. Mohammad** “Enhance heat transfer for PCM melting in triplex tube with internal&external fins” *Energy Conversion and Management* 74 223-36, 2013.
- [3] **M.Martinelli**, Thèse pour obtenir le grade de docteur de la communauté université Grenoble alpes spécialité mécanique des fluides, énergétiques et **réparée au sein du CEA / LITEN** à Grenoble dans l'École Doctorale I-MEP, « Stockage d'énergie thermique par changement de phase –Application aux réseaux de chaleur soutenue publiquement » le 5-12-2016.
- [4] **A. Korti, F.Tlemsani.** ” Etude expérimental du stockage thermique par chaleur latent en utilisant les matériaux à changement de phase ”, vol. 5, p. 177–186, 2016.
- [5] **A. Korti et G. Guellil** , *Journal of Energy Storage* 32 journal home page: www.elsevier.com/locate/est « Effet de l'orientation de la surface chauffante d'une cavité carrée sur la fusion de la paraffine » , 11-12, 2020.
- [6] **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.
- [7] **E. Assis, L. Katsman, G. Ziskind , R. Letan,**" Numerical and experimental study of melting in a spherical shell" , *International Journal of Heat and Mass Transfer* Vol.50, 2007.
- [8] **M. Liu, W. Saman, et F. Bruno**, « Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no 4, p. 2118-2132, mai 2012.
- [9] **J. H. Booa, S.K. Leeband J.K. Kimc**, ”Numerical Analysis of a Thermal Storage System with Inserted Heat Pipes for Medium-High Temperature Range”, Korea Aerospace University, Goyang, 412-791, Korea, Environment Technology Research Center, Chung HoNais, Bucheon, 420-800, Korea, 10th IHPS, Taipei, Taiwan, Nov. 6-9, 2011.

Références bibliographiques

- [10] **A. Pasupathy, L. Athanasius, R. Velraj, RV Seeniraj.** "Experimental investigation and numerical simulation analysis on the thermal performance of a building roof incorporating phase change material (PCM) for thermal management", 556–65, 2008.
- [11] **A. Pasupathy, R. Velraj.** Effect of double layer phase change material in building roof for year-round thermal management, *Energy Build* 40, 193–203, 2008.
- [12] **M.N.A. Hawlader, M.S. Uddin, M.M. Khin,** "Microencapsulated PCM thermal energy storage system", *Applied Energy*, 74 , 195-202, 2003.
- [13] **D .Djefel, S .Makhlouf, S .Khedache, G .Lefebvre, L .Royon,** 2 ème conference international des énergies renouvelables cier-2014 international journal of scientific research and engineering technology " propriétés thermiques d'un biocomposite paraffine / farine de grignon d'olives comme nouveau materiau a changement de phase " vol.3- P- 3, 2015.
- [14] **M. M. Kenisarin,** « High-temperature phase change materials for thermal energy storage », *Renew. Sustain. Energy Rev*, vol. 14, no 3, p.955-970, avr-2010.
- [15] Ahmad. M., "Nouveaux Composants Actifs pour la Gestion Energétique de L'Enveloppe Legere des Batiments," Ph.D. Thesis, Universite Joseph Fourier, Nov - 2004.
- [16] **Bal et al.** « Contribution à l'étude des performances d'un séchoir serre avec stockage de chaleur dans des matériaux à changement de phase ». 2010.
- [17] **Goswami et al,** "A feasibility study of a solar desiccant air-conditioning system Part II: Transient simulation and economics ». 1999
- [18] **H. Mehling et L.F.Cabeza,** "Heat and cold storage with PCM", Springer - Verlag Berlin Heidelberg end 2008.
- [19] **E. Oro, A. Gil, A. de Gracia, D. Boer, et L. F. Cabeza,** "Comparative life cycle assessment of thermal energy storage systems for solar power plants", *Renewable Energy*, vol. 44, pp. 166-173, 2012.
- [20] **A. Gil, M. Medrano, I. Martorell, A. Lazaro, P. Dolado, B. Zalba, et L. F. 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*, vol.14, no.1, pp31-55, 2010.

Références bibliographiques

- [21] **M. Medrano, A. Gil, I. Martorell, X. Potau, et L. F. Cabeza**, "State of the art on hightemperature thermal energy storage for power generation. Part 2-Case studies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 1, pp. 56-72, 2010
- [22] **G. Abbassi**, " Etude numérique des transferts de chaleur et de masse lors de la fusion d'un matériau à changement de phase", Université Mohamed Larbi Ben M'hidi, Oum El bouaghi, spécialité- sciences et des sciences appliquées, 2018.
- [23] **A. Akrouche**, « étude du stockage et déstockage dans un matériau à changement de phase », Université M'Hamed BOUGARA, BOUMEDES 29-10-2011.
- [24] **J.Patry**, "stockage par chaleur latente, PYCedition, solvay,pour le stockage thermique a base temperature,casotherm 281
- [25] **J. Gasia, A. Gutierrez, G. Peiro, L. Miro, M. Grageda, S. Ushak, et L. F. Cabeza**, "Thermal performance evaluation of bischofite at pilot plant scale", *Applied Energy*, vol. 155, pp.826-833, Oct.2015
- [26] **M. M. Farid, A. M. Khudhair, S. A. Razack, et S. Al-Hallaj**, "A review on phase change energy storage: materials and applications", *Energy Conversion and Management*, vol. 45, no. 9–10, pp. 1597-1615, June, 2004.
- [27] **K. Pielichowska et K. Pielichowski**, "Phase change materials for thermal energy storage", *Progress in Materials Science*, vol. 65, no. 0, pp. 67-123, Aug, 2014.
- [28] **Y. Yuan, N. Zhang, W. Tao, X. Cao, et Y. He**, "Fatty acids as phase change materials: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pp. 482-498, Jan.2014.
- [29] **K. Muraishi, Y. Suzuki, et A. Kikuchi**, "Kinetics of the thermal decomposition of dicarboxylic acids", *Thermochimica Acta*, vol. 239, no. 0, pp. 51-59, July, 1994.
- [30] **S. Newsletter**, "Sugar Alcohol based Materials for Seasonal Storage Applications", 2015.
- [31] **A. Kaizawa, N. Maruoka, A. Kawai, H. Kamano, T. Jozuka, T. Senda, et T. Akiyama**, "Thermo physical and heat transfer properties of phase change material candidate for waste heat transportation system", *Heat Mass Transfer*, vol. 44, no. 7, pp. 763-769, 2008.

[32] **A. Gil, C. Barreneche, P. Moreno, C. Solé, A. Inés Fernandez, et L. F. Cabeza**, "Thermal behavior of d-mannitol when used as PCM: Comparison of results obtained by DSC and in a thermal energy storage unit at pilot plant scale", *Applied Energy*, vol.111, pp.1107-1113, Nov.2013.

[33] **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, no. 2, pp. 318-345, Feb.2009.

[34] **F. Roget, C. Favotto, et J. Rogez**, "Study of the KNO₃-LiNO₃ and KNO₃-NaNO₃- LiNO₃ eutectics as phase change materials for thermal storage in a low-temperature solar power plant", *Sol. Energy*, vol. 95, no. 0, pp. 155-169, Sept.2013.

[35] **G. Diarce, I. Gandarias, A. Campos-Celador, A. Garcia-Romero, et U. J. Griesser**, "Eutectic mixtures of sugar alcohols for thermal energy storage in the 50–90 temperature range", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 134, pp. 215-226, Mar.2015

[36] **A. GONTARD, K. GRYSKA, L. LALLEMAND** « Amélioration de la conductivité thermique de matériau à changement de phase », Université de Pau des pays de l'Adour 2012.

[37] **A. Felix Regin et al.** Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* . pp. 2438–2458.

[38] **Rosario et al.** Système de stockage et transfert d'énergie par chaleur latente adaptable au rafraîchissement d'air en bâtiments: Conception et analyse thermique. Ecole doctorale sciences physique et de l'ingénieur, spécialité : mécanique. 2018.

[39] **A. Sari, A. Karaipekli**, Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage characteristics of paraffin/expanded graphite composite as phase change material, *Appl. Therm. Eng.* 1271–1277, 2007.

[40] **F Kuznik, D David, K Johannes, J. J Roux**, A review on phase change materials integrated in building walls. *Renewable and Sustainable Reviews* 379-391, 2010.

Références bibliographiques

[41] **F. Topin** , "Cours de l'IUSTI, Polytech Marseille : Introduction aux transferts en milieux hétérogènes -2", <http://iusti.polytech.univ-mrs.fr/~topin/enseignement.html>, 27/4/2016.

[42] **J. Yang, L. Yang, C. Xu et X. Du** "Experimental study on enhancement of thermal energy storage with phase-change material" *Applied Energy* 169 164-76, 2016.

[43] « Logiciel de conception de systèmes LabVIEW » [archive], sur developpez.com, 30 juin 2005 , consulté le 23-05- 2021.

[44] **H. Guellil, A. Kortil et S. Abboudi**, *Heat and Mass Transfer* <https://doi.org/10.1007/s00231-018-2462-8> "Experimental study of the performance of a novel latent heat charging unit on charging and discharging processes", 23-08-2018.

[45] **P.DAC**, https://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user3775/documents/Ouvrages/Padet_Ech_Thermiques/Chapitres%203.pdf