



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

N° d'enregistrement

Université de Ghardaïa

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم التعليم المشترك في العلوم والتكنولوجيا

Département de l'enseignement commun en sciences et technologies

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Master

Domaine : Sciences des matériaux

Filière : Physique

Spécialité : Physique Energétique et Energies Renouvelables

Thème

**Expérimentation et mise à l'essai d'un système de réfrigération
intégrant des matériaux à changement de phase**

Présenté par :

Ben Messaoud Amina

Larbi Rahma

Soutenue publiquement en Juin 2026

Devant le jury composé de :

BOUDABIA Saad	Maître de Conférences A	Université de Ghardaïa	Président
DAOUDI Bahmed	Professeur	Université de Ghardaïa	Examinateur
AMIEUR Bachir	Maître de Conférences B	Université de Ghardaïa	Examinateur
BEKKOUCHE Sidi Mohammed El Amine	Directeur de Recherche	URAER - Ghardaïa	Encadreur
BELGHERRAS Sifia	Maître de Conférences A	Université de Ghardaïa	Co-encadreur

Année universitaire 2025 / 2026

Remerciements

Louange à Dieu, par la grâce duquel les bonnes actions sont accomplies, et par la grâce duquel les objectifs sont atteints.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements et notre profonde gratitude au **Dr. BEKKOUCHE Sidi Mohammed El Amine**, Directeur de Recherche à l'Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables (URAER – Ghardaïa), pour ses conseils précieux, ses commentaires constructifs et le soutien continu qu'il a fourni tout au long du processus de recherche.

Son expertise, sa diligence et sa générosité ont grandement influencé notre orientation et nous ont aidés à surmonter les défis pour mener à bien ce projet académique.

Nous adressons également nos remerciements particuliers au **Dr. BELGHERRAS Sifia** Maître de Conférences « A » à l'Université de Ghardaïa, notre co-encadrante, pour ses précieux conseils et ses orientations qui ont considérablement amélioré la qualité de notre étude.

Nous adressons également nos sincères remerciements et notre considération aux honorables membres du jury pour avoir consacré de leur temps précieux à l'examen de ce travail et pour leurs remarques constructives.

Nous adressons également nos remerciements particuliers à l'ensemble de nos professeurs pour leurs efforts consentis tout au long de notre parcours universitaire.

Nous tenons à remercier tout particulièrement nos précieuses familles, notre soutien de toujours, pour leur appui moral et matériel ainsi que leurs encouragements constants. Elles ont toute notre affection et notre gratitude. Nous ne saurions oublier de remercier nos amis et collègues, qui ont été nos meilleurs compagnons tout au long de notre parcours de Master et qui ont partagé avec nous cette expérience, avec tous ses défis et ses accomplissements.

À vous tous, nous exprimons toute notre reconnaissance et nos sincères remerciements.

TABLE DES MATIERES

Table des matières.....	01
Table des figures.....	03
Liste des tableaux.....	05
..... Introduction générale.....	06
..... Chapitre 1	
..... Principes de base sur le stockage d'énergie	09
..... par chaleur latente	
1.1. Introduction.....	10
1.2. Principes généraux du stockage thermique.....	11
1.3. Thermodynamique des systèmes frigorifiques.....	12
1.4. Matériaux à changement de phase.....	14
1.4.1. Définition.....	14
1.4.2. Propriétés des MCPs.....	15
1.4.3. Applications des MCPs dans les systèmes frigorifiques.....	16
1.5. Revue des travaux antérieurs.....	17
1.6. Principales limites	20
1.7. Conclusion	21
..... Chapitre 2	
..... Matériels et méthode expérimentale	23
2.1. Introduction.....	24
2.2. Choix des matériaux à changement de phase	24
2.3. Conception et principe de fonctionnement du système frigorifique.....	25
2.4. Protocole expérimental.....	27
2.4.1. Mise en place de l'expérimentation	27
2.4.2. Méthodes de mesure et d'analyse.....	30
2.5. Outils et logiciels utilisés.....	34
2.5.1. Ajustement des courbes et des données.....	35
2.5.2. Microsoft Excel	35

2.5.3. Matlab	36
2.5.4. Origin	36
2.6. Conclusion.....	36
Chapitre 3	
..... Résultats expérimentaux, analyses et discussions	37
3.1. Introduction.....	38
3.2. Évolution des différentes températures au sein du système frigorifique	38
3.3. Dégivrage électrique par résistance chauffante	41
3.4. Dysfonctionnement technique avec endommagement	44
3.5. Énergie électrique cumulée consommée par la machine frigorifique.....	47
3.6. L'effet de la température du labo sur l'énergie électrique consommée.....	50
3.7. Économies réalisées sur la consommation d'électricité.....	51
3.8. Conclusion.....	55
..... Conclusion générale	56
..... Références	59

TABLE DES FIGURES

- Figure 1.1 : Vue d'ensemble des systèmes frigorifiques fonctionnant par cycle à compression de vapeur.
- Figure 1.2 : Processus de stockage et de déstockage de l'énergie.
- Figure 2.1 : Description générale de l'installation et schéma du fonctionnement du cycle frigorifique.
- Figure 2.2 : Cycle et schéma général décrivant le fonctionnement du système frigorifique.
- Figure 2.3 : Mesure expérimentale de la dilatation volumique du Glaceol lors de sa congélation, depuis l'état liquide initial (a) jusqu'à la congélation partielle (b) puis à l'état complètement congelé (c).
- Figure 2.4 : Image illustrative indiquant la quantité de glace formée sur une partie du circuit frigorifique.
- Figure 2.5 : Composants du système de dégivrage automatique. (a) Résistance de dégivrage, (b) Minuterie mécanique servant de régulateur de timing, (c) Thermostat ou module de régulation de température, (d) Système d'assemblage complet.
- Figure 2.6 : Processus d'étalonnage des thermocouples en plusieurs étapes.
- Figure 2.7 : Thermomètres numériques destinés au processus d'étalonnage.
- Figure 2.8 : Instrument d'acquisition de mesures et de données "Consort T8710".
- Figure 2.9 : Interfaces illustrant le logiciel de supervision et d'enregistrement, compatible avec l'acquisition de données du modèle "Consort T8710".
- Figure 2.10 : Photo du compteur numérique de puissance.
- Figure 3.1 : Températures de l'air à l'intérieur et à l'extérieur de la machine frigorifique, $T_{\text{Thermostat}} = -35\text{ °C}$.
- Figure 3.2 : Températures à l'intérieur et à l'extérieur de la machine frigorifique, le cas de l'eau en tant que MCP, $T_{\text{Thermostat}} = -35\text{ °C}$.
- Figure 3.3 : Températures à l'intérieur et à l'extérieur de la machine frigorifique, le cas du glaciol en tant que MCP, $T_{\text{Thermostat}} = -35\text{ °C}$.
- Figure 3.4 : Température à l'intérieur de la machine frigorifique : thermostat réglé à -35 °C , activation de la résistance de dégivrage, avec et sans MCP, toutes les 3 heures.

- Figure 3.5 : Température à l'intérieur de la machine frigorifique : thermostat réglé à $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$, activation de la résistance de dégivrage, avec et sans MCP, toutes les 6 heures.
- Figure 3.6 : Température à l'intérieur de la machine frigorifique : cas d'un thermostat réglé à $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Figure 3.7 : Consommation électrique cumulée prédite du système frigorifique, cas d'un thermostat réglé à $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Figure 3.8 : Économies d'énergie cumulées induites par l'intégration du MCP, cas d'un thermostat réglé à $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Figure 3.9 : Variation de la consommation électrique de la machine en fonction de la température du thermostat, sans MCP, pour une température ambiante de laboratoire voisine de $22\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Figure 3.10 : Variation de la consommation électrique de la machine en fonction de la température du thermostat, avec MCP, pour une température ambiante de laboratoire voisine de $22\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Figure 3.11 : Consommation d'énergie électrique en fonction de la température de labo de la machine frigorifique : cas d'un thermostat réglé à $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1.1 : Paramètres et conditions relatives au stockage et à la restitution de la chaleur latente d'un MCP.
- Tableau 1.2 : Processus de stockage et de déstockage de l'énergie.
- Tableau 2.1 : Critères de choix et caractéristiques des MCP sélectionnés.
- Tableau 2.2 : Volume du Glaceol à verser dans les plaquettes MCP de forme parallélépipédique
- Tableau 3.1 : Valeurs mesurées de la consommation électrique cumulée du système frigorifique, cas d'un thermostat réglé à -35 °C
- Tableau 3.2 : Consommation électrique de la machine frigorifique en fonction de la température du thermostat, sans MCP, pour une température ambiante de laboratoire voisine de 22 °C .
- Tableau 3.3 : Consommation électrique de la machine frigorifique en fonction de la température du thermostat, avec MCP, pour une température ambiante de laboratoire voisine de 22 °C .
- Tableau 3.4 : Potentiel d'économies d'électricité lié au choix de l'eau comme MCP
- Tableau 3.5 : Potentiel d'économies d'électricité lié au choix du glaciol comme MCP pour une température du thermostat fixée à -35 °C

Introduction générale

0. Introduction générale

Les systèmes de réfrigération jouent un rôle indispensable dans de nombreux secteurs industriels, agroalimentaires et médicaux, compte tenu de leur rôle crucial dans la conservation des produits sensibles à la chaleur et le maintien de conditions stables lors du stockage et du transport. Face à la hausse des besoins en réfrigération et à la priorité accordée à l'efficacité énergétique, il est devenu urgent de développer des solutions plus performantes permettant un meilleur contrôle de la température, tout en réduisant l'usage d'électricité et améliorant les performances globales du système.

Dans ce contexte, les matériaux à changement de phase "MCP" apparaissent comme des technologies prometteuses pour les systèmes de réfrigération. Ils permettent de stocker et de réguler les transferts d'énergie thermique, contribuant ainsi à réduire les fluctuations thermiques et à améliorer la stabilité de la température dans l'espace réfrigéré. De plus, leur intégration permet de réduire le nombre de cycles de compression, de minimiser l'impact des cycles de dégivrage et, par conséquent, d'améliorer l'efficacité énergétique du système.

Cependant, l'utilisation des MCP dans les systèmes de réfrigération soulève encore plusieurs défis scientifiques et techniques, notamment le choix du matériau approprié, la vérification de son adéquation aux conditions de fonctionnement, son intégration au système et l'évaluation de son impact réel sur les performances thermiques et la consommation d'énergie. Le problème central abordé par ce mémoire est de déterminer dans quelle mesure les matériaux à changement de phase peuvent contribuer à l'amélioration des performances d'un système frigorifique expérimental conçu à l'Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables "URAER", à la réduction de la consommation électrique et à l'augmentation de la stabilité de la température dans la chambre réfrigérée, en comparaison avec un système conventionnel.

Pour achever à terme nos objectifs, nous avons sélectionné deux matériaux classiques à changement d'état intégrés de manière judicieuse dans un système frigorifique conçu à l'échelle local. La réalisation des différentes expériences ainsi que l'adoption du protocole expérimental ont été effectuées au sein du laboratoire rattaché à l'équipe architecture solaire et bioclimatique, en activité au sein de l'unité de recherche

INTRODUCTION GENERALE

"URAER" de Ghardaïa. Les résultats des analyses ont été mis en comparaison avec ceux d'un système ne comportant pas de matériaux à changement de phase. L'étude vise également à analyser le comportement de ces matériaux en conditions réelles, ainsi qu'à évaluer leurs effets sur la température, la consommation énergétique et l'efficacité du dégivrage.

Ce mémoire se compose de trois chapitres principaux, en plus d'une introduction et d'une conclusion générale. Le chapitre 1 présente le cadre théorique et les études antérieures relatives aux systèmes frigorifiques et aux matériaux à changement de phase. Le chapitre 2 présente la méthodologie employée, incluant la sélection des matériaux, la conception du système, le protocole expérimental et les instruments utilisés. Le chapitre 3 présente les résultats expérimentaux, leur discussion et une analyse comparative, en soulignant les principales conclusions et les perspectives de recherche futures.

Chapitre 1

Principes de base sur le stockage d'énergie par chaleur latente

1.1. Introduction

La hausse continue des besoins énergétiques, combinée aux défis de la transition vers les énergies renouvelables, nécessite le développement de solutions de stockage capables de mieux gérer l'intermittence de la production et les fluctuations de la demande. Dans ce contexte, l'énergie thermique stockée occupe une position importante parmi les solutions technologiques disponibles, du fait de sa mise en œuvre aisée, de son coût attractif et de sa compatibilité avec de nombreux secteurs, en particulier le bâtiment, l'industrie et les systèmes solaires thermiques.

Le stockage par chaleur latente fait partie des solutions de stockage thermique les plus remarquables, en raison de sa capacité à emmagasiner une quantité importante d'énergie pendant un changement de phase, le plus souvent lors de la fusion ou de la solidification d'un matériau. Il offre ainsi une densité énergétique élevée et une température quasi-constance durant la transition, ce qui en fait une solution particulièrement adaptée pour les applications nécessitant une régulation thermique précise.

Le principe du stockage par chaleur latente repose principalement sur l'utilisation de matériaux à changement de phase, communément appelés MCP en français. Ces matériaux absorbent ou restituent de l'énergie lors de leur transition entre les états solide, liquide ou parfois gazeux, sans variation importante de température. Cette caractéristique permet d'assurer une régulation thermique plus stable que celle offerte par le stockage sensible, où l'énergie est stockée uniquement par élévation de température du matériau.

Dans les installations frigorifiques, les émissions de gaz à effet de serre proviennent plus particulièrement de l'électricité consommée. Les MCPs peuvent améliorer l'efficacité d'un réfrigérateur domestique. La configuration du dispositif de stockage thermique retenue consiste en un MCP en plaque de forme parallélépipédique en contact direct avec la surface de l'air du compartiment. On évaluera, durant ce mémoire sa contribution en testant les différents mécanismes permettant l'amélioration du COP (coefficient de performance de la machine) du cycle frigorifique.

CHAPITRE 1 : PRINCIPES DE BASE SUR LE STOCKAGE D'ÉNERGIE PAR CHALEUR LATENTE

Ce chapitre constitue une base indispensable pour la compréhension des chapitres suivants, qui traitent plus en détail, la conception, l'optimisation ou l'expérimentation des systèmes de stockage thermique par chaleur latente. Il a pour objectif de présenter les fondements théoriques du stockage d'énergie par chaleur latente. Il est question d'analyser le mécanisme du changement de phase et les paramètres qui impactent les performances du système. Les principales familles des MCPs, leurs propriétés thermophysiques ainsi que les critères de choix selon l'usage seront brièvement également abordés. Enfin, une analyse des avantages, des limites et des principales applications de cette technologie permettra de clarifier son rôle dans le domaine du stockage énergétique.

1.2. Principes généraux du stockage thermique

Le stockage thermique est fondé sur quelques principes généraux faciles à comprendre, parmi lesquels :

– Stockage de l'énergie sous forme thermique

On stocke l'énergie en augmentant ou diminuant la température d'un matériau, ou en exploitant un changement d'état (fusion, solidification, etc.).

– Utilisation et recours à un matériau de stockage

Le stockage s'effectue dans un milieu approprié, tel que l'eau, la pierre, le béton, les sels fondus ou encore les MCPs.

– Choix du mode de stockage adapté

○ Stockage sensible

Le stockage d'énergie repose sur la variation de température du matériau, sans changer son état. Sa capacité spécifique, c'est-à-dire l'énergie accumulée par volume d'élément actif, atteint environ 50 kWh/m³ [1].

○ Stockage latent

L'énergie est stockée lors d'un changement d'état, à température presque constante. L'énergie accumulée par volume d'élément actif se situe généralement entre 100 et 150 kWh/m³ [1].

CHAPITRE 1 : PRINCIPES DE BASE SUR LE STOCKAGE D'ENERGIE PAR CHALEUR LATENTE

○ Stockage thermo-chimique

Il présente une plus grande complexité en raison des réactions chimiques réversibles, sa capacité de stockage dépasse souvent la plage de 300-500 kWh/m³ [1].

– Réduction des pertes

Une bonne isolation thermique du système est nécessaire pour limiter les déperditions de chaleur vers l'extérieur.

– Présence d'un cycle alternant stockage et déstockage

Stockage ou chargement : le système est soumis à un apport de chaleur ou de froid.

En phase de déstockage ou de déchargement, on récupère cette énergie au moment voulu.

– Adaptation du stockage à l'usage

Le choix du matériau et la technologie à privilégier dépendent de la température de fonctionnement, de la capacité de stockage souhaitée, du temps de conservation et la vitesse de restitution de l'énergie.

1.3. Thermodynamique des systèmes frigorifiques

Les systèmes frigorifiques, en thermodynamique, ont pour objectif d'extraire de la chaleur d'un milieu froid afin de la rejeter vers un milieu plus chaud, au moyen d'un travail fourni de l'extérieur. C'est le fonctionnement des réfrigérateurs et des climatiseurs.

Un système frigorifique fonctionne à l'inverse spontané du transfert thermique. La chaleur va naturellement du chaud vers le froid. Ce système frigorifique force la chaleur à aller du froid vers le chaud, cela nécessite donc un travail W , généralement fourni par un compresseur. Selon le premier principe de la thermodynamique :

$$Q_C = Q_f - W \quad (1.1)$$

Q_f : chaleur prélevée à la source froide,

Q_C : chaleur rejetée à la source chaude,

W : travail fourni au système.

CHAPITRE 1 : PRINCIPES DE BASE SUR LE STOCKAGE D'ENERGIE PAR CHALEUR LATENTE

Les systèmes frigorifiques utilisent souvent un cycle à compression de vapeur (figure 1.1). C'est le plus courant. Il comporte 4 éléments :

- Compresseur : augmente la pression et la température du fluide frigorigène
- Condenseur : le fluide cède de la chaleur à l'extérieur et se liquéfie
- Détendeur : baisse brusque de pression
- Évaporateur : le fluide absorbe de la chaleur à la source froide et s'évapore.

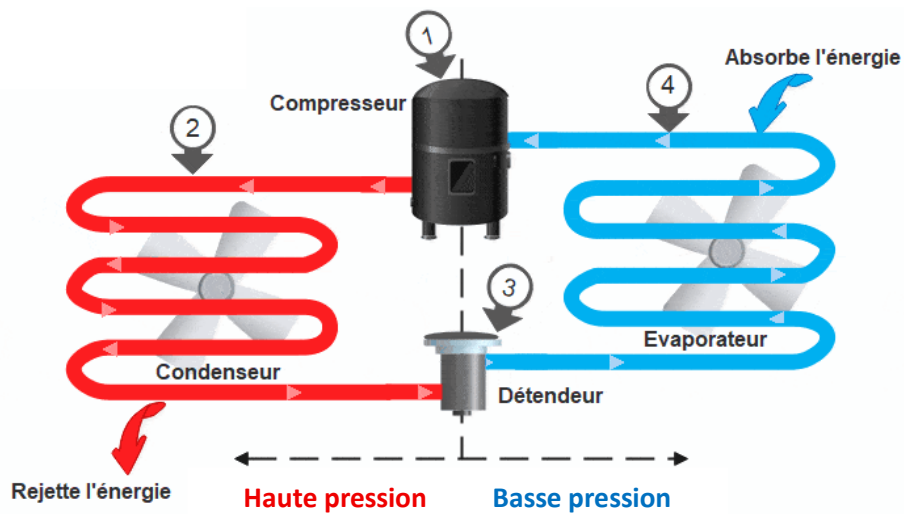


Figure 1.1: Vue d'ensemble des systèmes frigorifiques fonctionnant par cycle à compression de vapeur [2]

Le cycle de stockage et de déstockage de l'énergie passant, par exemple, de l'état liquide à l'état solide repose généralement sur un MCP.

- Phase de stockage

On apporte du froid au matériau à l'état liquide qui absorbe de l'énergie thermique. Sa température peut diminuer jusqu'à atteindre sa température de solidification.

Au moment du changement d'état, l'énergie fournie ne sert plus à diminuer la température, mais à modifier la structure du matériau (dilatation volumique). Cette énergie est alors stockée sous forme de chaleur latente.

- Passage de l'état liquide à l'état solide

Lorsque le matériau commence à se solidifier. Il libère la chaleur latente qu'il avait emmagasinée. La transformation liquide solide se fait à température presque constante. Cette étape permet de conserver ou de restituer l'énergie de manière efficace.

CHAPITRE 1 : PRINCIPES DE BASE SUR LE STOCKAGE D'ÉNERGIE PAR CHALEUR LATENTE

– Phase de déstockage

Quand on veut utiliser l'énergie stockée, on récupère la chaleur libérée lors de la solidification. Cette énergie peut ensuite être transmise à un autre milieu qui est l'air pour notre cas. Le matériau, une fois solidifié, a donc restitué une partie ou la totalité de l'énergie stockée.

Le cycle complet peut être représenté par la figure 1.2 en indiquant les différents types d'échanges thermiques.

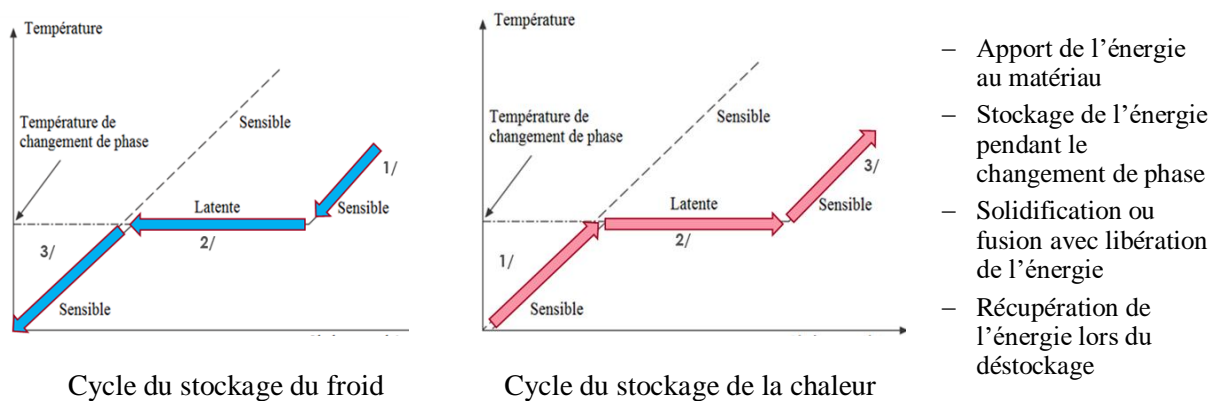


Figure 1.2: Processus de stockage et de déstockage de l'énergie [2]

Ce type de cycle est intéressant car il permet de stocker beaucoup d'énergie dans un faible volume, restituer la chaleur à température quasi constante et améliorer l'efficacité énergétique dans les systèmes thermiques.

1.4. Matériaux à changement de phase

1.4.1. Définition

On appelle matériau à changement de phase un matériau capable d'absorber ou de restituer de l'énergie thermique en passant d'un état physique à un autre, telle que la fusion ou la solidification, sans variation notable de température. Pour notre cas, si un MCP liquide est au début du cycle et qu'il se refroidit, il va :

– Perdre de la chaleur sensible d'abord

Sa température baisse sans changement d'état immédiat, tant qu'il reste au-dessus de sa température de solidification.

CHAPITRE 1 : PRINCIPES DE BASE SUR LE STOCKAGE D'ÉNERGIE PAR CHALEUR LATENTE

- Atteindre sa température de solidification
À ce moment-là, il commence à changer d'état.
- Se solidifier

Pendant la solidification, il libère de la chaleur latente vers le milieu extérieur.

- Poursuivre son refroidissement après solidification

Après solidification complète, sa température peut encore diminuer comme un matériau classique.

1.4.2. Propriétés des MCPs

Un MCP présente plusieurs caractéristiques spécifiques, le tableau 1.1 le résume.

Tableau 1.1 : Paramètres et conditions relatives au stockage et à la restitution de la chaleur latente d'un MCP

Capacité de stocker/restituer de la chaleur latente	La chaleur latente de fusion/solidification (L) est le paramètre central. Elle s'exprime en J/kg. Plus elle est élevée, plus le MCP peut stocker/restituer d'énergie pendant le changement d'état.
Température de transition	La température de changement de phase est la température à laquelle un MCP passe de l'état solide à l'état liquide, ou inversement. Elle doit être adaptée à l'application et à l'usage prévu. Pour être efficace, un MCP doit changer de phase dans la plage de température utile du système.
Densité de stockage thermique	La masse ou la densité du MCP. L'énergie stockée dépend de la quantité de matière : Énergie stockée = masse × chaleur latente.
Réversibilité et stabilité cyclique	Le matériau doit rester performant malgré le grand nombre d'alternances fusion/solidification, car toute dégradation diminue sa capacité de stockage effective avec le temps.
Bonne conductivité thermique ou améliorable	Beaucoup de MCP ont une conductivité faible, donc on peut parfois l'augmenter avec des additifs ou des structures adaptées. La conductivité thermique ne change pas la quantité de chaleur latente théorique, mais elle influence la vitesse à laquelle le MCP peut stocker/restituer cette chaleur. Une faible conductivité limite les performances pratiques.
Stockage/restitution de la chaleur sensible	En plus de la chaleur latente, le MCP stocke aussi de la chaleur sensible avant, pendant et après la transition, elle s'exprime en J/kg·K.

CHAPITRE 1 : PRINCIPES DE BASE SUR LE STOCKAGE D'ENERGIE PAR CHALEUR LATENTE

Variation de volume	Certains MCP sont recherchés pour leur faible dilatation ou contraction pendant le changement d'état.
Compatibilité, non-toxicité et sécurité d'usage	Le MCP doit être utilisable sans provoquer de corrosion, fuite ou incompatibilité avec le matériau d'encapsulation. Selon l'application, il est préférable qu'il soit non inflammable, non toxique et respectueux de l'environnement.

1.4.3. Applications des MCPs dans les systèmes frigorifiques

Les MCPs présentent de nombreuses applications, et les exemples ci-dessous n'en illustrent qu'une partie.

– Lissage des variations de température

Les MCPs permettent de réguler la température dans les chambres froides, les vitrines réfrigérées ou les caisses de transport. Ils emmagasinent l'excès de froid lorsque la température devient trop basse, puis le restituent lorsqu'elle remonte.

– Stockage de froid

Ils sont utilisés comme dispositifs de stockage du froid, permettant de conserver l'énergie frigorifique produite pendant les périodes où l'électricité est moins chère ou plus disponible.

– Réduction de la consommation énergétique

En stockant le froid, les MCPs permettent de limiter le fonctionnement continu des compresseurs, ce qui améliore l'efficacité énergétique globale des installations frigorifiques.

– Maintien de la chaîne du froid

Dans le transport de denrées périssables, les MCPs aident à maintenir une température constante pendant plusieurs heures, exemples : conteneurs isothermes, emballages alimentaires, transport pharmaceutique et livraison de produits frais ou surgelés.

– Protection contre les pics thermiques

Lors des ouvertures répétées des portes de chambres froides, les MCPs réduisent les variations brusques de température. Ils jouent le rôle d'une inertie thermique additionnelle.

CHAPITRE 1 : PRINCIPES DE BASE SUR LE STOCKAGE D'ÉNERGIE PAR CHALEUR LATENTE

– Intégration dans les équipements frigorifiques

Dans les vitrines et armoires réfrigérées, les MCPs peuvent être intégrés dans des parois ou des modules spécifiques afin de réduire les cycles du groupe froid, d'améliorer la stabilité des produits et de limiter les pertes en cas de panne électrique.

– Sécurisation lors de coupures de courant

Les MCPs prolongent l'autonomie thermique d'une installation pendant une panne. Ils offrent un temps de maintien avant que la température des produits ne monte trop.

1.5. Revue des travaux antérieurs

Les MCPs contribuent à renforcer le stockage thermique, à maintenir une température stable et à limiter les variations de charge dans les installations frigorifiques. Ils offrent la possibilité de conserver le froid pendant une certaine période, de diminuer les pics de consommation électrique et d'optimiser l'efficacité générale des systèmes de réfrigération. On les utilise notamment dans les chambres froides, les conteneurs frigorifiques, les vitrines ou armoires réfrigérées, ainsi que dans certains dispositifs de froid industriel et alimentaire.

Les vitrines réfrigérées verticales ouvertes sont des équipements énergivores clés dans les supermarchés ; des solutions innovantes sont donc nécessaires pour améliorer l'efficacité du système et la fiabilité de la température. Les progrès récents en matière de gestion thermique de ces vitrines ont mis en évidence les avantages potentiels de l'intégration des MCPs dans les conduits d'air froid. Cependant, l'étude de l'emplacement optimal et de la masse appropriée des MCPs dans ces conduits reste insuffisante.

Pei Yuan et ses collaborateurs [3] ont basé leurs travaux sur la sélection du type de MCP ainsi que sur le calcul de la masse requise, en tenant compte de la plage de températures applicable et de la charge thermique produite pendant le dégivrage périodique du système de réfrigération. L'uniformité verticale de la température des emballages alimentaires a été améliorée de 27.6 %, 21.2 % et 37.8 % sur les 1^{ère}, 3^{ème} et 5^{ème} étagères, tandis que l'uniformité horizontale a augmenté de 58.2 %, 15.9 % et 24.4%. La température moyenne des aliments réfrigérés a, quant à elle, baissé de 1.12°C.

CHAPITRE 1 : PRINCIPES DE BASE SUR LE STOCKAGE D'ÉNERGIE PAR CHALEUR LATENTE

Certains travaux [4] proposent une revue systématique approfondie des applications des MCPs dans les systèmes de réfrigération solaire. Ils classent de manière rigoureuse les méthodes de conversion de l'énergie solaire ainsi que les différentes configurations des systèmes de réfrigération, tout en détaillant les principes de fonctionnement propres à chaque système. Une analyse détaillée des composants du système est présentée, incluant les panneaux photovoltaïques, les condenseurs, les évaporateurs, les capteurs solaires, les absorbeurs et les générateurs. L'analyse examine en outre les stratégies d'intégration des MCPs avec ces composants, en évaluant l'efficacité de l'intégration et les critères de sélection des MCPs. Les paramètres physiques critiques des MCPs sont analysés comparativement, notamment la température de transition de phase, la capacité thermique latente, la chaleur spécifique, la densité et la conductivité thermique.

Grâce à leur capacité de stockage thermique très élevée, pouvant atteindre jusqu'à huit fois celle du stockage de chaleur sensible [5], les systèmes à base de MCP sont aujourd'hui largement utilisés dans de nombreuses applications de refroidissement [6].

Elsayed et al. [7] ont mené des expériences en combinant des MCPs avec des produits surgelés, en hiver comme en été. Ils ont constaté que, dans différentes conditions environnementales, l'effet optimal d'économie d'énergie était obtenu lorsque le rapport massique entre les produits surgelés et le MCP était de 5, ce qui a entraîné une augmentation de l'économie d'énergie de 12.5 % en été et de 36.5 % en hiver. À leur tour, Rahimi et al. [8] ont également montré que l'intégration de MCP dans les évaporateurs permet de réduire de manière significative la consommation énergétique, de diminuer la fréquence des démarrages et arrêts du compresseur, et de limiter les fluctuations de température au sein des unités de réfrigération.

Le condenseur est un composant essentiel des systèmes frigorifiques à compression de vapeur. Abaisser la température de condensation peut améliorer significativement le COP du système, car une température et une pression de refoulement réduites se traduisent par une consommation d'énergie du compresseur plus faible. Des études montrent que chaque réduction de 1 °C de la température de l'eau à l'entrée du condenseur peut augmenter le COP d'un refroidisseur d'environ 2 à 5 %. En

CHAPITRE 1 : PRINCIPES DE BASE SUR LE STOCKAGE D'ÉNERGIE PAR CHALEUR LATENTE

intégrant des MCPs dans le condenseur, le fluide frigorigène échange de la chaleur avec une substance capable d'absorber et de libérer de l'énergie thermique à une température relativement fixe, stabilisant ainsi l'absorption de chaleur et contribuant à maintenir un différentiel de température favorable à la condensation [9]. En pratique, l'association de MCPs au condenseur permet souvent d'améliorer sensiblement les performances du système. Par exemple, Wang et al. [10-12] ont mené des études d'optimisation approfondies sur l'intégration des MCPs dans un système de compression de vapeur. Dans leur phase initiale, ils ont comparé l'emplacement du MCP, d'une chaleur latente de 220 kJ/kg et une température de changement de phase de 21 °C, entre le compresseur et le condenseur, puis entre le condenseur et le détendeur. Cette seconde configuration a augmenté le COP du système de 8 % et a permis une baisse de température de 10 °C au niveau du détendeur. Par ailleurs, l'intégration du MCP dans le condenseur d'un réfrigérateur domestique lui a permis d'absorber la chaleur pendant le fonctionnement du compresseur et de la restituer lorsque celui-ci était à l'arrêt [13]. Des mesures expérimentales ont enregistré une baisse de 6.3 °C de la température à la sortie et une diminution de 2.3 °C au centre du condenseur, ce qui a amélioré le COP de 12 %.

Les chercheurs ont étudié diverses configurations de MCP, notamment des plaques, des lits granulaires et des géométries tubulaires, afin d'optimiser la surface d'interface et d'améliorer l'échange thermique effectif. Ces innovations visent à trouver un équilibre entre la capacité de stockage d'énergie et la réactivité thermique dans des conditions de fonctionnement dynamiques. Bista et al. [14] ont montré que l'ajout du MCP à l'évaporateur stabilisait les fluctuations de température et offrait une marge de sécurité face aux variations des charges thermiques, ce qui améliorait la stabilité opérationnelle. En ralentissant le transfert de chaleur vers le réfrigérant, le PCM atténue également la température de l'évaporateur, permettant un processus d'évaporation plus stable et plus continu. Cela réduit à son tour les variations de température dans l'ensemble du système, améliore le temps de réponse et accroît la précision du contrôle [15]. En ce qui concerne la réfrigération alimentée par l'énergie solaire, l'utilisation des MCPs dans l'évaporateur peut aider à capter et à stocker davantage de la chaleur de manière plus constante, offrant ainsi un plus grand potentiel de refroidissement. Une

CHAPITRE 1 : PRINCIPES DE BASE SUR LE STOCKAGE D'ÉNERGIE PAR CHALEUR LATENTE

étude expérimentale menée par Maiorino et al. [16] a montré que l'introduction des MCPs dans un évaporateur réduisait considérablement les gradients de température internes ainsi que les fluctuations de température des produits dans une enceinte réfrigérée, tout en prolongeant la phase d'arrêt du compresseur. Sous diverses conditions, notamment en fonction des températures ambiantes, des charges thermiques et des différents MCPs utilisés, les réfrigérateurs domestiques équipés d'évaporateurs à base de MCP ont présenté des gains de COP allant de 2 % à 74 % [17]. En 2020, Msell et al. [18] ont intégré un MCP ayant une température de changement de phase de 2 à 4 °C dans un évaporateur et ont testé expérimentalement les performances de l'évaporateur en modes de charge et de décharge ; les résultats ont montré que l'évaporateur était capable de stocker et de restituer efficacement la puissance frigorifique dans le MCP, ce qui a considérablement amélioré les performances du système et entraîné des économies d'énergie.

Enfin, dans leurs travaux publiés en 2018, Said et Hassan [19-20] ont étudié l'optimisation des performances d'une climatisation conventionnelle grâce à l'intégration de plaques de MCP avec les condenseurs. Le principe consistait à stocker le froid pendant la nuit pour améliorer le refroidissement pendant la journée, sur la base d'une approche de modélisation théorique validée expérimentalement. L'étude a mis en évidence une amélioration maximale du COP de 14 % à 35 °C pour l'air entrant et une vitesse d'air de 0.96 m/s. Par ailleurs, les configurations utilisant des plaques de MCP plus minces et plus allongées ont réduit les durées de charge et de décharge. Les auteurs ont également rapporté une puissance frigorifique maximale de 67 W/kg de MCP, ainsi que des gains de puissance par tonne de réfrigération et par kilogramme de MCP de 11.6 %, 6.7 % et 5.4 % pour des températures d'air d'entrée de 45 °C, 40 °C et 35 °C, à 0.96 m/s.

1.6. Principales limites

Les principales limites et difficultés sont généralement liées aux problèmes de compatibilité avec le système frigorifique. L'intégration des MCPs dans les évaporateurs, les vitrines ou les chambres froides peut en effet modifier les transferts

CHAPITRE 1 : PRINCIPES DE BASE SUR LE STOCKAGE D'ÉNERGIE PAR CHALEUR LATENTE

thermiques, la dynamique de régulation ainsi que les cycles de fonctionnement du compresseur. Cela peut entraîner des difficultés de conception et de contrôle.

Le cyclage thermique ainsi que la durabilité constituent de véritables défis. De nombreuses études mettent en évidence la dégradation du MCP après de nombreux cycles de fusion et de solidification, entraînant une diminution de sa capacité de stockage.

La faible conductivité thermique de nombreux MCPs constitue l'un des principaux obstacles. S'ils stockent efficacement l'énergie, ils la transfèrent néanmoins lentement. Cela ralentit les phases de charge et de décharge, et limite leur performance dans les systèmes nécessitant des échanges thermiques rapides.

Les MCPs peuvent entraîner une hausse du coût initial du système. Leur rentabilité dépend alors du contexte d'utilisation, du prix de l'énergie, du profil de charge et des économies effectivement réalisées.

Les exigences en matière de sécurité et d'environnement soulèvent des enjeux de toxicité, d'inflammabilité et d'impact écologique. Il devient donc essentiel de privilégier des matériaux plus sûrs et plus durables.

1.7. Conclusion

En conclusion, le stockage d'énergie par chaleur latente constitue une solution prometteuse pour répondre aux défis liés à la gestion efficace de l'énergie. Grâce à l'utilisation des MCPs, il permet d'emmagasiner et de restituer une grande quantité de chaleur à température quasi constante, ce qui améliore le confort thermique et l'efficacité énergétique. Cependant, son efficacité dépend du choix du matériau, de sa stabilité, de sa capacité de stockage, de la vitesse d'échange thermique et du coût global du système.

Ainsi, la maîtrise des principes de base de ce procédé est essentielle pour concevoir des dispositifs performants, durables et adaptés aux besoins domestiques et environnementaux.

La température de changement de phase et la chaleur latente sont les paramètres les plus déterminants dans le choix d'un MCP. Idéalement, ce dernier devrait avoir une

CHAPITRE 1 : PRINCIPES DE BASE SUR LE STOCKAGE D'ENERGIE PAR CHALEUR LATENTE

température de changement de phase adaptée à la plage de fonctionnement du système, ainsi qu'une chaleur latente élevée afin de maximiser le stockage d'énergie. Son intégration dans le condenseur comme dans l'évaporateur améliore certes le gradient de température nécessaire au transfert de chaleur et accroît les performances du système, mais les restrictions propres aux méthodes d'intégration existantes augmentent fréquemment la résistance thermique, provoquant une dissipation énergétique notable.

Chapitre 2

Matériels et méthode expérimentale

2.1. Introduction

Ce chapitre se focalise sur l'ensemble des matériels utilisés ainsi que la démarche expérimentale adoptée. Il constitue donc une étape essentielle, car il décrit les équipements, les instruments de mesure, les conditions de fonctionnement et le protocole expérimental mis en œuvre pour assurer la fiabilité et la reproductibilité des résultats obtenus. L'utilisation des MCPs dans ce système frigorifique peut améliorer le stockage thermique et régler plus efficacement les variations de température. Cependant, l'évaluation de leur apport réel nécessite une expérimentation rigoureuse, fondée sur une configuration bien définie du système et sur un suivi précis des grandeurs physiques caractéristiques, telles que la température, la puissance consommée et les temps de charge/décharge thermique.

La méthodologie expérimentale développée vise à quantifier l'influence des MCPs sur le fonctionnement global du système frigorifique. À cet effet, ce chapitre est organisé autour de trois volets complémentaires. Le premier présente les critères de sélection et les caractéristiques des MCPs choisis. Le second décrit les matériels expérimentaux, notamment le banc d'essai frigorifique et sa conception. Le dernier se consacre à la méthode expérimentale, en détaillant le montage, les conditions opératoires, le déroulement des essais et les paramètres étudiés. Cette présentation méthodique permet de poser les bases nécessaires à l'interprétation des résultats qui seront analysés dans le chapitre suivant.

2.2. Choix des matériaux à changement de phase

Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi deux MCPs particulièrement intéressants : l'eau et le glaciol -10 °C. Ces deux substances présentent des propriétés thermiques distinctes qui permettent d'étudier efficacement le phénomène de changement d'état et le stockage de l'énergie thermique.

L'eau, largement disponible et couramment utilisée, constitue un exemple de référence en réfrigération parce qu'elle combine une grande chaleur latente, une température de fusion adaptée, un faible coût, la sécurité et sa disponibilité [21-23].

CHAPITRE 2 : MATÉRIELS ET MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

Par ailleurs, le Glaciol, liquide de refroidissement organique à base d'éthylène glycol et offrant une protection antigel jusqu'à $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, peut également être retenu afin de limiter certains inconvénients courants des MCPs. En effet, sa température de fusion adaptée aux basses températures, sa forte capacité de stockage de chaleur latente, la stabilité de sa température lors du changement d'état, ainsi que sa bonne efficacité énergétique et son intégration aisée dans les systèmes frigorifiques en font une solution pertinente [24-29].

Les critères de sélection essentiels et les caractéristiques des MCPs choisis, mettant en lumière leurs applications potentielles, sont décrits de manière détaillée dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Critères de choix et caractéristiques des MCP sélectionnés [21-29]

Caractéristiques	Eau	Glaciol	Remarques générales
Chaleur latente de fusion	334 kJ/kg	220 à 260 kJ/kg	L'eau stocke beaucoup d'énergie lorsqu'elle passe de l'état solide à l'état liquide
Température de changement de phase	À pression atmosphérique, elle change d'état à $0\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-25\text{ à }-10\text{ }^{\circ}\text{C}$	/
Dilatation volumique	Peut atteindre 9 %	Peut atteindre 7.5 %	Forte variation de volume à la congélation
Capacité thermique massique	$4.18\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$3.3\text{ à }3.7\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	Très bonne pour l'eau et bonne pour le Glaciol pour le stockage sensible
Densité	$1\ 000\text{ kg/m}^3$	$1110\text{ à }1130\text{ kg/m}^3$	À considérer dans le stockage sensible
Conductivité thermique	Liquide	$0.4\text{ à }0.5\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	- Augmente légèrement quand la température de l'eau liquide augmente
	Solide		- Augmente lorsque la température de l'eau congelée diminue - Influence la vitesse d'échange de chaleur

2.3. Conception et principe de fonctionnement du système frigorifique

Le prototype expérimental réalisé, présenté en figure 2.1 intègre une cellule de réfrigération/congélation pouvant être équipée de 10 plaques contenant un MCP. Ces

CHAPITRE 2 : MATÉRIELS ET MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

plaques agissent comme des batteries thermiques, capables d'absorber, de stocker et de restituer l'énergie par transfert de chaleur latent lors des transitions de phase. La machine consomme en mise en marche une puissance frigorifique d'environ 500 W et est régulé par un thermostat, permettant un contrôle précis de la température dans une plage de -35 à 10 °C. Elle se base sur un cycle frigorifique conventionnel à compression de vapeur, utilisant le R134a comme fluide réfrigérant. L'ensemble est constitué d'un compresseur, d'un évaporateur, d'un détendeur et d'un condenseur.

Cette machine repose, comme l'indique la figure 2.2, sur un cycle thermodynamique destiné à transférer la chaleur de l'intérieur vers l'extérieur. Elle utilise un fluide frigorigène qui circule en boucle pour transporter la chaleur. C'est ce transfert continu qui maintient l'intérieur de la machine à basse température.



Figure 2.1 : Description générale de l'installation et schéma du fonctionnement du cycle frigorifique [30-31]

Le fluide arrive au compresseur avec une faible pression et une faible température, pour subir une compression. Cette action entraîne une hausse de sa pression et de sa température. Le gaz devient alors chaud et très comprimé (à forte pression), puis il traverse le condenseur, une grille arrière ou intégrée, qui dissipe la chaleur vers l'extérieur. Le gaz se refroidit et se condense alors à l'état liquide. Le détendeur abaisse

CHAPITRE 2 : MATÉRIELS ET MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

et fait chuter la pression du liquide, ce qui permet de le refroidir fortement avant son retour dans l'évaporateur.

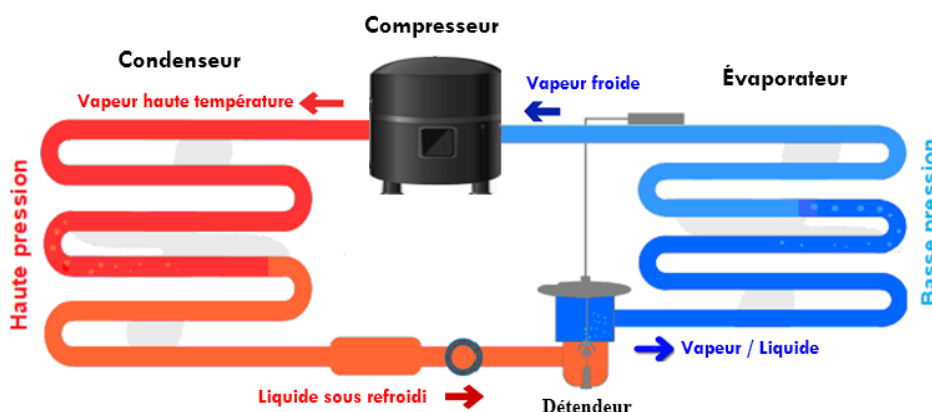


Figure 2.2 : Cycle et schéma général décrivant le fonctionnement du système frigorifique

Le liquide arrive à l'évaporateur, où il change d'état en passant de la phase liquide à la phase gazeuse. Progressivement, il se vaporise au contact de l'air qui circule autour de l'évaporateur. Autrement dit, l'évaporateur est l'élément dans lequel le fluide frigorigène capte la chaleur du milieu à refroidir. En absorbant la chaleur de l'air du milieu, il bout et passe de l'état liquide à l'état gazeux. Pour être plus précis, l'évaporation, qui correspond au deuxième changement d'état, se produit dans le fluide frigorigène. Toutefois, sur la surface de l'évaporateur, il peut se produire une condensation de l'humidité présente dans l'air ambiant.

2.4. Protocole expérimental

2.4.1. Mise en place de l'expérimentation

Les plaques MCP sont des accumulateurs de froid indispensables au maintien de la chaîne du froid en toutes circonstances. Elles peuvent absorber, stocker puis restituer de l'énergie grâce à un transfert thermique par chaleur latente. Le Glaceol contenu dans les plaques eutectiques est un liquide de refroidissement reconnu pour ses propriétés réfrigérantes et anticorrosives, avec une température de congélation de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Comme l'indiquent la figure 2.3, sa dilatation volumique maximale, mesurée à l'aide d'un récipient, atteint 2.5 % (soit 4 litres + 100 ml) lorsque la température du thermostat est

CHAPITRE 2 : MATÉRIELS ET MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

fixée à -20 °C , et 7.5 % (soit 4 litres + 300 ml) lorsqu'elle est fixée à -30 °C . Afin d'assurer une cohérence du comportement thermique, l'ensemble du montage est placé dans un environnement thermiquement stable (laboratoire) afin de minimiser les fluctuations externes. Le cycle de réfrigération fonctionne en extrayant la chaleur de l'intérieur du caisson frigorifique froid et en la rejetant vers l'environnement ambiant à température supérieure.

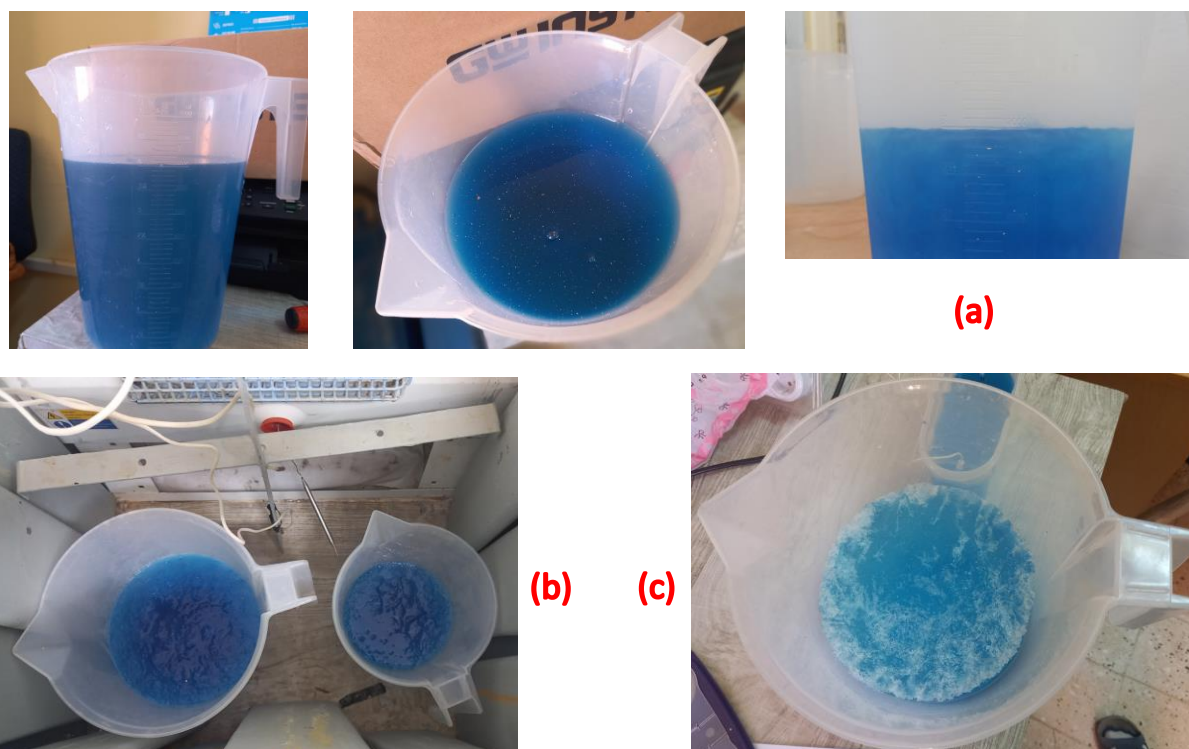


Figure 2.3 : Mesure expérimentale de la dilatation volumique du Glaceol lors de sa congélation, depuis l'état liquide initial (a) jusqu'à la congélation partielle (b) puis à l'état complètement congelé (c)

Le tableau 2.2 présente le volume de remplissage à respecter du Glaceol dans les cavités parallélépipédiques selon le niveau de la dilatation thermique. Par exemple, la cavité 1, d'un volume nominal de 1320 ml, ne doit être remplie qu'à hauteur de 1221 ml ou de 1190 ml selon la dilatation attendue. Le même raisonnement s'applique si l'on utilise de l'eau distillée au lieu du Glaceol.

Auparavant, nous avons constaté la formation des couches de glace sur une partie du circuit frigorifique (figure 2.4). Ce problème courant est dû au phénomène de condensation qui peut entraîner le développement des couches de glace. Les gouttelettes de condensation se transforment donc en glace, notamment sur les parois arrière les plus

CHAPITRE 2 : MATÉRIELS ET MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

froides. En effet, selon la littérature, 2 à 3 mm de givre ou de glaces suffisent à augmenter la consommation du réfrigérateur/congélateur jusqu'à 30%.

Tableau 2.2 : Volume du Glaceol à verser dans les plaquettes MCP de forme parallélépipédique

Référence de la plaque MCP	Volume occupé par la cavité (ml)	Volume à prévoir (ml) pour une dilatation volumique de		Volume à remplir (ml)
		2.5%	7.5%	
1	1320	1287	1221	1190
2	1240	1209	1147	1140
3	1150	1121.25	1063.75	1060
4	950	926.25	878.75	860
5	1000	975	925	900
6	1310	1277.25	1211.75	1200
7	900	877.5	832.5	800
8	980	955.5	906.5	890
9	880	858	814	800
10	990	965.25	915.75	910

Les dépenses liées à l'électricité seront ainsi plus importantes. Afin de prévenir et de corriger ces problèmes techniques, une résistance de dégivrage et une minuterie (figure 2.5) ont été intégrées pour faire fondre le givre qui se forme sur le circuit et l'évaporateur du système frigorifique.



CHAPITRE 2 : MATÉRIELS ET MÉTHODE EXPÉRIMENTALE



Figure 2.4 : Image illustrative indiquant la quantité de glace formée sur une partie du circuit frigorifique

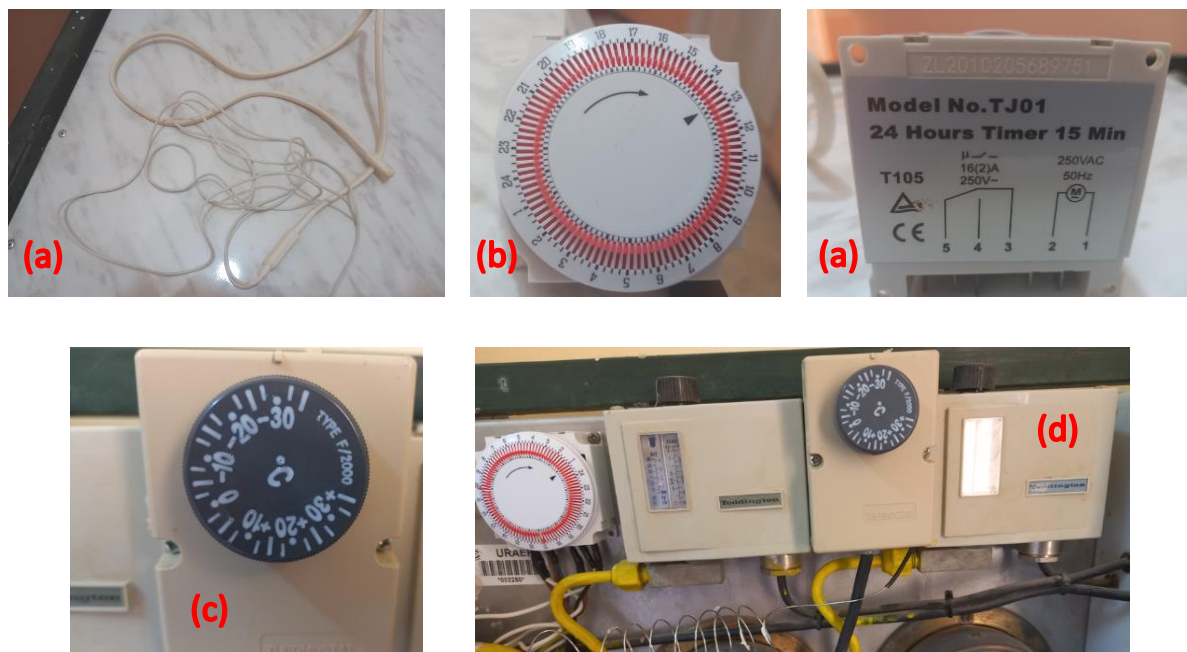


Figure 2.5 : Composants du système de dégivrage automatique. (a) Résistance de dégivrage, (b) Minuterie mécanique servant de régulateur de timing, (c) Thermostat ou module de régulation de température, (d) Système d'assemblage complet

2.4.2. Méthodes de mesure et d'analyse

Peu importe le domaine dans lequel ils sont utilisés, les appareils de mesure de température requièrent un calibrage pour maintenir une bonne précision des thermocouples. Le principe de fonctionnement d'un thermocouple repose sur deux conducteurs métalliques de nature distincte. À l'une de leurs extrémités, une soudure constitue le point chaud. Lorsqu'une variation de température intervient, une tension est

CHAPITRE 2 : MATÉRIELS ET MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

produite. L'extrémité opposée, appelée point froid, est connectée à un instrument de mesure. Certains paramètres environnementaux, tels que les atmosphères oxydantes ou soumises à des pressions, peuvent affecter le réglage de la sonde. Il est ainsi recommandé de vérifier l'ensemble des éléments du dispositif (sonde, câbles et connexions) pour assurer la qualité des mesures. Les thermocouples, en tant que capteurs analogiques, nécessitent une conversion de leur tension de sortie en température, selon la force électromotrice spécifique à chaque type (K, J, etc.). L'étalonnage vise à ajuster avec précision cette tension à la valeur thermique correspondante, afin de linéariser la courbe de réponse sur une plage donnée. Cette procédure intègre également l'environnement d'utilisation afin de prévenir les réactions chimiques et la corrosion des métaux, assurant ainsi la précision et la durabilité du capteur [32, 33].

L'étalonnage se fait le plus souvent par comparaison. Pour ce faire, la sonde à vérifier et une sonde étalon, de meilleure précision, sont placées dans un milieu stable et uniforme. Afin de mesurer la température de l'air, trois thermocouples de type K ont été installés sur l'axe vertical méridien, de 56 cm de hauteur, à des niveaux de 6, 28 et 50 cm. Le processus d'étalonnage a été mis en place à l'aide de ces thermocouples qui ont été vérifiés par comparaison avec deux autres thermocouples de référence placés dans le même environnement (figure 2.6).

Il convient de noter que les thermocouples de type K sont les plus courants et présentent la plus large plage de températures de fonctionnement. Ils sont généralement adaptés à la plupart des applications, car ils sont composés de nickel et offrent une bonne résistance à la corrosion. Le processus comporte deux étapes : l'étalonnage dans l'air à l'intérieur de l'unité de réfrigération puis l'étalonnage pendant le refroidissement lent et la solidification du Glaceol. Cette vérification croisée a confirmé l'exactitude des mesures sur différentes plages de température. La précision des thermocouples de type K utilisés dépend de la qualité de fabrication, de l'étalonnage et des conditions de fonctionnement. Cette précision peut varier selon la température mesurée. Par exemple, à des températures très élevées ou très basses, l'erreur peut être minime. Dans ces cas, l'erreur maximale de mesure est d'environ ± 0.5 %.

CHAPITRE 2 : MATÉRIELS ET MÉTHODE EXPÉRIMENTALE



Figure 2.6 : Processus d'étalonnage des thermocouples en plusieurs étapes

CHAPITRE 2 : MATÉRIELS ET MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

Les thermomètres de température intérieure représentés à la figure 2.7 sont des instruments permettant de mesurer la température à l'intérieur. Ils sont munis d'un écran numérique affichant la température en °C ou en °F.

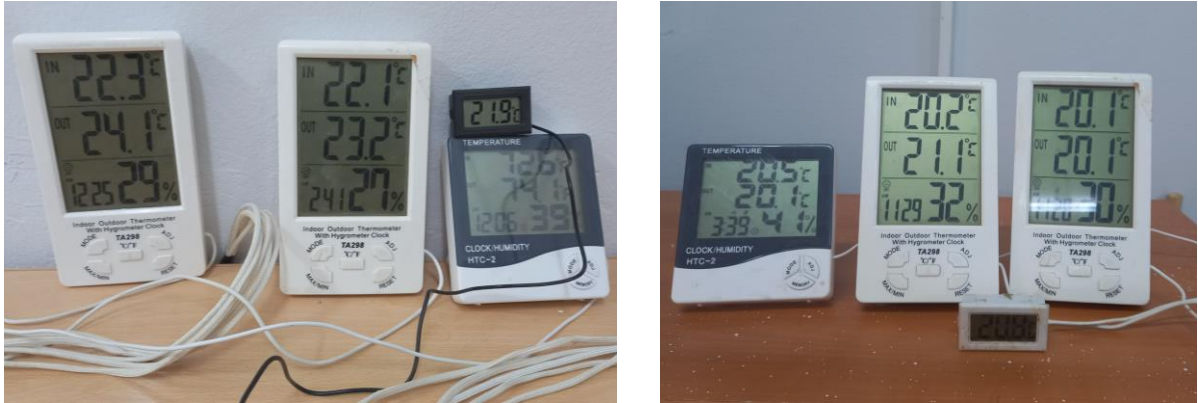


Figure 2.7 : Thermomètres numériques destinés au processus d'étalonnage

L'appareil d'acquisition des mesures et des données est de type "Consort T8710", comme l'illustre la figure 2.8. Il sert à mesurer, enregistrer, afficher et visualiser les grandeurs physiques issues de capteurs ou d'entrées.



Figure 2.8 : Instrument d'acquisition de mesures et de données "Consort T8710"

Les données seront exportées par transmission vers un PC, un réseau ou un système de supervision. Elles communiqueront donc avec un ordinateur ainsi qu'avec un logiciel de supervision et d'enregistrement (figure 2.9).

CHAPITRE 2 : MATÉRIELS ET MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

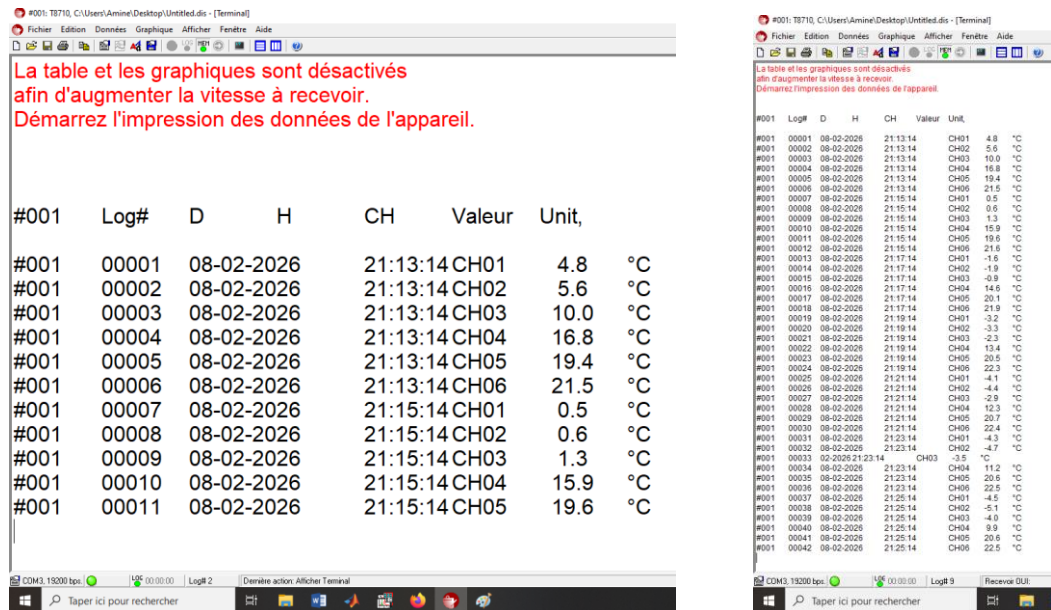


Figure 2.9 : Interfaces illustrant le logiciel de supervision et d'enregistrement, compatible avec l'acquisition de données du modèle "Consort T8710"

Un compteur numérique de puissance a également été utilisé pour mesurer et afficher la puissance électrique consommée ou produite par un système. En plus de la puissance électrique instantanée consommée, l'écran d'affichage numérique indique la tension (220 V), le courant (A) et l'énergie consommée (kWh) conformément à la figure 2.10 ci-dessous.



Figure 2.10 : Photo du compteur numérique de puissance

2.5. Outils et logiciels utilisés

Dans le cadre de ce mémoire, plusieurs outils et logiciels ont été adaptés afin de mener à bien les différentes étapes d'analyse et de mise en œuvre. En effet, le choix des

environnements de développement, des plateformes de traitement, des logiciels d'analyse ainsi que des outils de visualisation s'avère essentiel pour garantir la qualité, la fiabilité et la reproductibilité des résultats obtenus. Chaque outil a sa propre utilité dans la conduite du travail scientifique. Les logiciels retenus ont été sélectionnés en fonction de leur pertinence par rapport aux besoins du travail, de leur performance, de leur compatibilité ainsi que de leur facilité d'utilisation.

2.5.1. Ajustement des courbes et de données

L'objectif de cette démarche est de déterminer une courbe représentative des données mesurées. Cette approche, connue sous le nom de régression, peut être réalisée à l'aide de Microsoft Excel ou de Matlab. Nous avons, quant à nous, privilégié Matlab pour sa grande précision et ses fonctionnalités avancées. Mathématiquement, une méthode de régression sert à modéliser la relation entre une variable à expliquer et une ou plusieurs variables explicatives. On mesure souvent la performance et la qualité de l'ajustement avec l'erreur quadratique moyenne ou bien le coefficient de détermination. Le modèle apprend une formule ou une fonction qui approxime cette relation. La régression n'est pas forcément linéaire, les types les plus courants sont la régression linéaire qui est une relation approximée par une droite et la régression polynomiale qui est une courbe plus flexible d'une forme polynomiale.

Le coefficient de détermination d'une régression, noté R^2 , mesure la proportion de la variance de la variable dépendante expliquée par le modèle. Sa formule mathématique est donnée par :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

x_i est par définition la valeur observée ou mesurée, \hat{x}_i est la valeur prédite par le modèle, \bar{x} représente la moyenne des valeurs observées mesurées, n le nombre d'observations.

2.5.2. Microsoft Excel

Tout d'abord Microsoft Excel joue un rôle important dans le filtrage et le traitement des données, il aide à transformer les données brutes en informations exploitables. Il permet essentiellement d'organiser les données dans des tableaux clairs,

CHAPITRE 2 : MATÉRIELS ET MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

filtrer les informations pour n'afficher que les lignes correspondant à certains critères, trier les données selon un ordre numérique précis, nettoyer et corriger les données. Cette étude repose sur un filtrage automatique, offrant la possibilité de filtrer rapidement une colonne en fonction d'une valeur, d'un texte, d'un nombre ou d'une date.

2.5.3. Matlab

Matlab R2016b est à la fois un environnement de calcul numérique et un langage de programmation principalement destiné aux calculs mathématiques et scientifiques, à l'analyse de données, à la représentation graphique, à la modélisation, à la simulation de systèmes et à la création d'algorithmes. Pour notre étude, il a servi d'outil central afin de réaliser les calculs, assurant une analyse rapide et fiable des performances du système.

2.5.4. Origin

L'outil "Origin 6.0" a occupé une place essentielle dans l'analyse des résultats expérimentaux, en particulier grâce à la production de représentations graphiques détaillées. Il a permis de générer des courbes thermiques illustrant l'évolution de la température au cours du temps, facilitant ainsi une analyse visuelle approfondie et une meilleure compréhension du comportement des matériaux lors des cycles de charge et de décharge thermiques.

2.6. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter l'ensemble des matériels utilisés et de manière brève la méthodologie expérimentale adoptée. Le choix des MCPs et les instruments de mesure a été effectué de façon à garantir la fiabilité, la reproductibilité et la pertinence des résultats obtenus. L'approche expérimentale mise en place a également permis d'établir un cadre rigoureux pour l'analyse des performances thermiques du système, notamment en ce qui concerne le comportement des MCP au sein du dispositif frigorifique. La description précise du banc d'essai, des paramètres suivis et des procédures de mesure constitue une base essentielle pour l'interprétation des résultats présentés dans le prochain chapitre.

Chapitre 3

Résultats expérimentaux, analyses et discussions

3.1. Introduction

Ce chapitre présente les résultats issus de l'expérimentation du système frigorifique fonctionnant à stockage d'énergie par chaleur latente. L'objectif principal est d'évaluer les performances thermiques du système, son comportement en fonctionnement réel, ainsi que l'influence du MCP sur l'amélioration de l'efficacité frigorifique et la réduction des variations de température. Les essais réalisés ont permis de collecter un ensemble de données relatives aux paramètres de fonctionnement du système, notamment l'évolution des températures, les temps de charge et de décharge thermique, la capacité observée du stockage, ainsi que l'impact du stockage latent sur la stabilisation du régime frigorifique. L'analyse de ces résultats vise à mettre en évidence les avantages, les limites et les éventuelles contraintes de mise en œuvre du système expérimental.

Les mesures obtenues sont d'abord présentées de manière structurée, puis interprétées à travers des comparaisons, des calculs de performance et des analyses comportementales. Enfin, une discussion est menée afin de confronter les résultats expérimentaux aux attentes théoriques et de dégager des conclusions pertinentes sur l'efficacité du système frigorifique à stockage latent.

3.2. Évolution des différentes températures au sein du système frigorifique

La première expérience examine d'abord le comportement du système frigorifique en fonctionnement classique, sans MCP, du point de vue de la température. Les profils correspondants sont présentés sur la figure 3.1.

Les courbes verte, bleu et rouge correspondent aux températures relevées dans la chambre de refroidissement. Elles mettent en évidence des variations au sein du refroidisseur, signe d'un fonctionnement non-uniforme. La courbe noire, qui représente la température moyenne du laboratoire, montre une grande stabilité de l'environnement extérieur, autour de 22.56 °C. Les relevés attestent que l'expérience a été conduite dans des conditions idéales, et que les variations de température interne résultent uniquement des performances du système de refroidissement. Au bout

CHAPITRE 3 : RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX, ANALYSES ET DISCUSSIONS

d'environ 9 heures, l'ensemble des courbes présente une évolution presque constante, traduisant un état d'équilibre thermique du système.

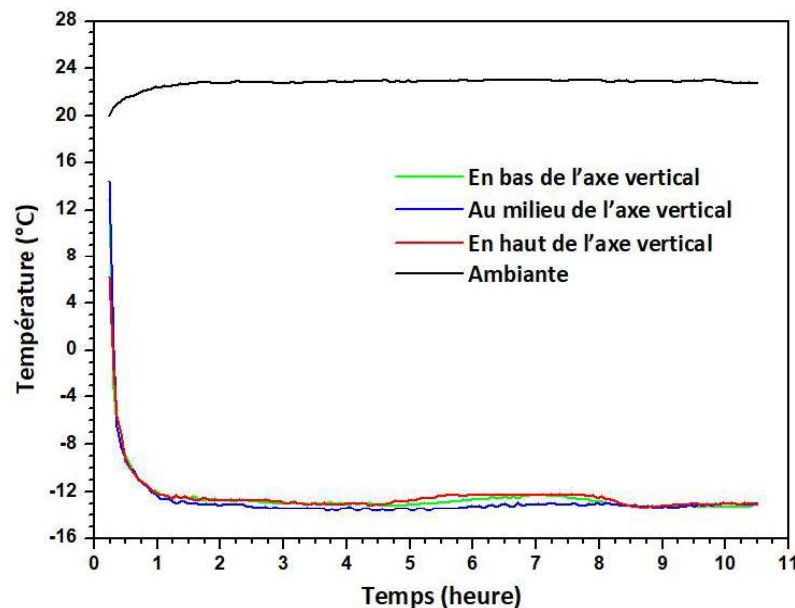


Figure 3.1 : Températures de l'air à l'intérieur et à l'extérieur de la machine frigorifique, $T_{\text{Thermostat}} = -35\text{ }^{\circ}\text{C}$

Par ailleurs, la stratification de l'air, c'est-à-dire la répartition de l'air en couches selon sa température, sa densité ou son humidité, n'est pas observée tout au long du cycle. Cela semble constituer un point positif, car la stratification peut limiter le mélange et freiner le brassage de l'air, provoquer des zones froides et altérer la qualité de l'air.

L'étape suivante consiste à mettre en place les plaques du MCP à l'intérieur de la cellule. Les cavités sont remplies d'eau, en tenant compte des variations de volume liées aux dilatations. Les températures mesurées correspondantes sont présentées sur la figure 3.2. Les résultats relatifs au MCP révèlent trois phases distinctes :

- Refroidissement par chaleur sensible

Chute rapide de la température de sa valeur initiale $16.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

- Phase de stabilisation de sa température liée au transfert thermique par chaleur

Une période prolongée de stabilité de la température a été observée, maintenue près de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, entre $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ entraînant la solidification (congélation) de l'eau. Cette stabilité correspond à la chaleur latente de l'eau ; son état physique passe de liquide à solide sans variation de température. Cette phase a duré environ 5 heures et 6 minutes.

- Refroidissement à l'état solide

CHAPITRE 3 : RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX, ANALYSES ET DISCUSSIONS

Une fois la congélation achevée, la température a poursuivi sa baisse jusqu'à atteindre environ $-11.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ et ne peut plus cette fois-ci libérer de chaleur latente. Pour l'air, la température en fin de cycle s'est établie à $-13.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

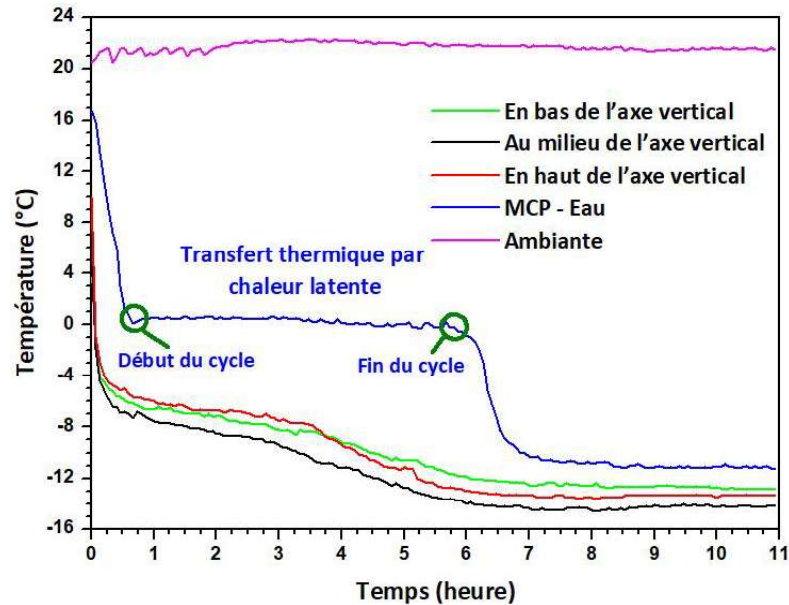


Figure 3.2 : Températures à l'intérieur et à l'extérieur de la machine frigorifique, le cas de l'eau en tant que MCP, $T_{\text{Thermostat}} = -35\text{ }^{\circ}\text{C}$

La courbe rose, représentant la température du laboratoire et des instruments, indique un environnement extérieur, remarquablement stable à $21.69\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La vitesse de refroidissement de l'air présent dans la cellule est très élevée et se manifeste immédiatement après la mise en marche de la machine. Elle est estimée à $81.87\text{ }^{\circ}\text{C}$ par heure. À l'inverse, l'eau se refroidit plus lentement, du fait de sa grande capacité à emmagasiner le froid. Sa baisse correspond à une vitesse évaluée à $29.67\text{ }^{\circ}\text{C}$ par heure.

Ces relevés montrent que l'eau agit comme une sorte de "batterie de froid", protégeant le réfrigérateur des variations de température et lui permettant de rester au frais plus longtemps en cas de coupure de courant.

Dans un autre contexte, lorsque le Glaciol à $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ est utilisé comme matériau MCP, comme l'illustre la figure 3.3, on observe principalement que :

- Il se solidifie à $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, qui correspond à sa température de changement de phase
- Il peut emmagasiner une grande quantité d'énergie frigorifique sans variation notable de température durant la transition solide/liquide

CHAPITRE 3 : RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX, ANALYSES ET DISCUSSIONS

- Il joue le rôle d'une "batterie de froid" autour de -10 °C , en limitant les fluctuations de température.

Les mêmes observations de celles de la figure 3.2 s'appliquent également à la vitesse de refroidissement.

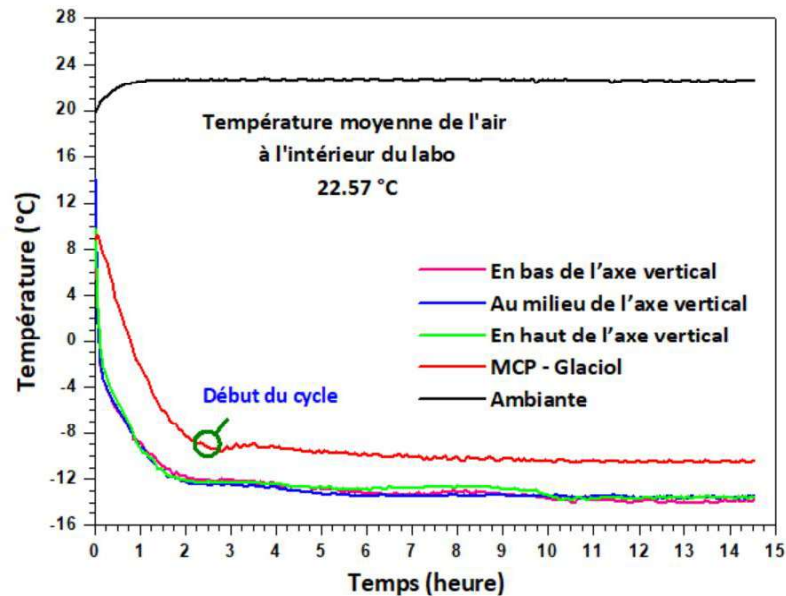


Figure 3.3 : Températures à l'intérieur et à l'extérieur de la machine frigorifique, le cas du glaciol en tant que MCP, $T_{\text{Thermostat}} = -35\text{ °C}$

Si la température passe en dessous de -10 °C , il reste à l'état solide et ne peut plus libérer de chaleur latente. Cette situation ne se produit pas, car la machine a déjà atteint sa performance maximale, ce qui permet au MCP de maintenir la température autour de -10 °C pendant une très longue durée. Au-delà de -10 °C , il se met à fondre tout en absorbant de la chaleur. Concrètement, le Glaciol à -10 °C est donc principalement utile pour conserver une température voisine de -10 °C ou pour stabiliser un système dans cette zone.

3.3. Dégivrage électrique par résistance chauffante

On appelle dégivrage l'opération qui consiste à enlever le givre accumulé pour permettre au système frigorifique de fonctionner correctement et avec efficacité. En présence d'humidité dans l'air, celle-ci peut se transformer en condensation puis se solidifier sur les parties très froides du système, en particulier dans les chambres froides, les congélateurs et les évaporateurs. Cette action s'avère plus que nécessaire,

CHAPITRE 3 : RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX, ANALYSES ET DISCUSSIONS

le givre entraînant une baisse des échanges thermiques, une diminution des performances du groupe frigorifique, une hausse de la consommation électrique, ainsi que des risques de gêne pour la circulation de l'air et peut même endommager le matériel à long terme. Le dégivrage peut être réalisé de différentes manières : par résistances chauffantes dans le cas du dégivrage électrique, par gaz chaud à l'aide d'un fluide chaud du circuit, par arrêt du compresseur en laissant le givre fondre naturellement, ou encore par eau sur certains équipements.

Le temps nécessaire pour assurer un dégivrage électrique dans un système frigorifique n'est pas fixé : il dépend de la puissance des résistances de dégivrage, la quantité de givre accumulée, la température initiale, la taille et la conception de l'évaporateur, le débit d'air et les conditions ambiantes et le réglage du thermostat ou de la sonde de fin de dégivrage. En pratique, un dégivrage électrique dure souvent de 10 à 30 minutes pour de nombreux petits et moyens systèmes, parfois plus sur des installations plus grosses ou très givrés. Le principe de calcul est très simple, on estime le temps de dégivrage par le rapport de l'énergie nécessaire pour faire fondre le givre sur la puissance de chauffe effective des résistances.

Deux scénarios ont été testés dans cet exemple : la résistance de dégivrage a été activée toutes les 3 heures, et dans le second, toutes les 6 heures. Selon la figure 3.4-a-, la température interne du dispositif de refroidissement augmente significativement lorsque la résistance est activée, atteignant ou dépassant -4 °C . On observe également que la chute de température qui s'ensuit est importante, soumettant le dispositif à fournir un effort supplémentaire pour compenser les pertes. La température de l'air à l'intérieur du compartiment réfrigéré fluctue aux alentours de 9.89 °C .

L'intégration du MCP permet d'amortir ces fluctuations, elles s'atténuent jusqu'à environ 6.76 °C . On constate une chute brutale de la température, atteignant un minimum de -13.35 °C , puis remonte respectivement à -4 °C , -5.1 °C et -7.5 °C du premier au troisième cycle. Les relevés indiquent que les températures du MCP n'atteignent pas la température de congélation du glaciol. D'après la courbe rouge de la figure 3.4-b-, ce MCP est d'abord moins sensible à la résistance électrique, grâce à sa capacité à maintenir le froid, ce qui se traduit par des fluctuations nettement inférieures à celles de l'air. La courte durée du programme de dégivrage limite et

CHAPITRE 3 : RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX, ANALYSES ET DISCUSSIONS

entrave la diminution de la température du MCP jusqu'à sa température de solidification. Cette durée trop brève ne permet pas d'atteindre la capacité totale de stockage du MCP par chaleur sensible.

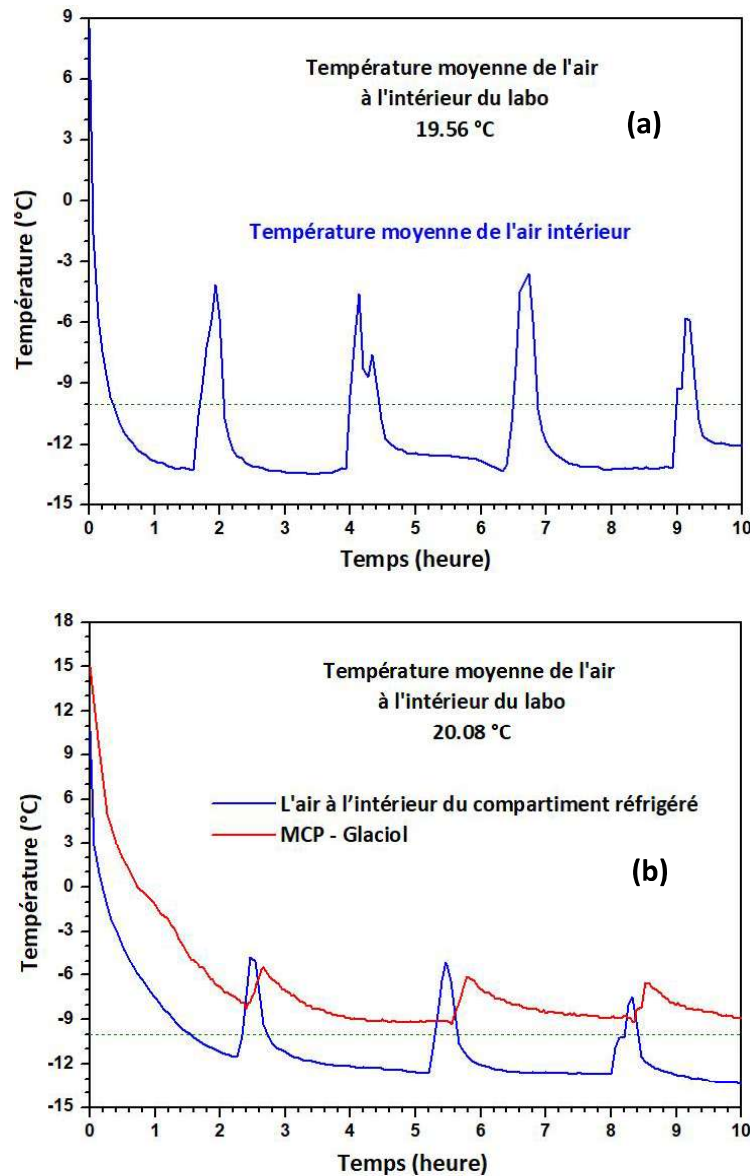


Figure 3.4 : Température à l'intérieur de la machine frigorifique : thermostat réglé à $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$, activation de la résistance de dégivrage, avec et sans MCP, toutes les 3 heures.

Les résultats obtenus, correspondant à une résistance de dégivrage activée toutes les 6 heures, sont plus favorables et plus intéressants. Le transfert thermique par chaleur latente dans le MCP aura lieu approximativement 6 heures après le démarrage de la machine (voir figure 3.5). L'atténuation des variations de température de l'air et la stabilisation de la température du MCP, lorsque la résistance de dégivrage est coupée, constituent des indicateurs clés des phénomènes physiques en jeu. Lorsque la

température du MCP se stabilise, l'air intérieur se stabilise également de manière systématique.

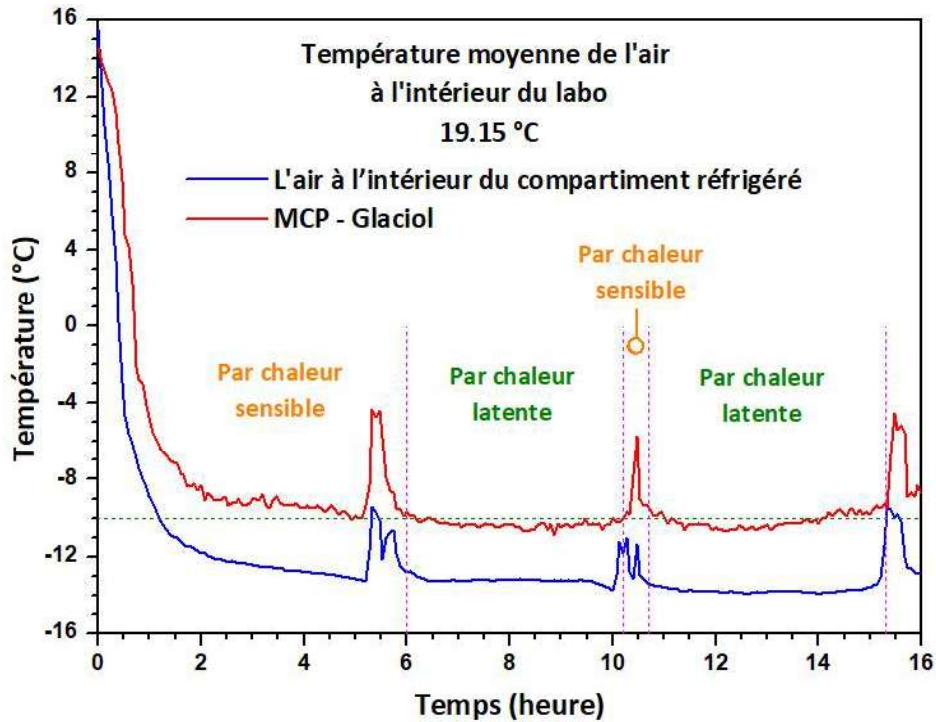


Figure 3.5 : Température à l'intérieur de la machine frigorifique : thermostat réglé à -35 °C , activation de la résistance de dégivrage, avec et sans MCP, toutes les 6 heures.

Si les mesures se poursuivent pendant plusieurs jours sans incident technique, les conditions de fonctionnement finiront par lisser et uniformiser progressivement les températures jusqu'à atteindre une stabilisation complète.

3.4. Dysfonctionnement technique avec endommagement

Les deux courbes de la figure 3.6, illustrant l'évolution de la température au cours du temps et comparant les performances du système avec et sans MCP, peuvent être réparties en trois phases :

- Refroidissement : en l'absence de MCP, la température diminue rapidement ; en revanche, en présence de MCP, cette baisse est plus progressive en raison des échanges thermiques par chaleur sensible entre l'air et le MCP.
- Stabilité : dans les deux cas, la température se maintient entre -13 °C et -14.5 °C , avec une stabilité plus marquée dans le second cas.

CHAPITRE 3 : RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX, ANALYSES ET DISCUSSIONS

- Remontée de température : dans la première configuration, la température commence à augmenter dès l'apparition des couches de glace (début de formation de givre), soit après 13 heures et 10 minutes de fonctionnement. Dans la seconde configuration, elle demeure basse plus longtemps avant de reprendre sa hausse après 21 heures et 15 minutes.

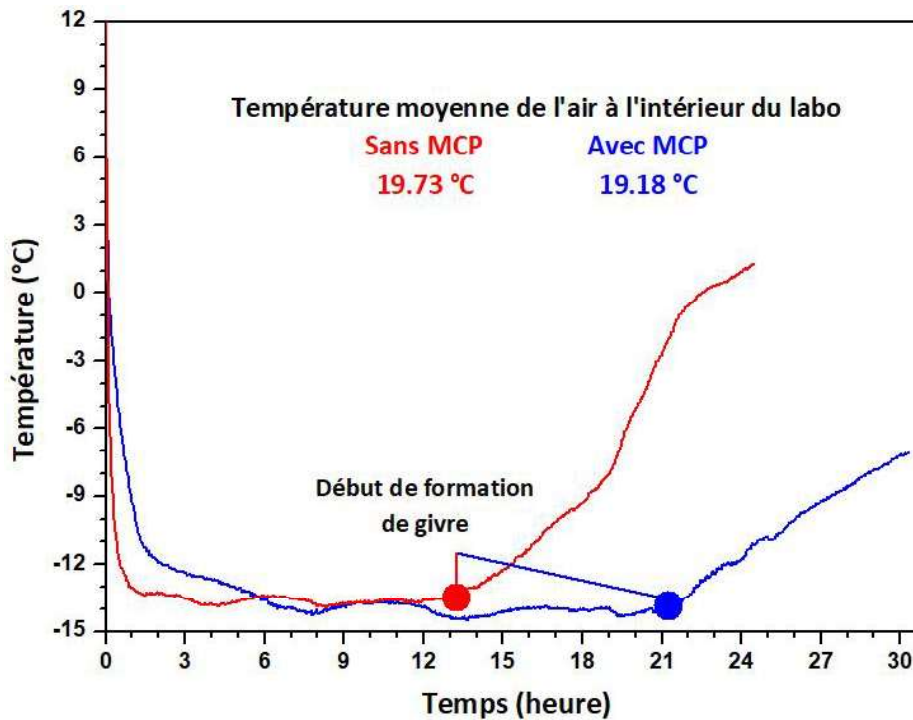


Figure 3.6 : Température à l'intérieur de la machine frigorifique : cas d'un thermostat réglé à -35 °C

Il ressort que le MCP prolonge le refroidissement de plusieurs heures supplémentaires et empêche les hausses brutales de température, car la pente de la courbe est nettement plus faible. La figure 3.7 permet de visualiser la consommation électrique cumulée prédite du système frigorifique au fil du temps, à partir des valeurs consignées dans le tableau 3.1.

Le graphique illustrant l'évolution de la consommation d'électricité en fonction du temps montre qu'au départ, la courbe bleue se situe au-dessus de la courbe rouge, puis la tendance s'inverse au fil du temps. L'écart entre les deux courbes s'accroît à partir d'environ 10 heures et 27 minutes. Par exemple, au bout de 100 heures, la consommation sans MCP dépasse 40 kWh, alors qu'avec un MCP, elle reste inférieure à 38 kWh. Cela s'explique par le fait qu'un système doté d'un MCP consomme moins d'énergie pour réaliser la même fonction sur un même laps de temps.

CHAPITRE 3 : RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX, ANALYSES ET DISCUSSIONS

Tableau 3.1 : Valeurs mesurées de la consommation électrique cumulée du système frigorifique, cas d'un thermostat réglé à -35 °C

Sans matériaux à changement de phase		Avec matériaux à changement de phase	
Temps	Énergie électrique cumulée kWh	Temps	Énergie électrique cumulée kWh
00 h : 00 mn	0	00 h : 00 mn	0
04 h : 19 mn	1.783	01 h : 20 mn	6.450
07 h : 53 mn	3.206	02 h : 52 mn	1.286
11 h : 01 mn	4.469	05 h : 13 mn	2.239
21 h : 41 mn	8.752	07 h : 12 mn	3.031
23 h : 20 mn	9.423	22 h : 59 mn	9.297
24 h : 55 mn	10.140	25 h : 24 mn	10.230
25 h : 58 mn	10.640	27 h : 36 mn	11.070
27 h : 25 mn	11.370	29 h : 37 mn	11.850
		30 h : 49 mn	12.070

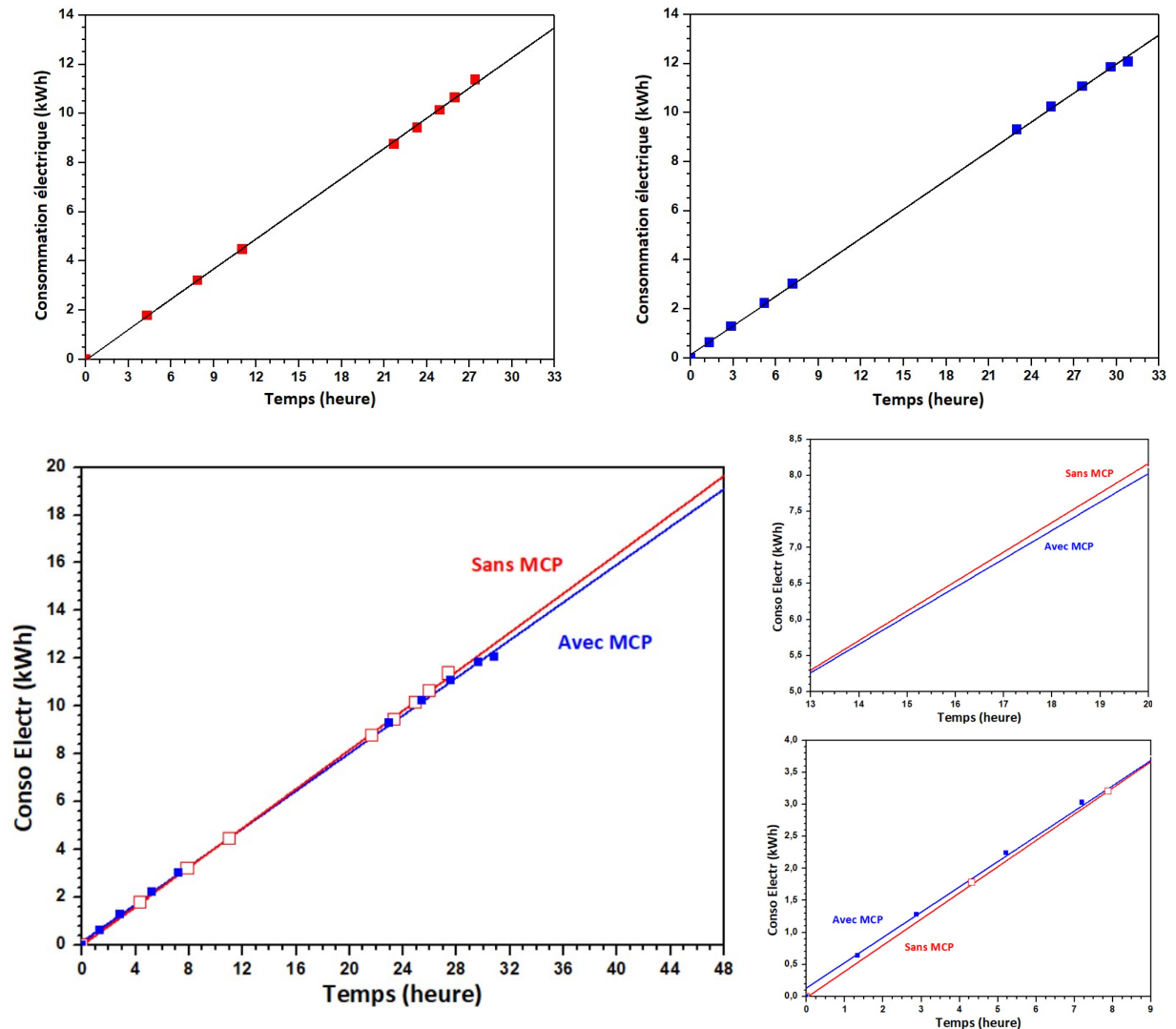


Figure 3.7 : Consommation électrique cumulée prédite du système frigorifique, avec vues zoomées, cas d'un thermostat réglé à -35 °C

CHAPITRE 3 : RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX, ANALYSES ET DISCUSSIONS

La figure 3.8 met en évidence l'évolution du pourcentage d'économies d'énergie. On constate qu'elle commence par des valeurs négatives, ce qui signifie que le système intégrant la technologie MCP consomme davantage d'énergie qu'un système classique, mais avec une pente plus faible. Une fois, l'écart devient nul, indiquant une consommation identique pour les deux systèmes, la courbe poursuit sa progression en affichant des valeurs positives, montrant ainsi que la technologie MCP a contribué à réduire la consommation. Ce processus se déroule en deux phases :

- Une phase de charge durant laquelle le système passe d'un état de perte à un état de gain.
- Phase de stabilisation qui correspond à un retour à l'équilibre avec un niveau d'économies plus stable.

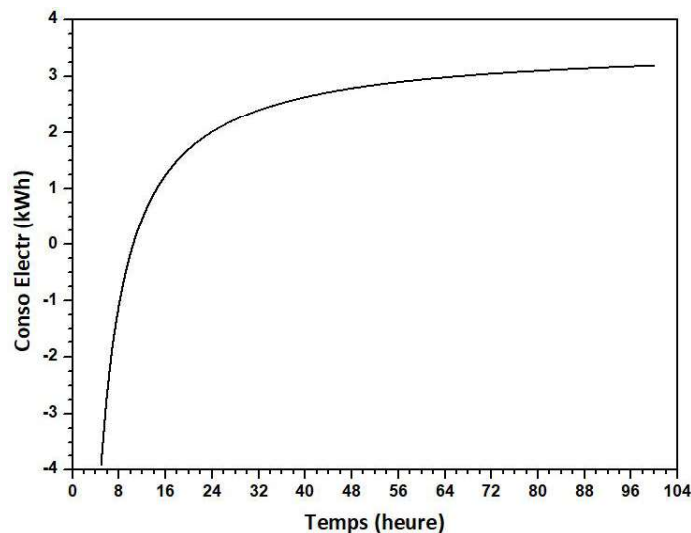


Figure 3.8 : Économies d'énergie cumulées induites par l'intégration du MCP, cas d'un thermostat réglé à -35 °C

3.5. Énergie électrique cumulée consommée par la machine frigorifique

Nous allons tout d'abord examiner le tableau 3.2 et la courbe (figure 3.9) des valeurs décrivant la relation entre la température du thermostat et la consommation d'électricité.

Les mesures montrent que cette variation est linéaire et inversement proportionnelle. Autrement dit, plus la température de fonctionnement du système est faible, plus sa consommation électrique est importante, évaluée à 9.0249 Wh/°C.

CHAPITRE 3 : RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX, ANALYSES ET DISCUSSIONS

Tableau 3.2 : Consommation électrique de la machine frigorifique en fonction de la température du thermostat, sans MCP, pour une température ambiante de laboratoire voisine de 22 °C.

Température du thermostat °C	Consommation électrique kWh par heure
0	0.1597
-2.5	0.1739
-5	0.1891
-7.5	0.2082
-10	0.2104
-15	0.2680
-17.5	0.3162
-20	0.3329
-25	0.3752
-30	0.4163

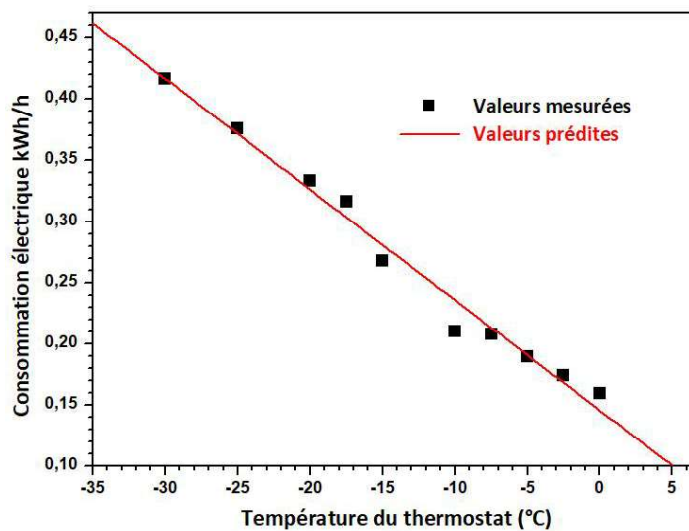


Figure 3.9 : Variation de la consommation électrique de la machine en fonction de la température du thermostat, sans MCP, pour une température ambiante de laboratoire voisine de 22 °C.

D'autre part, l'intégration de l'eau comme MCP dans le compartiment réfrigéré, entraînera un changement des résultats. Le tableau 3.3 ainsi que la courbe de la figure 3.10 montrent alors que la consommation d'énergie électrique se différencie selon trois zones et phases.

CHAPITRE 3 : RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX, ANALYSES ET DISCUSSIONS

Tableau 3.3 : Consommation électrique de la machine frigorifique en fonction de la température du thermostat, avec MCP, pour une température ambiante de laboratoire voisine de 22 °C.

	Température du thermostat (°C)	Consommation électrique kWh par heure
État liquide	0	0.1216
	-2.5	0.1601
	-5	0.1823
État liquide, début de la solidification	-7.5	0.2154
Changement de phase	-8.5	0.2180
	-9	0.2112
	-10	0.2156
	-11	0.2236
État solide	-12.5	0.2650
	-15	0.3078
	-20	0.3501
	-25	0.4291

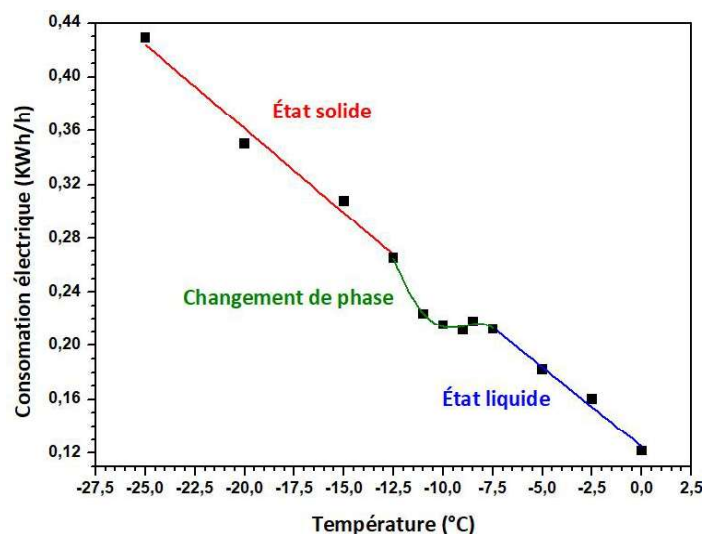


Figure 3.10 : Variation de la consommation électrique de la machine en fonction de la température du thermostat, avec MCP, pour une température ambiante de laboratoire voisine de 22 °C.

– Zone 1 (ligne bleue) : comprise entre -7.5 °C et 0 °C

On observe une évolution linéaire et inversement proportionnelle de la consommation, passant de 0.213 à 0.125 kWh/h lorsque la température du thermostat augmente. Dans cet intervalle, le refroidissement du MCP liquide est principalement dû aux transferts de chaleur sensible, donc essentiellement à la convection. Le système

CHAPITRE 3 : RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX, ANALYSES ET DISCUSSIONS

utilise donc de l'énergie pour conserver la température souhaitée. Le MCP reste sous forme liquide, ce qui empêche le déroulement du cycle de charge et de décharge lié au changement d'état. Les avantages du MCP ne sont alors pas exploitables.

– Zone 2 (ligne verte) : allant de -12.5 °C à -7.5 °C

La courbe présente un changement de pente à -7.5 °C , puis un point d'inflexion à partir de -8.2 °C , suivi d'une stabilisation de la consommation autour de -10.5 à -11 °C . Ainsi, cet intervalle constitue une plage favorable, propice à une réduction de la consommation électrique grâce aux échanges thermiques par chaleur latente. Le changement de phase signifie que le matériau (eau) absorbe ou libère de l'énergie potentielle à 0 °C . Par conséquent, la consommation n'augmente pas, car le matériau aide à maintenir une température interne stable. Au-delà de 11 °C , ce mode de transfert demeure présent, mais avec une intensité décroissante et de façon de moins en moins marquée, jusqu'à sa disparition totale, lorsque l'on atteint approximativement la température de consigne du thermostat de 12.5 °C .

– Zone 3 (ligne rouge) : plage de température comprise entre -35 °C et -12.5 °C

La courbe retrouve sa linéarité initiale, la consommation passe de $0,42$ à $0,265\text{ kWh/h}$ lorsque la température du thermostat augmente. Dans cette plage, le refroidissement du MCP en état solide est principalement lié aux transferts thermiques par chaleur sensible, c'est-à-dire par conduction. Le système consomme alors de l'énergie pour maintenir la température de consigne. Le MCP demeure à l'état solide, si bien que le cycle de charge et de décharge lié au changement d'état n'a pas lieu. Dans ce cas, les avantages du MCP ne peuvent pas être exploités.

3.6. L'effet de la température du labo sur l'énergie électrique consommée

Naturellement, la température du labo influence directement l'énergie électrique cumulée consommée par une machine frigorifique. Plus la température du labo est élevée, plus la machine doit extraire de chaleur pour maintenir la consigne. Donc le compresseur fonctionne plus longtemps et/ou plus intensément, et par conséquent, l'énergie électrique cumulée augmente. Lorsque l'air ambiant du labo est plus chaud, ces apports augmentent, donc la machine consomme davantage. Si la température

baisse, l'écart entre la température ambiante et la température visée diminue. La machine a donc moins de travail à fournir, la consommation cumulée sera diminuée.

La figure 3.11 illustre le lien entre la température ambiante et la consommation d'énergie électrique. On observe une relation linéaire entre la température et la consommation ; ainsi, une augmentation de 5 °C a permis presque de doubler la consommation, laquelle est passée de 0.1205 à 0.2214 kWh/h.

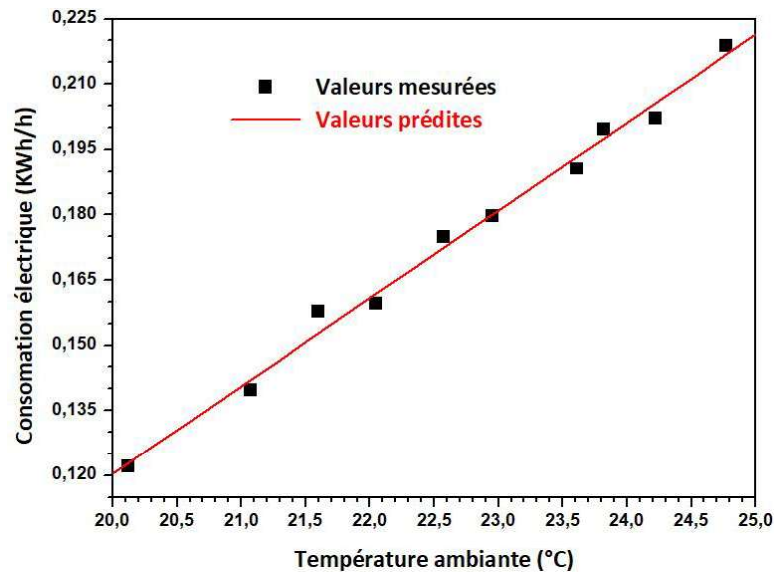


Figure 3.11 : Consommation d'énergie électrique en fonction de la température de labo de la machine frigorifique : cas d'un thermostat réglé à 0 °C

En plus des apports dus à l'ouverture de la porte, aux infiltrations et aux pertes thermiques, la machine frigorifique doit compenser les apports thermiques du milieu, notamment les échanges avec l'air ambiant.

3.7. Économies réalisées sur la consommation d'électricité

Cette section est consacrée à une campagne de mesures visant à étudier les conditions permettant de diminuer l'énergie électrique cumulée consommée par cette machine frigorifique. On évaluera dans quelle mesure il s'intègre bien dans le système. Deux tableaux récapitulatifs sont proposés à cet effet : le premier (tableau 3.3) concerne l'eau en tant que MCP, et le second (tableau 3.4) le glaciol.

D'après les statistiques figurant dans les tableaux, le MCP accumule du froid pendant le fonctionnement de la machine, puis le restitue plus tard. Par conséquent, la machine compresse moins fréquemment ou avec une intensité moindre. Des

CHAPITRE 3 : RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX, ANALYSES ET DISCUSSIONS

économies d'énergie électrique sont possibles si la température de changement de phase est correctement choisie. Le MCP doit changer d'état à une température proche de la température utile du stockage frigorifique. Il doit être aussi placé de manière à échanger efficacement la chaleur, avoir une bonne conductivité thermique et ne pas créer de pertes importantes. Si la température de fusion/solidification est mal choisie, le MCP ne se charge/décharge pas correctement. Cette situation peut engendrer une surconsommation sous des mêmes conditions opératoires.

Après de nombreux tests sans activer la résistance de dégivrage, nous en avons écarté certains en raison du problème de givre. Le thermostat peut ne pas détecter correctement la température ambiante, ce qui peut entraîner un fonctionnement inefficace du système, avec des cycles de marche/arrêt inappropriés. Si le thermostat ne fonctionne pas donc correctement ou si le système de dégivrage est défaillant, la glace peut s'accumuler, ce qui aggrave encore le problème.

Tableau 3.4 : Potentiel d'économies d'électricité lié au choix de l'eau comme MCP

Température du thermostat Par °C	Sans MCP		Avec MCP		Économie (-) & Surconsommation (+)
	Températures moyennes de l'air extérieure Par °C	Consommation électrique kWh par heure	Températures moyennes de l'air extérieure Par °C	Consommation électrique kWh par heure	
-7.5	25.30	0.2375	24.73	0.2388	+ 0.55 % Eau à l'état liquide à 1.49 °C Début de la formation de givre sur les tuyaux et les parois et présence de condensation anormale
-10	24.36	0.2722	24.48	0.2597	- 4.59 % Changement de phase : température de l'eau qui se stabilise aux alentours de 0 °C
-12.5	24.44	0.3288	24.47	0.3099	- 5.75 % Changement de phase : température de l'eau qui se stabilise aux alentours de 0 °C
-15	21.95	0.2695	21.72	0.3178	+ 17.92 % Eau congelée à - 3.53 °C. Choix inadapté de température du thermostat
-17.5	22.35	0.3162	22.75	0.3725	+ 17.80 % Eau congelée à - 5.70 °C. Début de la formation de givre et choix inadapté de la température du thermostat

Tableau 3.4 : Potentiel d'économies d'électricité lié au choix du glaciol comme MCP pour une température du thermostat fixée à -35 °C

N° du test	Sans MCP		N° du test	Avec MCP		Économie (-) & Surconsommation (+)
	Températures moyennes de l'air extérieure Par °C	Consommation électrique kWh par heure		Températures moyennes de l'air extérieure Par °C	Consommation électrique kWh par heure	
1	22.76	0.4469	2	22.02	0.4303	Économie de 0.0166 kWh/h (- 3.71 %) en faisant référence au test N° 1 et 0.0013 kWh/h (- 0.30 %) en faisant référence au test N° 3 Changement de phase moyennement établi: température de l'eau qui se stabilise quelques petites heures aux alentours de -9.7 °C
3	22.8081	0.4316	4	22.87	0.4221	Économie de 0.0248 kWh/h (- 5.55 %) en faisant référence au test N° 1 et 0.0095 kWh/h (- 2.20 %) en faisant référence au test N° 3 Changement de phase mieux établi: température de l'eau qui se stabilise aux alentours de -10 °C
			5	22.57	0.4146	Économie de 0.0323 kWh/h (- 7.23 %) en faisant référence au test N° 1 et 0.0170 kWh/h (- 3.94 %) en faisant référence au test N° 3 Changement de phase mieux établi: température de l'eau qui se stabilise aux alentours de -10 °C

3.8. Conclusion

Plusieurs conclusions peuvent être déduites parmi lesquelles :

- La stratification de l'air, entendue comme sa répartition en couches en fonction de la température, de la densité ou de l'humidité, n'apparaît pas durant l'ensemble du cycle. Cela représente un avantage, dans la mesure où ce phénomène peut réduire le mélange, entraver le brassage de l'air, engendrer des zones froides et nuire à la qualité de l'air.
- L'intégration d'un MCP dans un système de réfrigération a généralement deux effets majeurs : elle influe sur la consommation de la machine frigorifique ainsi que sur la stabilité de la température. Le MCP agit alors comme une véritable "batterie de froid"
- Le MCP réduit les effets négatifs du dégivrage.
- Le dégivrage électrique par résistance chauffante doit être bien adapté parce qu'un système trop faible ou trop puissant peut poser des problèmes d'efficacité et de consommation
- En cas de dysfonctionnement technique entraînant des dommages, le MCP prolonge le refroidissement de plusieurs heures supplémentaires et limite les hausses brusques de température.
- Plus la différence entre la température à refroidir à l'intérieur et la température extérieure est importante, plus le rendement et l'efficacité du système frigorifique baissent.

Conclusion générale

4. Conclusion générale

Le recours aux matériaux à changement de phase MCP pour le stockage d'énergie par chaleur latente représente une stratégie novatrice pour renforcer la régulation thermique et l'efficacité énergétique. Ces matériaux, qui fonctionnent comme de véritables "accumulateurs de froid", garantissent une stabilité thermique cruciale pour les systèmes frigorifiques, grâce à leur importante densité énergétique maintenue à température quasi-constante. L'intégration des MCP ne se limite pas à l'amélioration du confort thermique et à la compensation des hausses subites de température, mais s'étend à l'atténuation des perturbations causées par les cycles de dégivrage, assurant ainsi une meilleure continuité opérationnelle du système. Une condition essentielle consiste à choisir une température de changement de phase adaptée à la plage de fonctionnement du système, ainsi qu'une chaleur latente élevée afin de maximiser le stockage d'énergie. L'approche expérimentale mise en place doit donc fournir un cadre rigoureux pour l'analyse des performances thermiques du système, notamment en ce qui concerne le comportement des MCP au sein du dispositif frigorifique. Les éléments suivants sont à considérer comme critères majeurs pour sélectionner le MCP approprié :

- La température à laquelle s'effectue le changement de phase.
- La chaleur ou l'énergie latente.
- La stabilité, de même que la cinétique et la vitesse des échanges thermiques.
- Le coût total.

Plusieurs conclusions peuvent être tirées et avancées, parmi lesquelles :

- La stratification de l'air, définie comme une répartition en couches selon la température, la densité ou l'humidité, ne se manifeste pas durant tout le cycle. Cela représente un atout, car ce phénomène peut limiter le brassage de l'air, favoriser l'apparition de zones froides et affecter négativement la qualité de l'air.
- Intégrer un MCP à un système de réfrigération conduit à deux effets principaux : une variation de la consommation de la machine frigorifique et une amélioration de la stabilité thermique, tout en évitant un fonctionnement inutile ou inefficace du groupe frigorifique.

CONCLUSION GENERALE

- Le MCP diminue les effets indésirables et atténue les conséquences négatives du dégivrage.
- Lorsque le système de dégivrage s'enclenche, le compresseur et fréquemment le ventilateur s'arrêtent, les résistances chauffent, le givre disparaît en fondant, puis l'eau de fonte est évacuée. Le système de dégivrage électrique par résistance chauffante doit être choisi avec soin, car une puissance insuffisante ou excessive peut affecter ses performances et sa consommation énergétique.
- En cas de dysfonctionnement technique entraînant des dommages, le MCP prolonge le refroidissement de plusieurs heures supplémentaires et limite les hausses brusques de température.
- Un écart plus important entre la température intérieure à refroidir et la température extérieure se traduit par une diminution du rendement et de l'efficacité du système frigorifique.

À la lumière des résultats obtenus, plusieurs perspectives de recherche et d'application peuvent être envisagées. En premier lieu, il serait pertinent d'étendre l'étude à différents types de MCP afin de comparer leurs performances thermiques, leur stabilité cyclique et leur adéquation à divers régimes de fonctionnement frigorifique. Par ailleurs, l'optimisation de la température de fusion et de solidification du MCP constitue un axe essentiel, afin de l'ajuster au plus près des plages de fonctionnement réelles du système. Cette optimisation pourrait être complétée par l'étude de la géométrie du stockage et la répartition du MCP dans le compartiment.

REFERENCES

Références

1. O. Megret, L. Bequet, A. Manificat, C. Weber, Transport longue distance et stockage d'énergie calorifique, en couplage avec des procédés de valorisation énergétique des déchets, état de l'art, 2011, 437, 09-0233/1A.
2. Le circuit frigorifique en une animation, <https://www.abcclim.net/le-circuit-frigorifique.html>. Date de consultation : mai 2026.
3. P. Yuan, F. Tang, Z. Wang, S. Wang, Z. Gong, PCM integration in air ducts for enhanced thermal performance of open refrigerated cabinets, *Journal of Food Engineering*, 417, 2026, 113098.
4. Y. Guo, C. Liang, H. Liu, L. Gong, M. Bao, S. Shen, A Review on Phase-Change Materials (PCMs) in solar-powered refrigeration systems, *Energies* 2025, 18, 1547.
5. P. Tatsidjoudoung, P.N. Le, L. Luo, A review of potential materials for thermal energy storage in building applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 2013, 327-349.
6. E. Oro, A. Gracia, A. Castell, M.M. Farid, L.F. Cabeza, Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications, *Applied Energy*, 99, 2012, 513-533.
7. M. Elsayed, M.S. Mansour, M. Eid, M. Abdel-Raouf, Thermal behavior of frozen products paired with PCM during winter and summer power outages, *Case Studies in Thermal Engineering*, 53, 2024, 103956.
8. M. Rahimi, A.A. Ranjbar, M.J. Hosseini, Experimental investigation on PCM/Fin slab incorporation in a evaporator side of a household refrigerator, *Energy Reports*, 10, 2023, 407-418.
9. M.H. Jiang, The influence of operating conditions on the performance of chiller units, *Refrigeration Technology*, 41, 2021, 78-82.
10. F. Wang, G. Maidment, J. Missenden, R. Tozer, The novel use of phase change materials in refrigeration plant, Part 1 : Experimental investigation, *Applied Thermal Engineering*, 27(17-18), 2007, 2893-2901.
11. F. Wang, G. Maidment, J. Missenden, R. Tozer, The novel use of phase change materials in refrigeration plant, Part 2 : Dynamic simulation model for the combined system, *Applied Thermal Engineering*, 27(17-18), 2007, 2902-2910.
12. F. Wang, G. Maidment, J. Missenden, R. Tozer, The novel use of phase change materials in refrigeration plant, Part 3 : PCM for control and energy savings, *Applied Thermal Engineering*, 27,(17-18), 2007, 2911-2918.

REFERENCES

13. W.L. Cheng, B.J. Mei, Y.N. Liu, Y.H. Huang, X.D. Yuan, A novel household refrigerator with shape-stabilized PCM (Phase Change Material) heat storage condensers: An experimental investigation, *Energy*, 36, 2011, 5797-5804.
14. S. Bista, S.E. Hosseini, E. Owens, G. Phillips, Performance improvement and energy consumption reduction in refrigeration systems using phase change material (PCM), *Applied Thermal Engineering*, 142, 2018, 723-735.
15. B. Salah, R. Sifeddine, Phase Change Materials for enhancing heat transfer in evaporator systems, *Energy Conversion and Management*, 93, 2015, 267-276.
16. A. Maiorino, M.G. Del Duca, A. Mota-Babiloni, A. Greco, C. Aprea, The thermal performances of a refrigerator incorporating a phase change material, *International Journal of Refrigeration*, 100, 2019, 255-264.
17. M.M. Joybari, F. Haghighat, J. Moffat, P. Sra, Heat and cold storage using Phase Change Materials in domestic refrigeration systems: the state-of-the-art review, *Energy and Buildings*, 106, 2015, 111-124.
18. B.D. Mselle, D. Verez, G. Zsembinszki, E. Borri, L.F. Cabeza, Performance study of direct integration of Phase Change Material into an innovative evaporator of a simple vapour compression system, *Applied Sciences*, 10(13), 2020, 4649-4649.
19. M.A. Said, H. Hassan, Parametric study on the effect of using cold thermal storage energy of phase change material on the performance of air-conditioning unit, *Applied Energy* 230, 2018, 1380-1402.
20. F. Odoi-Yorke, R. Opoku, C.K.K. Sekyere, F.B. Effah, Phase Change Materials for cold energy storage : Insights from three decades of research trends, advancements, and future directions, *Energy Exploration & Exploitation*, 44(3), 2026, 1732-1783.
21. Using Phase Change Material as Thermal Energy Storage to Simplify Heat Pump Water Heating. <https://heatwater.com/phase-change-material-for-water-heating/>. Date de consultation : mai 2026.
22. Bo Zhang, Zerui Zhu, Xuerui Wang, Xinlei Liu, and Freek Kapteijn, Water Adsorption in MOFs : Structures and Applications, *Water Adsorption in MOFs : Structures and Applications*, *Adv. Funct. Mater.* 34, 2024, 2304788.
23. D.D. Vital, S. L. Wiśniewska, Water as green solvent: methods of solubilisation and extraction of natural products-past, present and future solutions, *Pharmaceuticals (Basel)*, 15(12), 2022, 1507.
24. G. Sekrani, S. Poncet, Ethylene-and propylene-glycol based nanofluids : a Litterature review on their thermophysical properties and thermal performances, *Applied Sciences*, 8, 2018, 2311.

REFERENCES

25. A. Gündem, M. Hoşöz, E. Keklik, Performance comparison of propylene glycol-water and ethylene glycol-water mixtures as engine coolants in a flat-tube automobile radiator, *International Journal of Automotive Science and Technology*, 5(2), 2021, 147-156.
26. G. Skordalou, K.D. Demadis, Ethylene glycol-based coolant technologies for automotive applications : A critical review, *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 13(3), 2024, 1355-1374.
27. B. Gemicioğlu, T. Demircan, Experimental analysis of the effects of using different water-ethylene glycol mixture rates on heat transfer performance in a heat exchanger, *Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskisehir Osmangazi University*, 29(2), 2021, 145-157.
28. R.B. Bejjam, K. Nigusie, T. Wondatir, S. Worku, Numerical analysis of water, ethylene glycol and nanofluid based radiator using CFD, *Materialstoday : Proceedings*, 47(10), 2021, 2431-2435.
29. R. Djeflal, S.M.A. Bekkouche, M. Samai, Z. Younsi, R. Mihoub, A. Benkhelifa, Effect of Phase Change Material eutectic plates on the electric consumption of a designed refrigeration system, *Instrumentation Measure Métrologie*, 19(1), 2020, 1-8.
30. R. Djeflal, S.M.A. Bekkouche, Z. Triki, A. Abboud, S. Lekmine, H. Tahraoui, J. Zhang, A. Amrane, Enhancing energy efficiency in vapor compression refrigeration systems using Phase Change Materials, *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, 23(4), 20251129-1148
31. R. Djeflal, Efficacité du stockage thermique par chaleur latente, expérimentation et application à des systèmes énergétiques réels, *Doctorat en Sciences Physiques, Université Ferhat Abbas -Sétif 1*, 2021.
32. Étalonnage d'un thermocouple,
https://www.thermometre.fr/blogs/les-thermocouples/etalonnage-dun-thermocouple?srsltid=AfmBOopR5-Zs9iTs5RrBr-TO07_4e5cJz64qbNOcEVTslsAIKTCXoqRx. Date de consultation : mai 2026.
33. Comparaison des thermocouples,
<https://www.te.com/fr/products/sensors/temperature-sensors/resources/thermocouple-types.html>. Date de consultation : mai 2026.

Résumé

Les systèmes de réfrigération sont essentiels dans un grand nombre de secteurs. Cependant, l'emploi des MCP dans ces systèmes reste confronté à divers défis scientifiques et techniques. L'objectif de ce mémoire est d'analyser la contribution potentielle des MCP à l'amélioration des performances d'un système frigorifique. L'eau et le glaciol ont été retenus comme des MCP classiques, intégrés de manière judicieuse dans la machine frigorifique. Les travaux expérimentaux révèlent que la stratification de l'air n'intervient pas sur l'ensemble du cycle. Les MCP contribuent à minimiser la consommation énergétique et à renforcer la stabilité thermique de cette machine. Cette idée a joué aussi un rôle dans la diminution des effets indésirables et des conséquences négatives du dégivrage qui doit être choisi avec soin. En cas de panne technique provoquant des dommages, le MCP prolonge le refroidissement de plusieurs heures et réduit les hausses soudaines de température. Un écart thermique plus élevé entre l'intérieur à refroidir et l'extérieur entraîne une baisse du rendement et de l'efficacité du système frigorifique.

Mots-clés : Système de réfrigération, MCP, Eau, Glaciol, Consommation énergétique, Stabilité thermique, Dégivrage.

Abstract

Refrigeration systems are essential across a wide range of sectors. However, the use of PCMs in these systems still faces several scientific and technical challenges. The aim of this thesis is to analyze the potential contribution of PCMs to improving the performance of a refrigeration system. Water and glaciol were selected as conventional PCMs and were carefully integrated into the refrigeration unit. According to the experimental findings, air stratification does not occur throughout the entire cycle. The PCMs contribute to lowering energy use and enhancing the machine's thermal stability. This idea also helped reduce the undesirable effects and negative consequences of defrosting, which must be chosen carefully. In the event of a technical failure causing damage, the MCP extends cooling for several hours and reduces sudden temperature spikes. A larger temperature difference between the interior to be cooled and the exterior reduces the performance and efficiency of the refrigeration system.

Keywords: Refrigeration system, PCM, water, glycols, energy consumption, thermal stability, defrosting.

ملخص

تلعب أنظمة التبريد دورًا حيويًا في العديد من المجالات، إلا أن استخدام مواد تغيير الطور داخلها ما يزال يواجه صعوبات علمية وتقنية. يهدف هذا البحث إلى دراسة الإمكانيات التي تتيحها هذه المواد في تحسين أداء المنظومة التبريدية. ولذلك وقع الاختيار على الماء و الجلاسيول بوصفهما من المواد الكلاسيكية، حيث جرى توظيفهما بذلك داخل الجهاز التبريدي. أظهرت التجارب أن طبقة الهواء لا تؤثر في مجمل الدورة. كما تساهم هذه المواد في تقليل استهلاك الطاقة وتعزيز الثبات الحراري للجهاز، إضافة إلى الحد من آثار عملية إزالة الجليد التي ينبغي التحكم فيها بدقة. وفي حال حدوث خلل تقني يؤدي إلى أضرار، فإن مادة تغيير الطور تواصل التبريد لعدة ساعات وتخفف من الارتفاع المفاجئ في درجة الحرارة. وكلما اتسع الفارق الحراري بين الوسط الداخلي المراد تبريده والوسط الخارجي، تراجعت مردودية النظام وكفاءته.

الكلمات المفتاحية : نظام التبريد، مواد تغيير الطور، الماء، الجلاسيول، استهلاك الطاقة، الاستقرار الحراري، إزالة الجليد.

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic of Algeria
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific research

University of Ghardaia
Faculty of Sciences and Technology
Department of Common Teaching in Sciences and Technology



جامعة غرداية
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم التعليم المشترك في العلوم والتكنولوجيا

Approval for Final Printing of a Master's Dissertation

	Name and Surname	Signature
Examiner 1	DAOUDI Bahmed	
Examiner 2	AMIEUR Bachir	
Supervisor	BEKKOUCHE Sidi Mohammed El Amine	

I, the undersigned, Mr: BOUDABIA Saad

President of the jury for the student(s): - Ben Messaoud Amina
- Larbi Rahma

Field: Physics; Specialization: Energy Physics and Renewable Energies

Thesis Title:

Expérimentation et mise à l'essai d'un système de réfrigération intégrant des matériaux à changement de phase

Hereby authorize the above-mentioned student(s) to print and submit their final manuscript to the department.

Ghardaia : ... 2026 جوان 2 2

President of the jury

Head of the department

رئيس قسم التعليم المشترك
في العلوم والتكنولوجيا
شويكة فيحصل



Annexe : Attestation d'autorisation de correction et de dépôt