



Faculty of Sciences and Technology
Department of Mechanical Engineering

كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم المهندسة الميكانيكية

N° d'ordre : M...../GM/2024

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Thème

ÉTUDE EXPERIMENTALE SUR L'EFFICACITE D'UN ECHANGEUR DE CHALEUR
COMPACT A TUBES SPIRALES A AILETTES REMPLI DE MATERIAU A
CHANGEMENT DE PHASE POUR LE STOCKAGE D'ENERGIE THERMIQUE

Présenté par :

- ❖ MAATALLAH Abdelhak Zakaria
- ❖ BENGRIRA Hayet

Soutenu le 24/06/2024 devant le jury composé de :

Président	Dr. FLITTI Abdelmadjid	Université de Mostaganem UMAB
Examineur	Dr. KHALDI Abdelaziz	Université de Mostaganem UMAB
Encadreur	Dr. MEDJAHED Bendida	Université de Mostaganem UMAB

Année Universitaire : 2023 / 2024

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre 02:

Figure 2.1 : Diagramme de la température du MCP en fonction du contenu énergétique	09
Figure 2.2 : Classification des MCP	10
Figure 2.3 : Récipients contenant sang et des organes qui contiennent MCP	13

Chapitre 03:

Figure 3.1 : Plant d'essai	16
Figure 3.2 : Matériel et accessoires de l'installation : a) Débitmètre, b) isolant, c) Capteurs des températures, d) Régulateur de résistance et capteurs des température (Tin, Tout) e) Réservoir de l'eau chaude et f) Réservoir de l'eau froide	17
Figure 3.3 : Soudage des tubes en cuivre.	18
Figure 3.4 : a) Tube spirale, b) Cage en plexiglas.	18
Figure 3.5 : Remplissages de MCP	19
Figure 3.7 : Section d'essai remplie de la cire d'abeille.et le mélange	19

Chapitre 04:

Figure 4.1 : Schéma de protocoles expérimentale pendant les processus de charge et de décharge.	21
Figure 4.2 : Configurations d'injection possibles durant les essais (Sections d'essai rempli de la cire d'abeille).	22
Figure 4.3 : Respectabilité des résultats expérimentaux : (a) profil de température MCP (Cire d'abeille) ; (b) températures d'entrée et de sortie d'eau.	25-26
Figure 4.4 : Profils de température du processus de fusion pour des débits de HTF: 1) 40 L/h, 2) 50 L/h, 3) 65 L/h, 4) 90 L/h et 5) 100 L/h (Cire d'abeille).	27-28

Liste des figures

Figure 4.5 : Profils de température du processus de solidification pour des débits de HTF: 1) 40 L/h, 2) 50 L/h, 3) 65 L/h, 4) 90 L/h et 5) 100 L/h (Cire d'abeille).	29-30
Figure 4.6 : Débit de stockage de chaleur pour les débits HTF 40 L/h, 50 L/h, 65 L/h, 90 L/h et 100 L/h (Cire d'abeille).	31
Figure 4.7: Temps de charge totale du LHTESS sous divers paramètres opérationnels (Cire d'abeille).	32
Figure 4.8: Efficacité des processus de charge et de décharge (Cire d'abeille).	33
Figure 4.9: Profils de température du processus de fusion pour des débits de HTF (mélange de MCP): 1) 40 L/h, 2) 50 L/h, 3) 65 L/h, 4) 90 L/h et 5) 100 L/h.	34-35
Figure 4.10: Profils de température du processus de solidification pour des débits de HTF (mélange de MCP): 1) 40 L/h, 2) 50 L/h, 3) 65 L/h, 4) 90 L/h et 5) 100 L/h.	36
Figure 4.11: Débit de stockage de chaleur pour les débits HTF (mélange de MCP) : 40 L/h, 50 L/h, 65 L/h, 90 L/h et 100 L/h.	37
Figure 4.12: Temps de charge totale du LHTESS sous divers paramètres opérationnels (mélange de MCP).	38
Figure 4.13: Efficacité des processus de charge et de décharge (mélange de MCP).	39
Figure 4.14: Comparaison des temps total de charge et de décharge du LHTESS pour différentes configurations à $T_{in} = 80^{\circ}\text{C}$.	40
Figure 4.15: Comparaison l'efficacité des processus de charge et de décharge du LHTESS pour différentes configurations à $T_{in} = 80^{\circ}\text{C}$.	41

Remerciement

Nous remercions le bon Dieu pour le courage qu'il nous a donné pour surmonter toutes les difficultés durant nos années d'études.

*Nous tenons à remercier notre encadreur le **Dr. MEDJAHED Bendida** pour ces conseils et son suivi continu durant toute la période de la réalisation de ce travail.*

*Nous adressons nos remerciements à Monsieur le Président de jury **Dr. FLITTI Abdelmadjid** et le membre de jury **Dr. KHALDI Abdelaziz** pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail de l'enrichir par leurs propositions.*

Enfin, nous adressons nos vives reconnaissances à toutes les personnes qui ont contribué de prêt ou de loin pour la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

*Ce travail est dédié à toute ma famille ;
Surtout à mon père, ma mère, mes frères et aussi mes grands-parents
paternels et maternels.
Dédicace aussi à mes amis et à tous les gens qui sont proches de moi.*

GOUAL OMAR ELFAROUK

Dédicace

*Ce travail est dédié à toute ma famille ;
Surtout à mon père, ma mère, mes frères et ma femme et mais enfants
aussi mes grands-parents paternels et maternels.
Dédicace aussi à mes amis et à tous les gens qui m'ont aidé*

CHAIB SAID

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre 02:

Figure 2.1 : Diagramme de la température du MCP en fonction du contenu énergétique	09
Figure 2.2 : Classification des MCP	10
Figure 2.3 : Récipients contenant sang et des organes qui contiennent MCP	13

Chapitre 03:

Figure 3.1 : Plant d'essai	16
Figure 3.2 : Matériel et accessoires de l'installation : a) Débitmètre, b) isolant, c) Capteurs des températures, d) Régulateur de résistance et capteurs des température (Tin, Tout) e) Réservoir de l'eau chaude et f) Réservoir de l'eau froide	17
Figure 3.3 : Soudage des tubes en cuivre.	18
Figure 3.4 : a) Tube spirale, b) Cage en plexiglas.	18
Figure 3.5 : Remplissages de MCP	19
Figure 3.7 : Section d'essai remplie de la cire d'abeille.et le mélange	19

Chapitre 04:

Figure 4.1 : Schéma de protocoles expérimentale pendant les processus de charge et de décharge.	21
Figure 4.2 : Configurations d'injection possibles durant les essais (Sections d'essai rempli de la cire d'abeille).	22
Figure 4.3 : Respectabilité des résultats expérimentaux : (a) profil de température MCP (Cire d'abeille) ; (b) températures d'entrée et de sortie d'eau.	25
Figure 4.4 : Profils de température du processus de fusion pour des débits de HTF: 1) 40 L/h, 2) 50 L/h, 3) 65 L/h, 4) 90 L/h et 5) 100 L/h (Cire d'abeille).	27

Liste des figures

Figure 4.5 : Profils de température du processus de solidification pour des débits de HTF: 1) 40 L/h, 2) 50 L/h, 3) 65 L/h, 4) 90 L/h et 5) 100 L/h (Cire d'abeille).	29
Figure 4.6 : Débit de stockage de chaleur pour les débits HTF 40 L/h, 50 L/h, 65 L/h, 90 L/h et 100 L/h (Cire d'abeille).	30
Figure 4.7: Temps de charge totale du LHTESS sous divers paramètres opérationnels (Cire d'abeille).	31
Figure 4.8: Efficacité des processus de charge et de décharge (Cire d'abeille).	32
Figure 4.9: Profils de température du processus de fusion pour des débits de HTF (mélange de MCP): 1) 40 L/h, 2) 50 L/h, 3) 65 L/h, 4) 90 L/h et 5) 100 L/h.	34
Figure 4.10: Profils de température du processus de solidification pour des débits de HTF (mélange de MCP): 1) 40 L/h, 2) 50 L/h, 3) 65 L/h, 4) 90 L/h et 5) 100 L/h.	35
Figure 4.11: Débit de stockage de chaleur pour les débits HTF (mélange de MCP) : 40 L/h, 50 L/h, 65 L/h, 90 L/h et 100 L/h.	36
Figure 4.12: Temps de charge totale du LHTESS sous divers paramètres opérationnels (mélange de MCP).	37
Figure 4.13: Efficacité des processus de charge et de décharge (mélange de MCP).	38
Figure 4.14: Comparaison des temps total de charge et de décharge du LHTESS pour différentes configurations à $T_{in} = 80^{\circ}\text{C}$.	40
Figure 4.15: Comparaison l'efficacité des processus de charge et de décharge du LHTESS pour différentes configurations à $T_{in} = 80^{\circ}\text{C}$.	41

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre 04:

Tableau 4.1 : Propriétés thermiques des MCP utilisés.	22
Tableau 4.2 : Comparaison des débits, des nombres de Reynolds correspondants et des taux moyens de stockage de chaleur pour différents tests (Cire d'abeille).	33
Tableau 4.3 : Comparaison des débits, des nombres de Reynolds correspondants et des taux moyens de stockage de chaleur pour différents tests de mélange de MCP.	39

NOMENCLATURE :

SYMBOLES	UNITES	DESIGNATION
Q_v	[l/h]	Débit volumique
T	[°C]	Température
Q	[W]	Flux de chaleur
S	[m ²]	Surface d'échange
D	[m]	Diamètre
L Longueur	[m]	Longueur
A sections de passage	[m ²]	sections de passage
a	[m]	Longueur de la cage
b	[m]	Largeur de la cage
l	[m]	Hauteur de la cage
v	[m ³]	Volume de MCP
m	[Kg]	Masse de MCP
t	[s]	Temps
C_p	[J/Kg °C]	Chaleur Spécifique du fluide
λ	[W/m °C]	Conductivité thermique
ρ	[Kg/m ³]	Masse Volumique
μ	[Pa .S]	Viscosité Dynamique du fluide

NDICE

in	fluide d'entrée
out	fluide sortie
c	chaude
f	froide
i	interne

ex

externe

moy

moyenne

1, 2, 3,4 et 5

Position du capteur de MCP

ABREVIATIONS

HTF

Fluide caloporteur

LHS

Stockage de chaleur latente

MCP

Matériau à changement de phase

SDHW

Eau chaude sanitaire solaire

Étude expérimentale sur l'efficacité d'un échangeur de chaleur compact à tubes spiralés à ailettes rempli de matériau à changement de phase pour le stockage d'énergie thermique

Résumé :

Dans cette étude expérimentale, un système de stockage d'énergie par chaleur latente utilisant une technique d'amélioration du transfert de chaleur a été construit et testé. Le potentiel d'utilisation d'un matériau à changement de phase naturel, provenant d'Algérie, pour le stockage d'énergie a été étudié par analyse expérimentale. La caractérisation thermique expérimentale lors des phases de chargement et de déchargement d'un prototype compact de système de stockage d'énergie thermique à chaleur latente, équipé d'un échangeur de chaleur en cuivre à tubes multiples avec ailettes orientées horizontalement, est présentée. La cire d'abeille est considérée comme un matériau naturel de stockage de chaleur latente, et le mélange de cire d'abeille et de paraffine est considéré comme un matériau eutectique de stockage de chaleur latente. Pour effectuer l'analyse des performances de ce système innovant, des expériences de chargement et de déchargement ont été menées à différents débits de fluide caloporteur (40 l/h , 50 l/h, 65 l/h, 90 l/h, 100 l/h), la température d'entrée étant fixée à 80 °C pendant le processus de chargement, l'augmentation du débit de 40 à 100 L/h l'efficacité de l'échangeur de chaleur elle est réduit de 0,9168 à 0,6297 pour la cire d'abeille et pour le mélange de la cire d'abeille et le paraffine elle est réduit de 0,91 à 0,62.

Ainsi nous avons constaté de même, l'augmentation du débit de 40 à 100 L/h pendant le processus de déchargement réduit l'efficacité de l'échangeur de chaleur de 0,9319 à 0,658 pour la cire d'abeille et pour le mélange de 0,93 à 0,65.

Mots clés : Stockage d'énergie thermique, tubes spiralés avec ailettes, MCP, La cire d'abeille, paraffine, efficacité.

Experimental Study on the Effectiveness of a Compact Finned Spiral Tube Heat Exchanger Filled with Phase Change Material for Thermal Energy Storage

Abstract :

In this experimental study, a latent heat energy storage system using heat transfer enhancement technique was constructed and tested. The potential of using a natural phase change material, from Algeria, for energy storage was studied by experimental analysis. Experimental thermal characterization during the loading and unloading phases of a compact prototype latent heat thermal energy storage system, equipped with a multi-tube copper heat exchanger with horizontally oriented fins, is presented. Beeswax is considered a natural latent heat storage material, and the mixture of beeswax and paraffin is considered a eutectic latent heat storage material. To analyze the performance of this innovative system, loading and unloading experiments were carried out at different heat transfer fluid flow rates (40 l/h, 50 l/h, 65 l/h, 90 l/h, 100 l/h), the inlet temperature being fixed at 80 °C during the loading process, increasing the flow rate from 40 to 100 L/h the efficiency of the heat exchanger it is reduced from 0.9168 to 0.6297 for beeswax and for the mixture of beeswax and paraffin it is reduced from 0.91 to 0.62. Thus we similarly observed, increasing the flow rate from 40 to 100 L/h during the unloading process reduces the efficiency of the heat exchanger from 0.9319 to 0.658 for the beeswax and for the mixture from 0.93 to 0.65.

Keywords: Thermal energy storage, spiral tubes with fins, MCP, Beeswax, paraffin, Temperature, efficiency.

دراسة تجريبية حول فعالية مبادل حراري ذو أنبوب حلزوني ذو زعانف مدمج ومملوء بمادة متغيرة الطور لتخزين الطاقة الحرارية

ملخص:

في هذه الدراسة التجريبية، تم بناء واختبار نظام تخزين الطاقة الحرارية الكامنة باستخدام تقنية تعزيز نقل الحرارة. تمت دراسة إمكانية استخدام مادة تغير الطور الطبيعي من الجزائر لتخزين الطاقة من خلال التحليل التجريبي. تم تقديم التوصيف الحراري التجريبي أثناء مرحلتي التحميل والتفريغ لنموذج أولي مدمج لنظام تخزين الطاقة الحرارية للحرارة الكامنة، المجهز بمبادل حراري نحاسي متعدد الأنابيب مع زعانف موجهة أفقيًا. يعتبر شمع العسل مادة طبيعية كامنة لتخزين الحرارة، ويعتبر خليط شمع العسل والبارافين مادة سهلة التخزين للحرارة الكامنة. لتحليل أداء هذا النظام المبتكر، تم إجراء تجارب التحميل والتفريغ بمعدلات تدفق مختلفة لسائل نقل الحرارة (40 لتر/ساعة، 50 لتر/ساعة، 65 لتر/ساعة، 90 لتر/ساعة، 100 لتر/ساعة)، يتم تثبيت درجة حرارة المدخل عند 80 درجة مئوية أثناء عملية التحميل، مما يؤدي إلى زيادة معدل التدفق من 40 إلى 100 لتر / ساعة. كما تنخفض كفاءة المبادل الحراري من 0.9168 إلى 0.6297 بالنسبة لشمع العسل وخليط شمع العسل والبارافين. تم تخفيضه من 0.91 إلى 0.62. وهكذا لاحظنا بالمثل أن زيادة معدل التدفق من 40 إلى 100 لتر/ساعة أثناء عملية التفريغ يقلل من كفاءة المبادل الحراري من 0.9319 إلى 0.658 لشمع العسل وللخليط من 0.93 إلى 0.65.

الكلمات المفتاحية: تخزين الطاقة الحرارية، الأنابيب الحلزونية ذات الزعانف، MCP، شمع العسل، البارافين، درجة الحرارة، الكفاءة.

Introduction générale:

Introduction générale:

Dans le cadre de ce travail de recherche, nous proposons une solution innovante pour l'économie d'énergie dans le secteur industriel, visant à réduire la consommation énergétique grâce à l'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP). Ces matériaux sont particulièrement efficaces pour augmenter la capacité de stockage thermique des échangeurs de chaleur industriels. Les MCP se distinguent par leur capacité à stocker et à libérer une grande quantité d'énergie thermique de manière isotherme lors de leur changement de phase. L'objectif principal de cette étude est de démontrer comment l'intégration des MCP dans les échangeurs de chaleur peut améliorer significativement leur performance thermique. En se basant sur la propriété des MCP de stocker la chaleur par voie latente, ces matériaux permettent de protéger et d'isoler thermiquement les infrastructures industrielles contre les variations de température extérieure. Cette recherche présente une étude expérimentale approfondie du transfert de chaleur lors du changement de phase à l'intérieur d'un système de stockage de chaleur latente. Le système étudié est constitué d'un tube spiralé avec des ailettes, choisi pour sa configuration compacte et sa capacité à augmenter la surface de transfert de chaleur externe. Cette conception permet une meilleure efficacité thermique en maximisant la surface d'échange. Pour réaliser cette étude, une installation expérimentale a été construite. Cette installation permet de mener des tests de charge et de décharge de chaleur, en utilisant de l'eau comme fluide caloporteur. Les tests de fusion sont effectués avec une entrée d'eau à une température stable fixée de 80 °C, tandis que les tests de solidification sont réalisés à température ambiante. Les différents débits d'eau sont variés pour observer leur impact sur la performance du système de stockage de chaleur. Nous anticipons que l'intégration des MCP dans les échangeurs de chaleur conduira à une amélioration notable de la capacité de stockage thermique et de l'efficacité énergétique globale du système. Les résultats de cette étude expérimentale devraient fournir des insights précieux sur les performances thermiques des MCP et sur les meilleures pratiques pour leur intégration dans les systèmes de stockage de chaleur industrielle.

Le contexte et les résultats de cette étude sont présentés ici en détails. Le premier chapitre a été réservé à la présentation de l'étude bibliographique. Une généralité sur le stockage d'énergie et les matériaux à changement de phase (MCP) est présentée dans le deuxième chapitre. Une procédure expérimentale détaillée sur la réalisation d'un banc d'essai est

Introduction générale:

présentée dans le troisième chapitre. Le quatrième chapitre a été réservé sur la présentation des résultats expérimentale et les discussions. Une conclusion générale est donnée à la fin de ce document.

Chapitre 01 : Étude bibliographique

1. Étude bibliographique

L'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) comme matériaux de stockage d'énergie a attiré l'attention de diverses industries et chercheurs. La propriété de transition solide-liquide des MCP peut être exploitée dans de nombreuses applications industrielles en tant que moyen de stockage d'énergie [1]. Une application des MCP est dans une usine pharmaceutique, où la chaleur de l'eau résiduelle industrielle (IRW) est utilisée dans le système de chauffage de l'atelier [2]. Harikrishanan et al. ont mené une étude expérimentale sur les caractéristiques de solidification et de fusion d'un nouveau nanofluide. Ils ont constaté que le temps nécessaire pour les processus de fusion et de solidification complets des MCP composites était inférieur à celui des MCP de base [3]. Les recherches sur les performances thermiques et la résistance structurelle des échantillons de mortier intégrant des MCP micro encapsulés sont nombreuses, et de plus en plus d'études se concentrent sur les performances thermiques dynamiques réelles, même dans des expériences à petite échelle dans des bâtiments réels. Dans la plupart des recherches actuelles, le MCP est uniformément réparti dans le mélange de mortier. Cependant, la position et la distribution du MCP dans la structure du ciment représentent également un sujet intéressant et significatif [4].

Li et al. ont développé deux types de panneaux muraux intégrant des MCP : hybrides et multicouches, en utilisant des matériaux à changement de phase avec des températures de transition différentes. Par rapport aux panneaux passifs, le panneau mural multicouche avec MCP s'est montré plus efficace pour retarder le transfert de chaleur et libérer de la chaleur [4]. Li et al. ont également examiné l'effet des différentes positions de la couche de MCP dans le mur. Ils ont constaté que lorsque le MCP était installé plus près de la surface extérieure, la réduction du transfert de chaleur était plus significative [4].

Ismail et al. ont étudié théoriquement et expérimentalement le processus de solidification autour d'un tube vertical équipé d'ailettes longitudinales et traversé par un fluide caloporteur [5]. Velraj et al. ont réalisé une analyse expérimentale et une modélisation numérique du processus de solidification d'un MCP à l'intérieur d'un tube vertical avec des ailettes internes lorsque le tube était refroidi de l'extérieur. Les résultats expérimentaux ont montré que lorsque le nombre d'ailettes dépassait quatre, les ailettes pouvaient avoir des hauteurs différentes. Certaines ailettes pouvaient être limitées à une hauteur égale à la moitié du rayon du tube [5]. Tayeb a mené la première expérience qualitative visant à augmenter la conductivité thermique effective d'un matériau à changement de phase (MCP) latent tel que la

Chapitre 01 : Étude bibliographique

cire de paraffine, en y incorporant des scories et des copeaux métalliques. Il a été observé que la conductivité effective pendant le processus de solidification était de $0,5 \text{ W/mK}$, ce qui est inférieur à la moitié de sa valeur au début de l'expérience [5]. Une des premières tentatives d'utilisation du MCP pour le chauffage solaire a été réalisée par Telkes et al. à Dover (USA). Cette maison de plain-pied composée de cinq pièces, dont deux chambres, a fonctionné avec succès pendant deux ans, fournissant une température confortable de 21 °C sans système de chauffage d'appoint. Cependant, l'expérience a échoué en raison de la décomposition du sel, et à l'époque, la méthode pour résoudre ce problème avec les MCP n'était pas encore développée [5].

Un programme de simulation basé sur les modèles de Morrison et al. a été utilisé pour mener une étude théorique du système de chauffage solaire utilisant des MCP pour le stockage de l'énergie thermique (SET). Les résultats ont montré que les matériaux à changement de phase, tels que le chlorure de calcium hexahydraté ou le sulfate de sodium décahydraté, pouvaient être utilisés efficacement pour le stockage de l'énergie thermique, en particulier dans un système de pompe à chaleur solaire pour le chauffage domestique [5].

Kern et al. ont utilisé 1650 kg de $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dans des conteneurs aérosols pesant chacun $0,74 \text{ kg}$ pour étudier les possibilités de stockage d'énergie à l'intérieur et à l'extérieur d'une serre de 36 m^2 au sol, recouverte de fibre de verre enduite de résine. La chaleur emmagasinée a été utilisée pendant les heures de faible ensoleillement pour maintenir la température souhaitée dans la serre. Le $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ a été utilisé comme matériau de stockage MCP dans cette serre [5].

Nishina et al. ont utilisé le $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ avec certains additifs pour empêcher la séparation des phases et la dégradation pour chauffer une serre au Japon. Ils ont conclu que 40 à 60 % du potentiel de chaleur latente du MCP était exploité, ce qui indiquait que près de la moitié du MCP n'était pas utilisée efficacement pendant les processus d'échange d'énergie [5].

Takakura et al. ont testé le polyéthylène glycol et le $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ comme MCP dans le chauffage d'une serre de $7,2 \text{ m}^2$ de surface au sol [5]. Ils ont comparé les serres conventionnelles avec des serres utilisant le stockage MCP. L'efficacité de la serre avec

Chapitre 01 : Étude bibliographique

stockage MCP intégré au capteur solaire était de 59 %, capable de maintenir une température de 8 °C à l'intérieur de la serre la nuit, lorsque la température extérieure chutait à 0,6 °C. Un système de contrôle par micro-ordinateur a été développé pour établir un contrôle plus précis et sophistiqué des systèmes de serres solaires [5].

Les matériaux à changement de phase (MCP) peuvent être utilisés dans les bâtiments pour une conservation de l'énergie active et passive. Les mesures actives de conservation de l'énergie dans les bâtiments concernent l'utilisation d'équipements consommateurs d'énergie pour réguler l'environnement intérieur et compenser les perturbations externes, telles que le chauffage, la climatisation, la ventilation et la récupération de chaleur [6].

Hirmiz et al. ont intégré un réservoir de transfert de chaleur contenant 75 % de MCP entre le système de pompe à chaleur géothermique et les radiateurs du bâtiment. L'ajout du MCP a permis de réduire la taille du réservoir de 2/3 et de résoudre le problème de l'insuffisance de la puissance calorifique de pointe des pompes à chaleur géothermiques ordinaires [6]. La masse thermique joue un rôle crucial dans la conservation de l'énergie et le contrôle thermique interne des bâtiments. Il a été observé que cette masse thermique peut être considérablement améliorée par l'incorporation d'éléments de construction avec des capacités de stockage de chaleur latente [7].

Les MCP sont utilisés dans les bâtiments pour diverses applications, notamment :

- Réduire la consommation d'énergie pour le conditionnement de l'espace ;
- Réduire et déplacer la charge thermique de pointe ;
- Contrôler la température locale dans les composants de l'enveloppe du bâtiment ou améliorer la durabilité globale du système [7].

Les trois méthodes les plus prometteuses pour intégrer les MCP sont les suivantes : l'incorporation directe ou l'imprégnation, l'immersion et l'encapsulation [8].

Les températures de fusion et de solidification des MCP varient légèrement lorsqu'ils sont incorporés dans les matériaux de construction. De plus, les MCP peuvent être utilisés sous forme de panneaux stratifiés uniques combinés avec d'autres composants de l'enveloppe du bâtiment [8].

Il existe deux méthodes d'intégration des MCP dans les bâtiments : l'intégration passive et l'intégration active. L'intégration passive consiste à incorporer les MCP dans divers éléments constitutifs d'un bâtiment tels que les planchers, les plafonds, les murs, les fenêtres et même

Chapitre 01 : Étude bibliographique

les tuiles. Les systèmes actifs sont basés sur la circulation d'un fluide caloporteur (généralement de l'air) à travers les composants d'un échangeur air-MCP via un système mécanique (ventilateur, pompe, etc.) [8].

Pendant la journée, un système de ventilation fait circuler l'air chaud du bâtiment dans un système de stockage de chaleur latente solide (SSCL) contenant des MCP solidifiés. Sous l'effet de l'absorption de chaleur de l'air, les MCP fondent lorsque la température dépasse leur point de fusion. Ensuite, l'air rafraîchi est réintroduit dans le bâtiment. Pendant la nuit, on fait circuler l'air extérieur frais, dont la température est inférieure au point de fusion du MCP, pour solidifier à nouveau les MCP [8]. Le principe est similaire, mais le processus est inversé. Pendant la journée, la chaleur est stockée en faisant circuler l'air chaud du bâtiment (provenant d'un système de chauffage, alimenté par une source d'énergie solaire ou électrique, par exemple). Pendant la nuit, le bâtiment est réchauffé en faisant circuler l'air frais de l'extérieur à travers ces échangeurs [8].

Chapitre 02 : Matériaux à changement de phase (MCP)

2. Matériaux à changement de phase (MCP)

2.1 Définition

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont des substances capables de stocker de la chaleur latente lors de leur fusion et de la restituer pendant leur solidification, tout en maintenant une température constante. Ces matériaux sont remarquables pour leur haute densité de stockage d'énergie et leur capacité à stabiliser la température en absorbant la chaleur pendant la fusion et en la libérant lors de la solidification. Cet intérêt croissant se manifeste dans la gestion thermique ainsi que dans les systèmes d'énergie solaire pour les bâtiments et les serres [11]. Les MCP ont la particularité de fondre et de se solidifier sur une large gamme de températures, ce qui les rend utiles pour diverses applications.

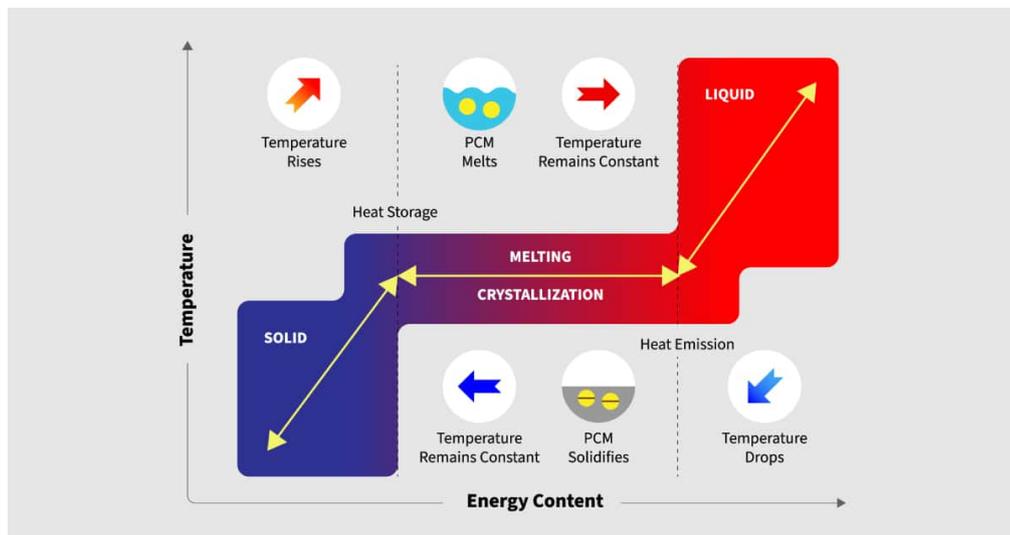


Figure 2.1 : Diagramme de la température du MCP en fonction du contenu énergétique.

2.2 Généralités sur les MCP

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont classés en fonction de leur température de fusion, de leur chaleur latente de changement de phase, et de leurs propriétés thermophysiques. Le choix d'un MCP est déterminé par son domaine d'application, ce qui nécessite de définir des critères de sélection spécifiques. La température de fusion et la plage de fusion sont les critères les plus cruciaux pour choisir le type de MCP. La plage de fusion doit correspondre à l'application envisagée, qu'il s'agisse de bâtiments, de transport, d'alimentation ou de textiles. Ces matériaux doivent également posséder une chaleur latente de fusion élevée. Pour optimiser les

Chapitre 02 : Matériaux à changement de phase (MCP)

processus de charge et de décharge, une bonne conductivité thermique est souhaitable. Les MCP sont classés en trois catégories : organiques, inorganiques et eutectiques [11].

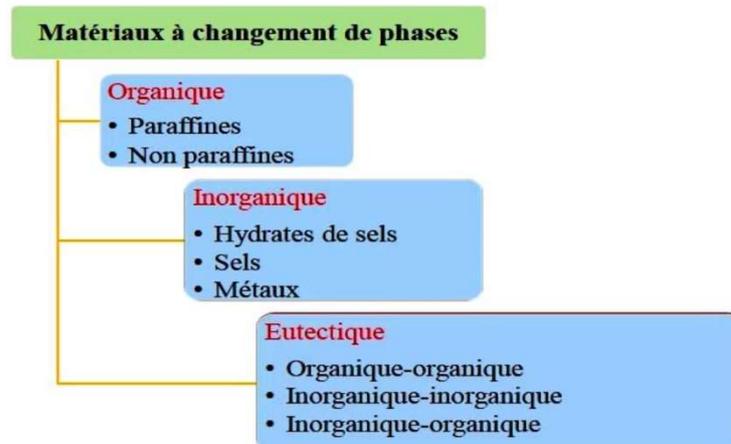


Figure 2.2: Classification des MCP [11].

2.3 MCP organiques :

Les matériaux à changement de phase (MCP) organiques se divisent en paraffines et non-paraffines. En général, les MCP organiques ne souffrent pas de ségrégation de phase et cristallisent avec peu ou pas de super-refroidissement [12]. Les paraffines, disponibles dans une large plage de températures, ont une densité d'environ 900 kg/m^3 , ce qui les rend adaptées à diverses applications au-delà des bâtiments. Leur chaleur latente, basée sur la masse, ne montre aucun signe de séparation de phase après des cycles répétés de transition solide-liquide et elles ont une faible pression de vapeur.

Les MCP non-paraffiniques incluent les acides gras, leurs esters, les alcools d'acides gras, et les glycols. Les acides gras ont des températures de fusion variant de 5 à 70°C et une chaleur latente significative allant de 45 à 210 J/g , généralement autour de 150 J/g (140 MJ/m^3). Ils peuvent supporter des milliers de cycles thermiques et chimiques (fusion/congélation) sans dégradation notable de leurs propriétés thermiques.

En résumé, les MCP organiques possèdent de nombreuses qualités les rendant adaptés à diverses applications. Cependant, de nombreux MCP organiques sont inflammables, ce qui constitue un inconvénient majeur, notamment en termes de sécurité pour les applications dans le domaine du bâtiment [12].

Chapitre 02 : Matériaux à changement de phase (MCP)

2.4 MCP Inorganique

Les matériaux à changement de phase inorganiques comprennent les hydrates de sel et les métaux. Toutefois, pour les applications dans le domaine de la construction, les métaux ne sont pas appropriés car leurs températures de fonctionnement ne correspondent pas aux plages souhaitées et ils présentent des inconvénients significatifs en termes de poids, les rendant inadaptés [12]. Les hydrates de sel sont constitués d'un alliage de sels inorganiques et d'eau et permettent un MCP rentable en raison d'une disponibilité facile et d'un faible coût. La transformation à changement de phase des hydrates de sel implique l'hydratation ou la déshydratation des sels, un processus similaire à la fusion et à la congélation typiques. Les hydrates de sel peuvent fondre en formant un hydrate avec moins d'eau ou se transformer en une forme anhydre où le sel et l'eau sont complètement séparés. Les hydrates de sel possèdent une grande capacité de stockage et opèrent une transition de phase à température ambiante. Avec une densité d'environ 1700 kg/m^3 , soit deux fois plus élevée que celle de la paraffine, et une chaleur latente maximale d'environ 200 J/g , leur stockage de chaleur par volume est d'environ 350 MJ/m^3 [12].

2.5 MCP Eutectiques

Les matériaux à changement de phase eutectiques sont des compositions de fusion minimale composées de deux ou plusieurs composants, chacun fondant et gelant de manière congruente. Lors de la phase de cristallisation, un mélange homogène de composants est formé, agissant comme un seul composant. Les composants gèlent en un mélange intime de cristaux et fondent simultanément sans séparation [12].

Les eutectiques peuvent être des mélanges organiques-organique, inorganiques-inorganique ou organiques-inorganique, offrant une grande variété de combinaisons adaptées à des applications spécifiques. Parmi les mélanges eutectiques organiques les plus couramment testés figurent ceux à base d'acides gras. Les mélanges eutectiques inorganiques les plus étudiés sont composés de divers hydrates de sel.

Chapitre 02 : Matériaux à changement de phase (MCP)

2.6 Applications des matériaux changement de phase

2.6.1 Le transport des produits alimentaires

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont employés dans divers secteurs tels que l'agroalimentaire, la pharmacie et la médecine afin de réduire les variations de température subies par les aliments, les médicaments ou les composants sensibles comme le sang lors du transport. Ces MCP se présentent généralement sous forme de sachets plastiques contenant le matériau choisi, placés le plus près possible du produit à conserver [14].

2.6.2 Le stockage d'énergie thermique

Les matériaux à changement de phase (MCP) stockent de l'énergie en passant d'un état solide à liquide (fusion), puis la libèrent en revenant à l'état liquide à solide (solidification). Le choix du MCP le plus adapté repose sur plusieurs facteurs tels que le coût, la chaleur latente et la conductivité thermique (en phase liquide et solide), entre autres. Un exemple de MCP utilisé dans ce contexte est l'acétate de sodium tri-hydraté, qui fond autour de 58 °C. Ce matériau a été utilisé dans des conteneurs transportables par camion pour stocker la chaleur récupérée des incinérateurs d'ordures ménagères. L'énergie stockée peut ensuite être récupérée à distance dans des stations équipées, à une température d'environ 50 °C [14].

2.6.3 Applications médicales

Dans le domaine médical, l'une des principales applications des MCP est le transport du sang et des organes. Les récipients utilisés pour cette tâche poursuivent des objectifs similaires à ceux expliqués précédemment. D'autres applications médicales peuvent inclure des coussins chauds ou froids utilisés pour traiter la douleur locale dans le corps.

Chapitre 02 : Matériaux à changement de phase (MCP)



Figure 2.3: Récipients contenant sang et des organes qui contiennent MCP.

2.7 Propriétés thermo physiques des matériaux changement de phase

La caractéristique thermo-physique du MCP est cruciale dans la sélection d'un MCP pour le stockage de chaleur latente. Les propriétés thermo-physiques à considérer sont les suivantes :

- Une température de changement de phase adaptée à la plage de température de fonctionnement souhaitée ;
- Une haute chaleur latente de fusion par unité de volume, permettant l'utilisation de conteneurs plus petits ;
- Une conductivité thermique élevée pour faciliter le chargement et le déchargement rapides du MCP ;
- Une haute chaleur spécifique, assurant la disponibilité d'une énergie supplémentaire sous forme de chaleur sensible pour le système de stockage d'énergie thermique ;
- Un faible changement de volume pendant la transition de phase et une faible pression de vapeur à la température de fonctionnement pour éviter les problèmes de confinement ;
- Une fusion complète du MCP pendant la transition de phase (fusion congruente) pour assurer l'homogénéité des phases solides et liquides ;
- Une fiabilité thermique (stabilité au cycle) pour une utilisation à long terme, en termes de températures de changement de phase et de chaleur latente de fusion ;
- Un bon transfert de chaleur ;
- Une pression de vapeur fiable à la température de fonctionnement ;
- Une haute densité et fusion complète ;
- Un équilibre de phase favorable et aucune ségrégation [13].

Chapitre 02 : Matériaux à changement de phase (MCP)

2.8 Propriétés thermo-physiques

Lors du choix d'un MCP pour une application spécifique, il est crucial d'adapter la température de fonctionnement du chauffage ou du refroidissement à la température de fusion du MCP. Il est également important que la chaleur latente soit aussi élevée que possible, surtout en termes de volume, afin de réduire au minimum la taille physique de l'accumulateur de chaleur. De plus, une conductivité thermique élevée serait bénéfique pour le chargement et le déchargement efficaces du stockage d'énergie [15].

2.8.1 Propriétés physiques

La stabilité de phase pendant la fusion par congélation est bénéfique pour assurer la stabilité du stockage de chaleur, tandis qu'une densité élevée est souhaitable pour permettre une taille de récipient de stockage plus petite. De plus, des changements de volume réduits lors de la transition de phase et une faible pression de vapeur aux températures de fonctionnement contribuent à réduire les problèmes de confinement [15].

2.8.2 Caractéristiques cinétiques

La surfusion a été un défi majeur dans le développement des MCP, en particulier pour les hydrates de sel. Une surfusion de plus de quelques degrés peut entraver l'extraction efficace de chaleur du stockage, et une surfusion de 5 à 10 °C peut l'empêcher complètement. En ce qui concerne les propriétés cinétiques, il est important de garantir une vitesse de cristallisation adéquate et d'éviter la surfusion [15].

2.8.3 Propriétés chimiques

Les MCP peuvent subir une dégradation due à la perte d'eau d'hydratation, à la décomposition chimique ou à une incompatibilité avec les matériaux de construction. Il est essentiel que les MCP soient non toxiques, ininflammables et non explosifs pour des raisons de sécurité [15].

2.8.4 Propriétés environnementales

L'impact environnemental est un critère clé dans la sélection des MCP. Il est important de rechercher des MCP ayant une faible empreinte énergétique, un faible impact environnemental et qui ne soient pas polluants tout au long de leur durée de vie. De plus, il est préférable d'avoir des MCP recyclables [15].

Chapitre 02 : Matériaux à changement de phase (MCP)

2.9 Quelques phénomènes ayant un impact sur l'efficacité du stockage

2.9.1 La fusion

Lorsque l'on refroidit un liquide, la solidification ne se produit généralement pas dès que la température de fusion est atteinte. Le matériau peut rester à l'état liquide jusqu'à plusieurs dizaines de degrés en dessous de la température de changement de phase. Lorsque la solidification commence, elle dégage de la chaleur. Si la masse de liquide est suffisamment grande et que les échanges de chaleur avec l'extérieur sont faibles, cela peut entraîner une augmentation de la température du matériau jusqu'à la température de changement de phase. Ce phénomène réduit l'efficacité thermique des unités de stockage par chaleur latente par rapport à celles par chaleur sensible. En effet, la décharge de la chaleur (pendant la solidification) se produit à des températures inférieures à celles de stockage, entraînant une différence entre la chaleur absorbée pendant le chauffage et celle restituée pendant le refroidissement [14].

2.9.2 La surchauffe

La surchauffe d'un corps se réfère à l'augmentation de température du corps après son changement de phase (réchauffement de la phase liquide après la fusion, ou de la phase vapeur après la vaporisation). Si cette surchauffe se produit sur une courte durée, elle est simplement considérée comme une chaleur sensible supplémentaire stockée dans le système [14].

2.9.3 La dilatation

Lors du changement de phase de solide à liquide, le matériau change de densité et donc de volume. Cela peut poser des problèmes dans certaines applications, notamment lorsqu'un conteneur fermé est utilisé, car il doit supporter l'augmentation de pression [14].

2.9.4 Les Échangeurs de chaleur avec matériaux changement de phase

Les systèmes de stockage d'énergie thermique à chaleur latente permettent de stocker de grandes quantités d'énergie dans des volumes relativement petits. Les matériaux à changement de phase (MCP) sont utilisés pour ce type de stockage, mais leur faible conductivité thermique entraîne des processus de fusion (charge) et de solidification (décharge) relativement longs [16].

Chapitre 3 : Procédure expérimentale

3. Procédure expérimentale

Ce chapitre traite de la mise en place d'un banc d'essai expérimental dédié à l'étude de la fusion d'un matériau à changement de phase (MCP) dans un tube avec les ailettes. Les différentes expériences ont été menées au sein du laboratoire de génie mécanique de la faculté des sciences et de la technologie de l'Université de Mostaganem.



Figure 3.1: Plant d'essai

3.1 Matériel et accessoire de l'installation :

- pompe à eau : pour assurer la circulation de l'eau chaude et l'eau froide.
- Cinq capteurs de température : mesurer la température au niveau de MCP.
- Débitmètre : mesurer le débit de l'eau circulant au sein de circuits de la tuyauterie.
- Résistance thermique : chauffé l'eau.
- Deux capteurs de température : contrôler la température de l'eau à l'entrée et à la sortie de la section d'essais.
- Régulateur.
- Deux réservoirs : l'un pour l'eau chaude et l'autre pour l'eau froide.
- Isolation: la laine de verre

Chapitre 3 : Procédure expérimentale



Figure 3.2: Matériel et accessoires de l'installation : 1) Débitmètre, 2) isolant, 3) les capteurs des températures, 4) régulateur de résistance, e) Réservoir de l'eau chaude et l'eau froide et 6) pompe.

3.2 Matériau de tuyauterie :

Le cuivre : en raison de ses caractéristiques cruciales de conductivité thermique, de sa facilité d'utilisation et de sa résistance mécanique élevée, le cuivre est un élément très employé dans ce type d'appareils. Il est important de souligner que le type de fluide nécessaire à la thermorégulation est l'une des variables ayant le plus d'influence sur les échangeurs de chaleur.

Chapitre 3 : Procédure expérimentale



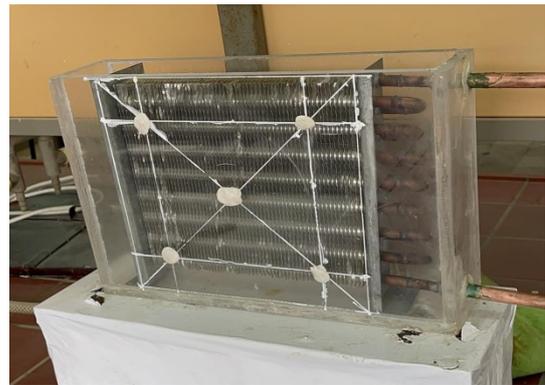
Figure 3.3 Soudage des tubes en cuivre.

3.3 Fabrication de la cage :

Nous avons construit une cage en plexiglas de 23,5 cm de hauteur, 31 cm de longueur et 6,3 cm de largeur avec 1 cm d'épaisseur, puis nous y avons mis le tube spirale en cuivre de 500 cm de longueur (diamètre extérieur 9,5 mm et diamètre intérieur 8,5 mm).



(a)



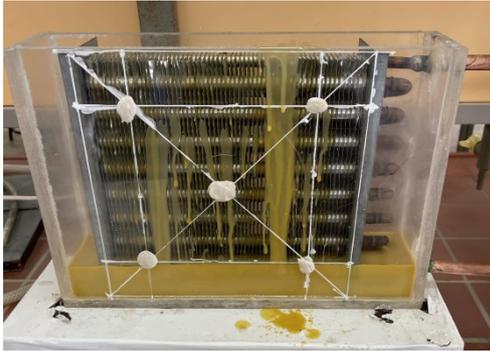
(b)

Figure 3.4 : a) Tube spirale avec les ailettes, b) Cage en plexiglas.

3.4 Remplissage de MCP (cire d'abeille) :

Nous avons brisé le MCP en morceaux et l'avons mis dans un plat qui peut résister à la chaleur, puis nous avons versé le MCP dans la cage en plexiglas après l'avoir fondue comme indiqué ci-dessous.

Chapitre 3 : Procédure expérimentale



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figure 3.5 : Remplissages de MCP.

3.5 Placement des capteurs :

Nous avons fait cinq trous dans la cage en plexiglas transparent, puis nous avons inséré la tête du capteur de 3 cm jusqu'à ce qu'elle soit égale aux autres.

- a) **Premier cas** : nous avons fait l'étude de la section d'essai remplie de la cire d'abeille.
- b) **Deuxième cas** : nous avons fait l'étude de la section d'essai remplie par un mélange entre la cire d'abeille et paraffine RT 50.



Figure 3.6 : Section d'essai remplie de la cire d'abeille et le mélange.

Chapitre 4 : Résultats et discussions

4. Résultats et discussion

Dans cette étude, une configuration expérimentale est développée pour évaluer les performances thermiques d'un prototype compact de système de stockage d'énergie thermique latente (LHTESS) pendant les étapes de charge et de décharge.

Dans la première partie, le LHTESS se compose d'un échangeur de chaleur multitube orienté horizontalement et d'une cire d'abeille naturelle disponible en Algérie, ayant une température de changement de phase comprise entre 61 °C et 63 °C comme support de stockage d'énergie.

Dans la deuxième partie, le LHTESS se compose d'un échangeur de chaleur multitube orienté horizontalement et d'une cire de paraffine RT50 disponible dans le commerce, ayant une température de changement de phase comprise entre 45 °C et 50 °C comme support de stockage d'énergie.

La campagne de tests a évalué l'influence de plusieurs conditions de fonctionnement, notamment le débit volumique du fluide caloporteur (HTF) et la température d'entrée, sur la puissance d'entrée et de sortie du LHTESS, le temps de fusion et de solidification, ainsi que l'efficacité.

4.1 Protocoles de charge et de décharge

Des tests de stockage et de récupération ont été effectués pour différents débits de l'eau. Initialement, le bain-marie était rempli d'eau, toutes les vannes étaient ensuite fermées. À l'aide du réchauffeur électrique thermostatique, l'eau a été préchauffée dans le bain-marie à une température de $T_{in} = 80 \text{ °C}$, en considérant que le point de fusion du MCP utilisé est compris entre 60 °C et 63 °C pour la cire d'abeille (configuration 1) et 55 et 57 pour le mélange de la cire d'abeille et le paraffine (configuration 1). Ensuite, le processus de charge a été lancé en boucle fermée en démarrant la pompe de circulation et en réglant le débit d'eau souhaité à l'aide de la vanne V-3 et du débitmètre. Les vannes V-1, V-3 et V-4 ont été ouvertes pour protéger la pompe et assurer la configuration en boucle fermée. Les profils de température sont enregistrés à un intervalle entre les mesures de 120 s. La fin de la phase de charge se produit lorsque la température moyenne à l'intérieur du MCP atteint une valeur stable ($|T_{MCP} - T_{in}| < 5 \text{ °C}$).

Chapitre 4 : Résultats et discussions

Pour la deuxième série de tests, puisque les débits sont plus élevés, un intervalle plus petit entre les mesures a été utilisé pour capturer plus précisément l'évolution plus rapide des températures pendant les processus de charge et de décharge.

Une fois les tests de charge arrêtés, l'eau contenue dans le réservoir est déplacée avec de l'eau. Il est à noter que la température à l'intérieur de l'unité de stockage est maintenue pendant cette manœuvre grâce à l'isolation thermique. Ensuite, le protocole de décharge est effectué après avoir réglé le débit et en utilisant le même intervalle. Les expériences de récupération d'énergie sont réalisées en boucle ouverte (en ouvrant la vanne V-2, V-5 en fermant V-1 et V-4) pour imiter la consommation d'eau chaude sanitaire. En effet, la vanne V-3 est ouverte et réglée pour maintenir un débit constant d'eau municipale dans l'installation tout au long de l'expérience de décharge au fur et à mesure que l'eau chaude est évacuée. L'acquisition des données est exécutée jusqu'à ce que l'eau de sortie et le MCP atteignent une température stable proche de T_{in} .

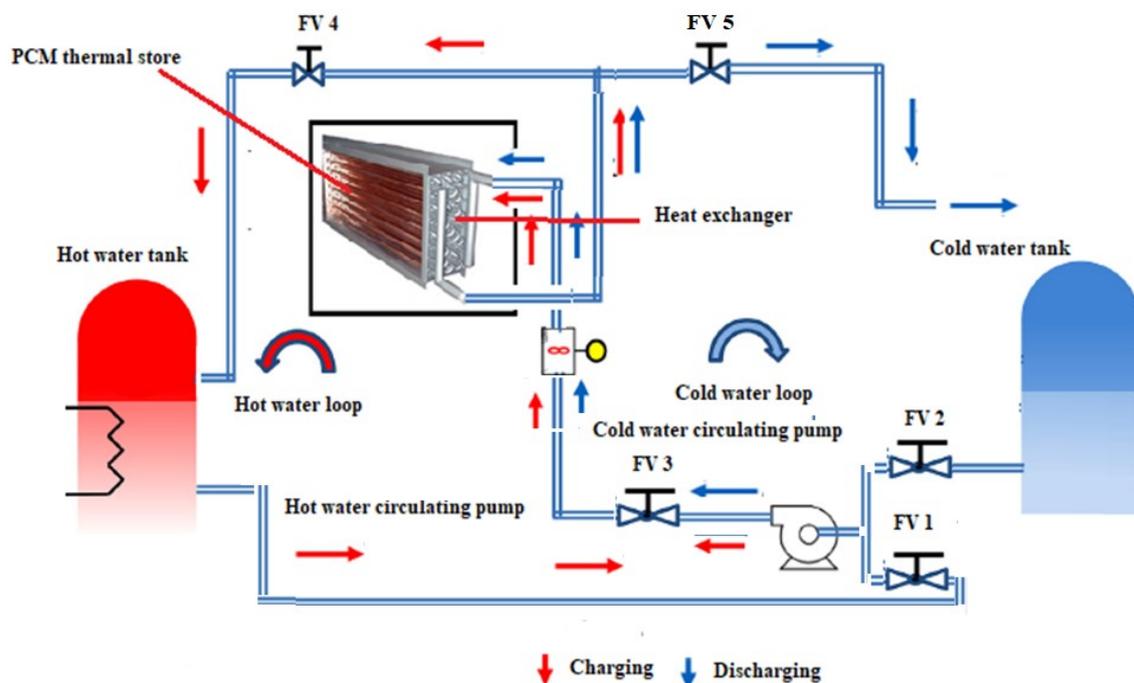


Figure 4.1 : Schéma de protocoles expérimentale pendant les processus de charge et de décharge.

Chapitre 4 : Résultats et discussions

4.2 Objectifs

L'objectif visé par ce travail, touche les deux points suivants :

1. Les résultats obtenus vont contribuer à une meilleure compréhension du phénomène de stockage d'énergie thermique (par chaleur latente).
2. Les applications industrielles de ce travail sont les suivantes :
 - Déterminer la meilleure combinaison entre un système de stockage et un matériau à changement de phase (MCP).
 - Dimensionner un système de stockage d'énergie thermique par chaleur latente, afin d'améliorer certaines applications industrielles



Figure 4.2 : Configurations d'injection possibles durant les essais (Sections d'essai rempli de la cire d'abeille).

Tableau 4.1 : Propriétés thermiques des MCP utilisés.

	Masse volumique $\rho(\text{kg m}^{-3})$	Chaleur spécifique $C_p(\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1})$	Conductivité thermique $\lambda (\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1})$	Chaleur latente $L_h(\text{kJ kg}^{-1})$	Température de fusion $T_f(^{\circ}\text{C})$
Cire d'abeille	970	0.476	0.41	242.8	62.95
Paraffine RT 50	760	2	0.2	189	45-51

Chapitre 4 : Résultats et discussions

4.3 Les hypothèses du travail :

Il est nécessaire d'effectuer un certain nombre d'hypothèses. Les hypothèses utilisées souvent dans l'étude expérimentale d'un échangeur de chaleur utilisant un matériau à changement de phase (MCP) sont comme suit :

- L'écoulement du fluide à l'intérieure du tube interne (Eau) est en régime transitoire;
- Le MCP dans la cage est a l'état statique ($v=0$ m/s) ;
- Aucune change de chaleur à l'intérieur de la cage et l'extérieur (adiabatique);
- L'écoulement est incompressible ;
- Le régime d'écoulement est non permanant ;
- Le champ de gravité est non négligé.

4.4. Analyse des données de système de stockage d'énergie thermique à chaleur latente (LHTESS)

La méthode de calcul utilisée pour déterminer le flux de transfert thermique entre le HTF et le MCP est détaillée dans cette section. Le taux de transfert de chaleur entre le HTF dans l'échangeur thermique compact et le MCP a été déterminé à l'aide de la méthodologie suivante :

$$\dot{Q} = \dot{m}C_{p,HTF}(T_{in} - T_{out}) \quad (1)$$

La température moyenne du MCP dans le prototype LHTESS complet à chaque intervalle de mesure est calculée à l'aide de l'équation (2).

$$T_{PCM} = \frac{\sum_i^n T_i}{n} \quad (2)$$

Le nombre de Reynolds (Re) pour le flux du HTF a été déterminé à l'aide de l'équation (3), qui s'exprime comme suit :

$$Re = \frac{\rho dv}{\mu} \quad (3)$$

avec, ρ , μ , v et d représentent respectivement la densité, la viscosité dynamique, la vitesse du HTF et le diamètre du tube intérieur.

Chapitre 4 : Résultats et discussions

$$\varepsilon = \frac{T_{in}-T_{out}}{T_{in}-T_{MCP}} \quad (4)$$

où TMCP représente la température spatialement moyenne au sein du MCP, dérivée des lectures de température capturées par les thermocouples TMCP1 à TMCP5. L'équation 4 est applicable pendant les phases de charge et de décharge du MCP. Il est important de souligner que le modèle utilisé pour évaluer les performances du système MCP ne prend pas en compte le stockage de chaleur sensible.

Le calcul de l'efficacité (équation 4) est particulièrement pertinent dans la plage de température de 57,5 °C pour le changement de phase. L'efficacité moyenne est déterminée sur les phases de charge et de décharge pour différents débits du HTF examiné :

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\int \varepsilon(t)dt}{t_{phasecharg}} \quad (5)$$

Conclusion

Conclusion :

Ce projet de fin d'études porte sur la conception et la mise en place d'un banc d'essai expérimental pour étudier la fusion d'un matériau à changement de phase (MCP) dans un tube muni d'ailettes. Les expériences ont été réalisées au laboratoire de génie mécanique de la faculté des sciences et de la technologie de l'Université de Mostaganem.

Une étude expérimentale de la caractérisation thermique d'un prototype compact de système de stockage d'énergie thermique à chaleur latente, durant les phases de chargement et de déchargement. Le prototype est équipé d'un échangeur de chaleur en cuivre à tubes multiples avec des ailettes horizontales. La cire d'abeille est utilisée comme matériau naturel pour le stockage de chaleur latente, tandis qu'un mélange de cire d'abeille et de paraffine est considéré comme un matériau eutectique pour le stockage de chaleur latente.

En conclu, le choix entre la cire d'abeille pure et le mélange cire d'abeille-paraffine dépendra des exigences spécifiques de l'échangeur de chaleur en termes de température de fonctionnement, de coût, et de disponibilité des matériaux. Si la température de fonctionnement de l'échangeur de chaleur est stable et correspond à la plage de 62-64 °C, la cire d'abeille pure pourrait être un choix excellent en raison de sa stabilité, de sa sécurité et de sa capacité thermique élevée. Cependant, si vous avez besoin d'ajuster la température de fusion ou de réduire les coûts, un mélange de cire d'abeille et de paraffine pourrait être plus approprié. Ce mélange permet de moduler les propriétés du MCP pour mieux répondre aux exigences spécifiques de votre application.

Pour effectuer l'analyse des performances de ce système innovant, des expériences de chargement et de déchargement ont été menées à différents débits de fluide caloporteur (40 l/h, 50 l/h, 65 l/h, 90 l/h, 100 l/h), la température d'entrée étant fixée à 80 °C.

- Pendant le processus de chargement, l'augmentation du débit de 40 à 100 L/h l'efficacité de l'échangeur de chaleur elle est réduit de 0,9168 à 0,6297 pour la cire d'abeille et pour le mélange de la cire d'abeille et le paraffine elle est réduit de 0,91 à 0,62.

- Pendant le processus de déchargement réduit l'efficacité de l'échangeur de chaleur de 0,9319 à 0,658 pour la cire d'abeille et pour le mélange de 0,93 à 0,65.

Conclusion

Pour des applications industrielles nécessitant une efficacité thermique élevée et des temps de réponse rapides, le prototype équipé d'un échangeur de chaleur en cuivre à tubes multiples avec des ailettes est généralement plus efficace et préféré. Les ailettes augmentent significativement la surface de contact, améliorant ainsi le transfert de chaleur et rendant le système plus performant. Cependant, le choix final peut également dépendre d'autres facteurs tels que les coûts initiaux, les coûts de maintenance, l'espace disponible, et les exigences spécifiques de l'application industrielle.

Reference bibliographies:

- [1] W. Sun, Y. Hong, Y. Wang, Operation optimization of steam accumulators as thermal energy storage and buffer units, *Energies* (2017) 10 (1).
- [2] Y. Li, J. Xia, H. Fang, Y. Su, Y.i. Jiang, Case study on industrial surplus heat of steel plants for district heating in Northern China, *Energy* 102 (2016) 397–405.
- [3] S. Harikrishnan, A. Devaraju, P. Sivasamy, S. Kalaiselvam, Experimental investigation of improved thermal characteristics of SiO₂/myristic acid nanofluid as phase change material (PCM), *Mater. Today: Proc.* 9 (2019) 397–409.
- [4] Jiwei Guo et al. Thermal storage and thermal management properties of a novel ventilated mortar block integrated with phase change material for floor heating: an experimental study. *Energy conversion and management* 2020; 205: 112228.
- [5] Murat Kenisarin et al. Solar energy storage using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2007; 11 : 1913-1965.
- [6] Dazhang Yang et al. Review on active building energy conservation using phase change materials. *E3S Web of Conferences* (2021); 236: 05007.
- [7] Kosny Jan. PCM – Enhanced building components an application of phase change materials in building envelopes and internal structures. Springer Briefs international publishing Switzerland.2015.270.ISBN 978-3-319-14285-2.
- [8] Joao M.P.Q Delgado et al. Thermal Energy Storage with Phase Change Materials, a literature review of applications for buildings materials. Springer Briefs in applied sciences and technology.2019: issn 2191-5318.
- [9] Jedidi Malek et al. La thermique du bâtiment – du confort thermique au choix des équipements de chauffage et de climatisation. Dunod, 2016.208. ISBN 978-2-10-074481-7.
- [10] Battaglia Jean-Luc. Introduction au transfert thermiques-cours et exercices corrigés. Dunod, Paris, 2010. ISBN 978-2-10-054828-6.
- [11] N. Madjoudj et al. Matériau à changement de phase au service de la bioclimatique. *Revue des énergies renouvelables*. Vol 19, N° 14, 647-662. 2016.

- [12] Duraković Benjamin. PCM-Based building envelope system, Innovative energy solutions for passive design. Springer nature Switzerland. 2020. ISBN 978-030-38334-3.
- [13] Socaciu Lavinia et al. Review on phase change materials for buildings applications. Leonardo Electronic Journal of Practices and technologies. 2014. 25:179-194.
- [14] GUEZEI Abbasi. Etude numérique des transfert de chaleur et de masse lors de la fusion d'un matériaux a changement de phase. Mémoire fin d'étude Diplôme de master académique. Université Mohamed Larbi Ben M'hidi, Oum el Bouaghi Faculté des sciences et des sciences appliquées : 2017/2018.
- [15] Sharma Atul et al. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. Renewable and sustainable energy review 13 (2019).318-395.
- [16] Saulius Pakalka et al. Experimental and theoretical investigation of the natural convection heat-transfer coefficient in phase change material (PCM) based fin-and-tube heat exchanger. Energies2021; 14: 716.