



UNIVERSITE SAAD DAHLEB BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master en génie mécanique

Présenter par :

Chelha Samir

Hadj Ali Ahmed

THEME :

**ANALYSE EXPERIMENTALE ET STATISTIQUE DE
LA CONSOMMATION D'ENERGIE D'UN
REFRIGERATEUR DOMESTIQUE**

Encadrés par :

Mokrane

Mehdi

MRB

UDES

Rapporteur

Hatrafe

Nesrine

MCA

Univ.S.D.BLIDA 1

Co-Rapporteur

Remerciement

Nous rendons grâce au bon Dieu qui nous a donné la force, la volonté, le courage et la patience qui nous ont permis de mener à terme ce modeste travail. Au terme de ce travail, nous tenons, tout d'abord, à remercier les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'évaluer notre travail.

Nous tenons ensuite à exprimer nos plus vifs remerciements à notre promoteur Mr. MOKRANE MEHDI et notre co-promotrice Mme. HATRAFE NESRINE, pour la qualité de leur suivi ; pour leur précieuses orientations, méthodologiques notamment, et aussi pour leur disponibilité jusqu'à l'aboutissement de ce travail.

Nous tenons également à exprimer notre profonde gratitude à notre chef de département Mr. BRAHIMI ABDEL HALIM et à tous les enseignants de notre département de mécanique qui nous ont aidé et enseigné durant toute notre cursus universitaire.

Nous voudrions aussi exprimer notre grande gratitude à nos familles, pour leur soutien moral et leurs encouragements prodigués pendant toutes ces années d'étude ainsi qu'à tous nos amis.

ملخص

يعمل دمج مواد تغيير الطور (MCP) في أنظمة التبريد على تحسين مرونتها، وتثبيت درجات حرارة المنتج، ويمكن أن يقلل من استهلاكها للطاقة في ظل ظروف معينة. في هذه الدراسة، تم تقديم تحليلًا لاستهلاك الطاقة للثلاجة المنزلية وتأثير دمج مواد تغيير الطور على سلوكها الحراري. تتمثل الخطوة الأولى في تحقيق تصميم التجارب (DOE) باستخدام برنامج Minitab للسماح بتحليل متزامن لتأثيرات متغيرات الإدخال (العوامل) على متغير الإخراج (الاستجابة). بعد ذلك، أجرينا اختبارات تجريبية لملاحظة وتقييم أهمية عدة عوامل مثل تأثير فتحات الأبواب المتكررة على درجات حرارة حجرة الطعام الطازج، وتأثير الحمل الحراري ومواد تغيير الطور (MCP) على استهلاك الطاقة والمعامل من الأداء (COP). تظهر النتائج الرئيسية جدوى تقنية MCP وتشهد على انخفاض كبير في الاستهلاك الكهربائي للثلاجة المنزلية من ناحية وإمكانية تخفيف تذبذب درجة حرارة التخزين عند فتح / إغلاق الثلاجة.

الكلمات المفتاحية: مادة تغيير الطور، الثلاجة المنزلية، تصميم تجريبي

Résumé

L'intégration des matériaux à changement de phase (MCP) dans les systèmes frigorifiques améliore leur flexibilité, stabilise les températures des produits, et peut dans certaines conditions réduire leur consommation d'énergie. Dans cette étude, une analyse de la consommation d'énergie d'un réfrigérateur domestique et l'effet de l'intégration de matériaux à changement de phase sur son comportement thermique a été présentée. La première étape a consisté en la réalisation d'un plan d'expériences (DOE) à l'aide du logiciel Minitab pour permettre une analyse simultanée des effets des variables d'entrée (facteurs) sur la variable de sortie (réponse). Ensuite, nous avons effectué des tests expérimentaux pour observer et évaluer l'importance de plusieurs facteurs comme l'effet des ouvertures de porte répétées sur les températures du compartiment des aliments frais, l'effet de la charge thermique et les matériaux à changement de phase (MCP) sur la consommation d'énergie et le coefficient de performance (COP). Les principaux résultats montrent la faisabilité de la technologie des MCP et attestent d'une réduction significative de la consommation électrique du réfrigérateur domestique d'une part et la possibilité d'atténuer la fluctuation de la température de conservation lors de l'ouverture/ fermeture de la porte d'autre part.

Mots clés : Matériau à changement de phase, Réfrigérateur domestique, Plan d'expérience

Abstract

The integration of phase change materials (PCM) in refrigeration systems improve their flexibility, stabilizes product temperatures, and can under certain conditions reduce their energy consumption. In this study, an analysis of the energy consumption of a domestic refrigerator and the effect of the integration of phase change materials on its thermal behavior was presented. The first step consisted in the realization of a design of experiments (DOE) using the Minitab software to allow a simultaneous analysis of the effects of the input variables (factors) on the output variable (response). Next, we performed experimental tests to observe and evaluate the importance of several factors such as the effect of repeated door openings on the temperatures of the fresh food compartment, the effect of thermal load and phase change materials. (MCP) on power consumption and coefficient of performance (COP). The main results show the feasibility of the MCP technology and attest to a significant reduction in the electrical consumption of the domestic refrigerator on the one hand and the possibility of attenuating the fluctuation of the storage temperature when opening/closing the refrigerator. the door on the other hand.

Keywords: Phase change material, Domestic refrigerator, Experimental design

Listes des figures

Figure 1. Schéma d'installation d'une machine frigorifique.....	17
Figure 2. Photo Compresseur frigorifique.....	18
Figure 3. Schéma de Condenseur	19
Figure 4. Schéma de Détendeur	19
Figure 5. Schéma d'Évaporateur	20
Figure 6. Description d'une installation frigorifique.....	20
Figure 7. Cycle T-S	22
Figure 8. Schéma d'une installation frigorifique.....	22
Figure 9. Cycle de Carnot.....	23
Figure 10. Cycle adiabatique.....	25
Figure 11. Diagramme de Clapeyron	26
Figure 12. Stockage de l'énergie.....	43
Figure 13. Décharge de l'énergie.....	43
Figure 14. Réponse en température et en flux d'un corps pur idéal lors d'une solidification.....	44
Figure 15. Emplacement de la plaque de MCP étudiée par Mehmet et al.	47
Figure 16. Emplacement de l'échangeur de MCP étudié par Alzuwaid et al.	48
Figure 17. Emplacements étudiés des MPC dans le réfrigérateur.....	49
Figure 18. Schéma du congélateur montrant les positions des thermocouples et le placement des M-packs et du MCP.	56
Figure 19. Photo d'un réfrigérateur domestique.	57
Figure 20. Compartiment congélateur.....	58
Figure 21. Évaporateur à ailette avec ventilation :(a) Évaporateur, (b) Ventilateur.	58
Figure 22. Le compresseur du réfrigérateur.	59
Figure 23. Photo de thermocouple.	59
Figure 24. Photos du Data Logger type Hydra 2700 face avant et arrière.	60
Figure 25. Interface graphique du data logger.....	61
Figure 26. Photo de compteur électrique utilisée.....	61
Figure 27. Définition du domaine d'étude. [65].....	66
Figure 28. Lieu géométrique des points expérimentaux	67
Figure 29. Lieu géométrique des points expérimentaux d'un plan	68
Figure 30. Organigramme descriptif de différents écarts.....	68
Figure 31. Organigramme descriptif de l'ensemble des tests expérimentaux réalisés.....	70

Figure 32. Photo de matériel utilisée dans la préparation de MCP.	71
Figure 33 . Photo de l'emplacement de MCP dans le congélateur.....	71
Figure 34. Photo d'emplacement de MCP dans le baquet supérieur.....	72
Figure 35. Connexion du dispositif expérimentale 3 au système d'acquisition.	73
Figure 36. L'emplacement des thermocouples.....	73
Figure 37. Photo des thermocouples placés dans le congélateur.	74
Figure 38. Photo de thermocouple placée dans l'ambiante.	74
Figure 39. Photo des thermocouples placés dans les MCP.	75
Figure 40. Exemple de formulation par plan de Box Behnken.	76
Figure 41. Profils de température en fonction de temps avec Q égale à 9Kg.	80
Figure 42. Profils de température en fonction de temps avec Q_H égale à 9Kg.	81
Figure 43. Profils de température en fonction de temps avec Q_h égale à 9Kg.	81
Figure 44. Distribution de la température dans les différentes étagères du compartiment réfrigérateur avec une température de thermostat égale 1°C	82
Figure 45. Distribution de la température dans les différentes étagères du compartiment réfrigérateur avec une température de thermostat égale 4°C	83
Figure 46. Distribution de la température dans les différentes étagères de compartiment réfrigérateur avec une température de thermostat égale 8°C	84
Figure 47. Courbe de la probabilité normale d'E/24h et COP.	88
Figure 48. Contours de la consommation d'énergie du réfrigérateur à	90
Figure 49. Contour de coefficient de performance (COP)	92
Figure 50. Evolution de COP et E/24h avec différentes quantités de MCP.....	93
Figure 51. Évolution du COP et E/24h avec différentes températures	94
Figure 52. Évolution du COP et E/24h avec différentes quantités de charge thermique Q_h ..	95

Liste des tableaux

Tableau 1. Fluide frigorigène CFC	28
Tableau 2. Fluide frigorigène HCFC	28
Tableau 3. Fluide frigorigène HFC	29
Tableau 4. Matériau a changement de phase organique	38
Tableau 5. Matériau a changement de phase inorganique	39
Tableau 6. Compositions de MCP avec différentes températures.	54
Tableau 7. Les caractéristiques du congélateur utilisé.....	55
Tableau 8. Descriptions des différents types de thermocouple [64].	60
Tableau 9. Guide de sélection d'un plan.....	63
Tableau 10. Conception expérimentale de niveaux de facteurs.	77
Tableau 11. Plan Box-Behnken pour 3 variables.....	78
Tableau 12. Plan d'expérience, consommation d'énergie et coefficient de performance.....	85
Tableau 13. Résultats de l'analyse de variance pour la réponse E/24H et COP	86
Tableau 15. Le coefficient de détermination.....	87

Table des matières

Table des matières

Introduction générale	15
CHAPITRE I : Synthèse sur les installations frigorifiques	
I.1 Installation frigorifique	17
I.2 Principe de fonctionnement.....	17
I.3 Composant de machine frigorifique	18
I.3.1 Compresseur	18
I.3.2 Condenseur	18
I.3.3 Détendeur.....	19
I.3.4 Evaporateur.....	19
I.4 Cycle frigorifique	20
I.4.1 Fonctionnement de machine frigorifique.....	20
I.4.2 Cycle thermodynamique	21
I.5 Fluide frigorigène	26
I.5.1 Propriétés du fluide frigorigène	27
I.5.2 Catégories du fluide frigorigène	27
I.5.3 Réglementations.....	29
I.5.4 Fluide frigorigène Natural	30
I.7 Analyse bibliographique	32
I.7.1 Effet de température ambiante	32
I.7.2 Effet de ouvertures de portes	32
I.7.3 Effet du réglage du thermostat ou de la température interne	34
I.7.4 Effet de l'humidité relative.....	35
I.7.5 Effet des charges alimentaires sur la consommation d'énergie.....	35
I.7.6 Effet de la charge de réfrigérant	36
CHAPITRE II: Matériau à changement de phase	
II.1 Contexte générale sur les matériaux à changement de phase	38
II.2 Différents types de MCP.....	38
II.2.1 MCP organique.....	38
II.2.2 MCP inorganique.....	38
II.2.3 MCP eutectiques.....	39

II.3 Critères de choix des MCP	39
II.4 Les avantages et les inconvénients de MCP	40
II.4.1 Les avantage	40
II.4.2 Les inconvénients	41
II.5 La chaleur latente	42
II.5.1 Stockage par chaleur latente	42
II.5.2 Le changement de phase d'un point de vue énergétique	44
II.6 Les caractéristiques de MCP	45
II.7 Etat de l'art sur l'intégration de MCP dans la réfrigération.....	45
II.7.1 Applications des MCP dans les équipements frigorifiques	45
II.7.1.1 Transports frigorifiques :.....	45
II.7.1.2 Meubles frigorifiques de vents :.....	46
II.7.1.3 Réfrigérateur domestique :.....	48
II.7.2 Effet du PCM sur les performances de système de réfrigération	50
II.7.2.1 Effet de la température de MCP sur les performances des systèmes de refroidissement	50
II.7.2.2 Effets de la quantité de MCP sur les performances des systèmes de refroidissement	51
II.7.2.3 Effet de la position de MCP sur les performances des systèmes de refroidissement	52
II.7.2.4 Effet du MCP sur l'évaporation Température et pression	53
II.7.3 Application du MCP pour l'amélioration de l'efficacité des congélateurs domestiques.....	54

CHAPITRE III : Montage expérimental

III.1 Description de dispositif expérimentale	57
III.2 Matérielle et mesure.....	59
III.2.1 Systèmes de mesure de la température.....	59
III.2.2 Description du système d'acquisition de données	60
III.2.3 Systèmes de mesure de consommation d'énergie	61
III.3 Plan d'expérience.....	62
III.3.1. L'intérêt des plans d'expériences	62
III.3.2. Les étapes des plans d'expériences	62
III.3.3. Classes des plans d'expériences :.....	64
III.3.4 Objectifs d'utilisations des plans d'expériences	64

III.3.5 Vocabulaire [65].....	65
III.3.6 Plan de surface de réponse RSM.....	66
III.3.7 Analyse de variance (ANOVA)	68
III.4 Protocole expérimentale	70
III.4.1 Le choix de MCP.....	70
III.4.2 Choix d'emplacement de MCP	71
III.4.3 Procédure d'expérimentation	72
III.4.4 Emplacement des thermocouples	73
III.5 Plan de surface de réponse (Box-Behnken).....	75
III.6 Statistique expérimentale:.....	77

CHAPITRE IV: Résultats et Discussions

IV.1. Effet du MCP sur le cycle marche/ arrêt du compresseur	80
IV.1.1 Cas de température du compartiment réfrigérateur égale 1 et 8°C avec $Q_h = 9$ Kg.....	80
IV.1.2 Cas de température du compartiment réfrigérateur égale 4°C avec une $Q_h =$ 18Kg.....	81
IV.2 L'effet du MCP sur les fluctuations de température à l'intérieur du compartiment réfrigérateur	82
IV.2.1 Cas de température du compartiment réfrigérateur égale 1°C.....	82
IV.2.2 Cas de température du compartiment réfrigérateur égale 4°C.....	83
IV.2.3 Cas de température du compartiment réfrigérateur égale 8°C.....	84
IV.3 Analyses statistiques par plan d'expériences	85
IV.3.1 Réalisation des essais	85
IV.3.2 Modélisation mathématique.....	87
IV.4 Analyse de la consommation d'énergie sur 24h	88
IV.5 Analyse de coefficient de performance COP	91
IV.6 Analyse comparative des réponses à chaque variable.....	93
Conclusion général	96
Références bibliographiques	98

Nomenclature

T	Température	$^{\circ}\text{C}$
h	Enthalpie	KJ/Kg
P	Pression	Bar
V	Volume	L
E	Consommation	KWh
m	Masses	Kg
L_{ch}	Chaleur latente de fusion	KJ/Kg
CP_l	Capacité calorifique massique du liquide	J.Kg^{-1}
CP_s	Capacité calorifique massique du solide	J.Kg^{-1}
T_{fs}	Température de fusion	$^{\circ}\text{C}$
K	Coefficient d'échange	[-]
S	Fusion de surface	mm^2
t	temps de fonctionnement du MCP	min
T_{amb}	Température ambiante	$^{\circ}\text{C}$
T_{froid}	Température froid	$^{\circ}\text{C}$
L	Largeur	M
e	Epaisseur	M
P	Puissance	W
I	Intensité	A
U	Tension	V
X	Facteur	[-]

Y	Réponse	[-]
B ₀	Constante	[-]
ε	Erreur	[-]
R ²	Coefficient de détermination	[-]
σ ²	Test d'égalité de variance	[-]
P	Probabilité	[-]
Q	Energie absorbé	Kj/Kg
T _f	Température de compartiment réfrigérateur	°C
Q _h	Charge thermique	Kg
E	Consommation	KWh
ER	Ecart	[-]
R _{ex}	Résultat expérimentale	%
R _{pr}	Résultat prédite	%
M _{mcp}	Masse de MCP	Kg
t _{on}	Temps de marche de compresseur	S
T _{off}	Temps d'arrêt de compresseur	S
Δt	Différence de temps	S

Abréviations

FF	Fluide Frigorigène
Hp	Haute Pression
BP	Base Pression
COP	Coefficient de Performance
CFC	ChloroFluoroCarbures
HCFC	HydroChloroFluoroCarbures.
HFC	HydroFluoroCarbures.

P EX	Plan d'expérience.
RSM	Plan de surface
ANO	Analyse de Variance.
VA	
DOE	Plan d'expérience.
MCP	Matériau a Changement de Phase.

Indices

amb	Amiante
ch	Chaleur latente
ex	Expérimentale
<i>f</i>	Froid
cf	Compartiment réfrigérateur
fs	Fusion
h	Charge thermique
l	Liquide
off	Arrêt
on	Marche
s	Solide

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

De nombreuses études ont accordé une grande attention aux impacts de la crise énergétique et du réchauffement climatique sur les stratégies d'économie d'énergie. En Algérie, la demande en électricité a connu une évolution importante ces dernières années plus particulièrement en période estivale, atteignant des pics de consommation importants. Pour donner un chiffre, Sonelgaz avait enregistré le 15 août 2021- un jour de canicule- un pic de consommation à 15h00 de 16.224 KW représentant une hausse de 10.3% par rapport à 2020 [1].

Au sein des ménages qui connaissent la même tendance de consommation énergétique, il faut remarquer que les machines les plus énergivores ne sont pas nécessairement celles qui impactent le plus la consommation globale à l'année. Par exemple, si une heure d'utilisation de fer à repasser consomme beaucoup d'électricité, nous nous en servons moins souvent qu'un boîtier internet qui lui consomme peu d'énergie, mais tout au long de l'année. Alors pour des appareils qui se doivent de fonctionner en permanence, il est indispensable d'avoir une consommation d'énergie raisonnable.

Le réfrigérateur domestique basé sur la technologie de compression de vapeur est l'une des applications domestiques les plus importantes et les plus consommatrices d'énergie. La plupart des foyers des pays développés en possédant au moins un réfrigérateur, tandis que le nombre de propriétaires augmente rapidement dans les pays en voie de développement [4]. Ils représentent environ 15 à 20 % de la consommation électrique domestique totale [5]. Il apparaît donc que la recherche de solutions optimale aux problèmes que pose cet équipement réponde à un double besoin, visant d'une part la sécurité alimentaire et d'autre part la réduction de la consommation de l'électricité domestique.

Dans ce contexte, différentes recherches ont été menées pour réduire la consommation d'électricité des réfrigérateurs et il a été constaté que la technique de répartition de la charge électrique (arrêt de la machine frigorifique) et son application aux réfrigérateurs permet de réduire leur consommation d'électricité. L'intégration de dispositifs de stockage d'énergie dans les réfrigérateurs, à l'aide de matériaux à changement de phase MCP, permet de réaliser des économies d'énergie, de réduire les coûts de fonctionnement, d'assurer une consommation électrique stable et de maintenir la température à l'intérieur du réfrigérateur de manière à ne pas endommager les aliments. Grâce à ce système et à cette technologie, on pourra également participer à l'effort qui consiste à réduire les émissions de gaz effet de serre.

Introduction générale

Notre étude propose donc d'analyser les potentialités de l'utilisation de Matériaux à Changement de Phase (MCP) dans les réfrigérateurs domestique avec différentes quantités charge thermique. Des essais expérimentaux sur un réfrigérateur domestique de marque BRAND 331L ont été réalisés au niveau d'une maison solaire intelligente à basse consommation énergétique implanté à l'Unité de Développement des Équipements Solaire (UDES). La méthode des plans d'expériences a été adoptée dans l'étude de l'effet des différents facteurs (la température, quantité MCP, quantité charge thermique) sur les performances du système. Nous avons utilisé le Logiciel Minitib comme outil d'optimisation et d'analyse.

Le travail entrepris dans le cadre de ce mémoire s'est déroulée en plusieurs étapes constituant un tout structuré en quatre chapitres.

- Le premier chapitre donne une synthèse bibliographique sur les installations frigorifiques (principe de fonctionnement, les composants frigorifiques et fluide frigorigène) qui constituent les bases théoriques indispensables pour la compréhension et l'étude des systèmes de production de froid par compression de vapeur.
- Un examen approfondi sur les matériaux à changement de phase est également nécessaire pour une mise à jour des derniers travaux de recherche réalisés dans le monde. Cette partie bibliographique sur les différents travaux réalisés dans le domaine des applications des MCP dans les équipements frigorifiques a été résumée dans le deuxième chapitre.
- Le troisième chapitre décrit le banc d'essai ainsi que les étapes suivies pour sa réalisation et son exploitation ainsi que les différentes prises de mesures des températures du cycle. Ensuite, sont décrites les différentes étapes nécessaires pour la préparation du MCP. Nous avons abordé dans le cadre de ce chapitre, la méthodologie des plans d'expériences.
- Quant au dernier chapitre, il reprend les différents résultats obtenus et leur discussion.

En conclusion générale, une synthèse des principaux résultats est présentée ainsi que des perspectives pour la poursuite de ce travail.

CHAPITRE I

Synthèse sur les installations frigorifiques

Ce chapitre présente un état de l'art portant sur les installations frigorifiques. Dans cette section, les principaux composants, les cycles thermodynamiques et les fluides frigorigènes dans les installations frigorifiques seront détaillés. Puis, les différents travaux de recherche sur la réfrigération domestique sont abordés.

I.1 Installation frigorifique

Une installation frigorifique est un ensemble d'appareils dont les interactions, entre eux d'une part et avec l'extérieur c'est-à-dire le milieu ambiant et le milieu extérieur, d'autre part, permettent de produire du froid.

I.2 Principe de fonctionnement

L'installation frigorifique fonctionne selon les principes de la phase de transition gazeuse, où le gaz passe d'un état liquide à un état gazeux, et ici la pression est faible et la température est élevée, et lorsqu'il passe d'une phase gazeuse à un liquide, la pression est élevée et la température est faible, et le réfrigérateur fonctionne selon un cycle à 4 étapes (voir figure 1) :

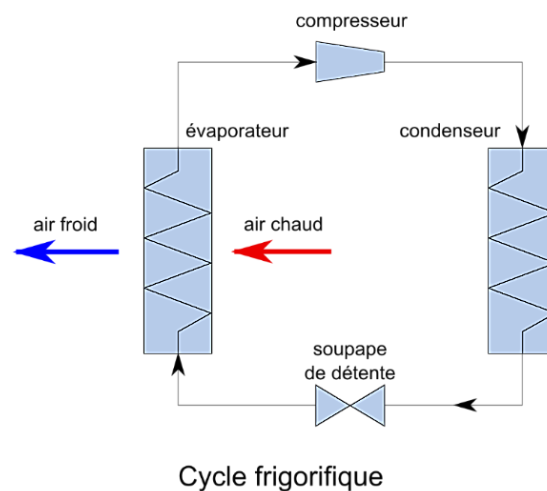


Figure 1. Schéma d'installation d'une machine frigorifique

Dans la première étape, le fluide à basse pression entre dans le compresseur, et l'énergie mécanique du compresseur va permettre l'augmentation de la pression du fluide et sa température va augmenter, et ici le fluide est à l'état gazeux, et quand il sort du compresseur, la pression est élevée. Le compresseur le pompe directement vers le condenseur, et c'est là que commence la deuxième étape, et le condenseur permet au liquide de se condenser par échange de chaleur avec le fluide extérieur (l'air ambiant) à une température et une pression constantes,

et c'est là qu'il change d'état physique, passant de gazeux à liquide.

La troisième étape commence lorsque le fluide de refroidissement sort du condenseur vers le détendeur, et dès qu'il y entre, la pression chute brutalement, ce qui provoque son évaporation partielle. Dans la quatrième et dernière étape se trouve l'évaporateur, qui libère de la chaleur dans le réfrigérateur domestique pour le refroidir, car il est considéré comme un échangeur de chaleur, et ici le liquide est à l'état gazeux.

I.3 Composent de la machine frigorifique

Un circuit frigorifique est composé des organes suivants :

I.3.1 Compresseur

Un compresseur frigorifique comprime l'air froid et le propulse à travers le circuit pour rafraîchir l'intérieur d'un appareil thermodynamique comme un congélateur ou un réfrigérateur. Il se retrouve aussi sur la climatisation des voitures et les véhicules frigorifiques [6]. (Voir figure 2)



Figure 2. Photo Compresseur frigorifique

I.3.2 Condenseur

Le condenseur sert à transmettre au médium de refroidissement (vapeur et liquide) La chaleur contenue dans les vapeurs par le compresseur. La quantité de chaleur a évacue comprend. (Voir figure 3) :

- La chaleur latente de liquidation
- La chaleur sensible des vapeurs surchauffées
- La chaleur sensible du liquide jusqu'à une température se rapprochant le plus possible de cette des médiums de refroidissement [6].

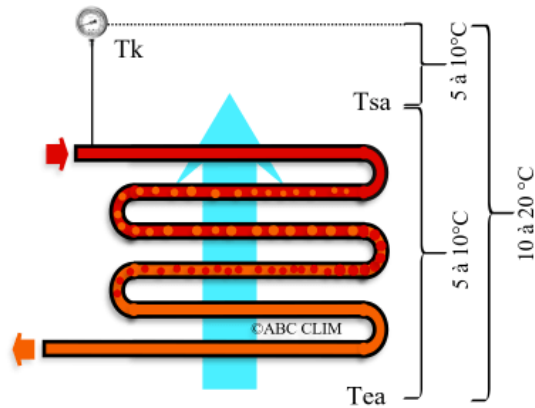


Figure 3. Schéma de Condenseur

I.3.3 Détendeur

C'est un élément passif du circuit frigorifique mais essentiel pour réaliser le cycle de compression/détente permettant de transférer les calories ou frigories de l'évaporateur au condenseur [6]. (Voir figure 4).

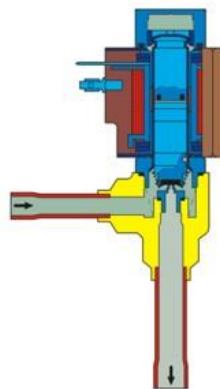


Figure 4. Schéma de Détendeur

I.3.4 Evaporateur

Les évaporateurs sont des échangeurs thermiques au même titre que les condenseurs, ils assurent le passage du flux thermique du milieu à refroidir au fluide frigorigène, ce flux thermique ayant pour effet de vaporiser le frigorigène liquide qui est contenu à l'entretien de l'évaporateur. L'évaporateur se fait à température constante par libération de sa chaleur latente de vaporisation de flux thermique contrairement au condenseur évaporateur [6]. (Voir figure 5)

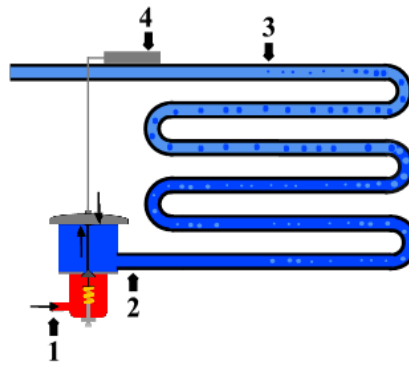


Figure 5. Schéma d'Évaporateur

I.4 Cycle frigorifique

Le cycle frigorifique fait passer un fluide frigorigène par plusieurs états gazeux/liquide en fonction des changements de pressions dus au compresseur et au détendeur. Ces changements de pressions donnent lieu à des changements de températures que l'on retrouve dans le condenseur (évacuation de la chaleur) et dans l'évaporateur (fourniture de l'énergie frigorifique). Ce cycle simple "compression/condensation/détente/évaporation" est appelé cycle frigorifique. Il est présent dans toute machine frigorifique telles les pompes à chaleur [7].

I.4.1 Fonctionnement de machine frigorifique

Le cycle frigorifique d'une machine frigorifique est habituellement représenté dans le diagramme thermodynamique enthalpie (h) - pression (Log P) appelé diagramme Enthalpie ou diagramme de Molliere des frigoristes [6]. (Voir figure 6).

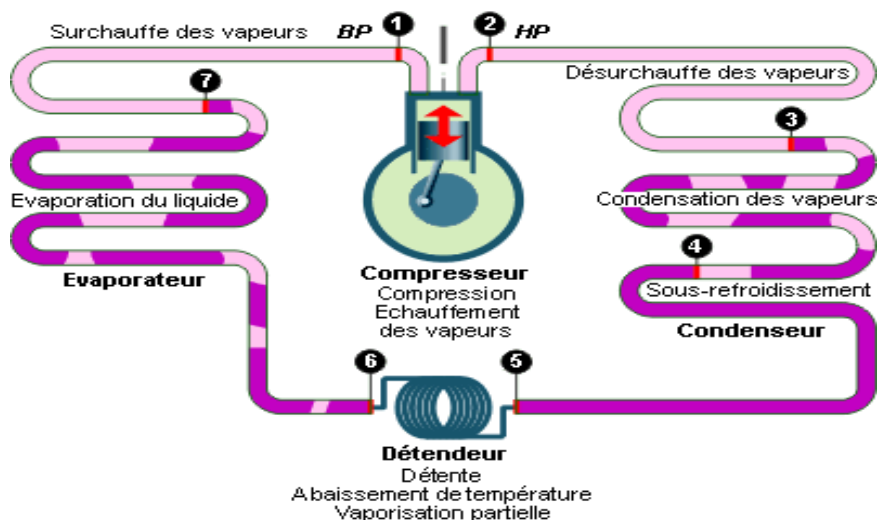


Figure 6. Description d'une installation frigorifique

Suivant le schéma de la machine frigorifique de la figure 1.0, le fluide frigorigène (FF) Circulant dans le circuit frigorifique suit les évolutions suivantes :

- Entre 1 et 2 : compression des vapeurs de FF qui passent d'un niveau de basse
- Pression (BP) à un niveau de haute pression (HP)
- Entre 2 et 3 : désurchauffe des vapeurs de FF HP
- Entre 3 et 4 : condensation des vapeurs de FF HP qui deviennent du FF liquide HP
- Entre 4 et 5 : sous refroidissement du FF liquide HP
- Entre 5 et 6 : détente du FF liquide HP qui devient un mélange de liquide BP et d'une faible quantité de vapeurs BP
- Entre 6 et 7 : évaporation du FF liquide BP qui devient des vapeurs de FF BP
- Entre 7 et 1 : surchauffe des vapeurs de FF BP Les différentes évolutions du FF de la machine frigorifique sont représentées sur le diagramme enthalpie, il s'agit du cycle frigorifique de la machine communément appelée cycle de référence ou cycle pratique par les frigoristes [6].

1.4.2 Cycle thermodynamique

Un cycle thermodynamique est une suite de transformations successives qui part d'un système thermodynamique dans un état donné, le transforme et le ramène finalement à son état initial, de manière à pouvoir recommencer le cycle [8].

a) Diagramme entropique T-S

Les courbes iso-paramétriques de la figure suivante du diagramme (T, S) présentent certaines particularités, que sont [9]: (voir figure 7).

- Les isothermes sont horizontales
- Les adiabatiques réversibles (isentropiques) sont verticales
- Les adiabatiques irréversibles sont des courbes inclinés dans le sens des entropies croissantes
- Les isostatiques passent toutes par le point critique
- Les isochores changes de direction à la courbe de saturation
- Le cycle de Carnot est représenté par un rectangle
- L'aire en dessous de la courbe représente la quantité de chaleur échangée
- L'aire d'un cycle fermé représente le travail fourni.

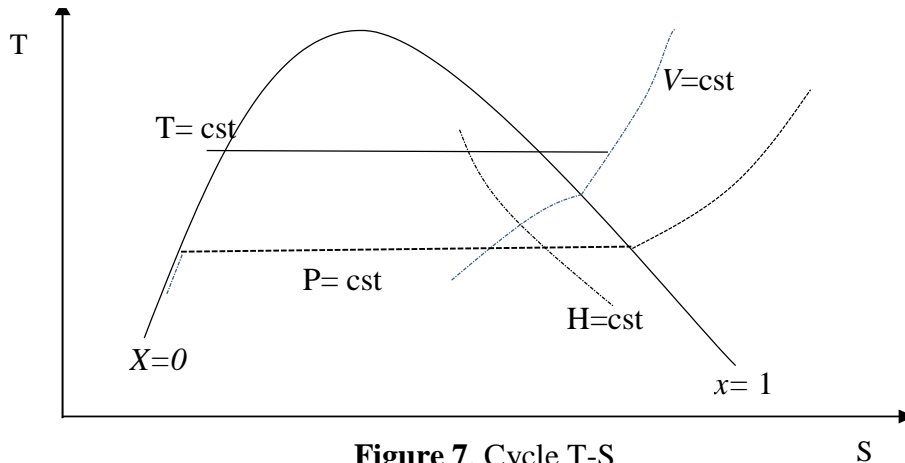


Figure 7. Cycle T-S

b) Cycle de Carnot

Le cycle de Carnot est un cycle thermodynamique théorique constitué de quatre Transformations, deux isothermes réversibles et deux adiabatiques réversibles donc isentropiques, le chemin parcouru est le sens trigonométrique ; il est considéré comme le moyen le plus efficace de transférer de la chaleur d'une source froide vers une source chaude en consommant du travail [10]. (Voir figure 8).

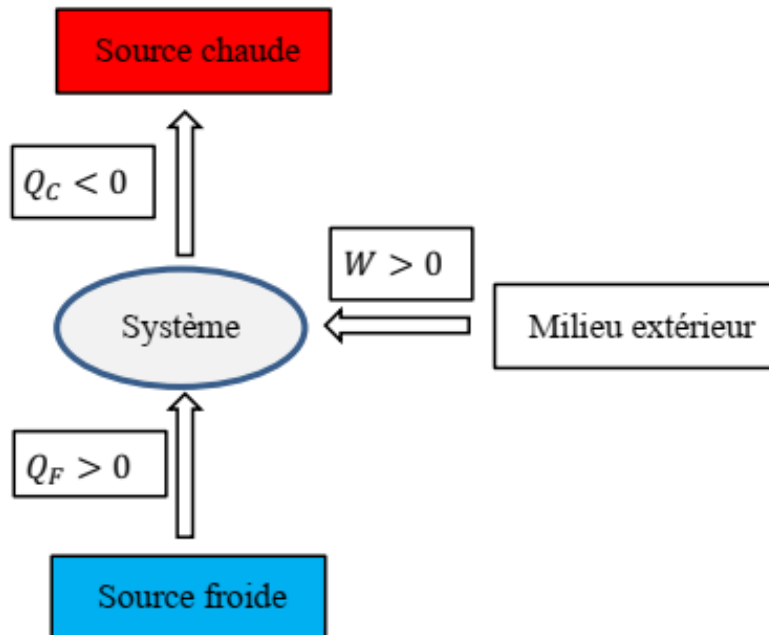


Figure 8. Schéma d'une installation frigorifique

Les machines frigorifiques et les pompes à chaleur reçoivent de la chaleur de la source froide et du travail du milieu extérieur et donnent le tout sous forme de chaleur à la source chaude. Le cycle frigorifique de Carnot est représenté dans un diagramme (T, S) par un rectangle, comme indiqué dans la figure 9, il est constitué de quatre transformations successives [10] (voir figure 9) :

CD : Evaporation, la chaleur passe de l'espace froid au fluide.

DA : Compression adiabatique.

AB : Condensation, la chaleur passe du fluide à l'espace chaud.

AD : Détente adiabatique

Avec :

Q_2 : Quantité de chaleur extraite de la source froide (Positive, en J)

Q_1 : Quantité de chaleur injectée dans la source chaude (Négative, en J)

W : travail nécessaire pour la transformation (Positif en J)

T_2 : Température de la source froide constante (en K)

T_1 : Température de la source chaude constante (en K).

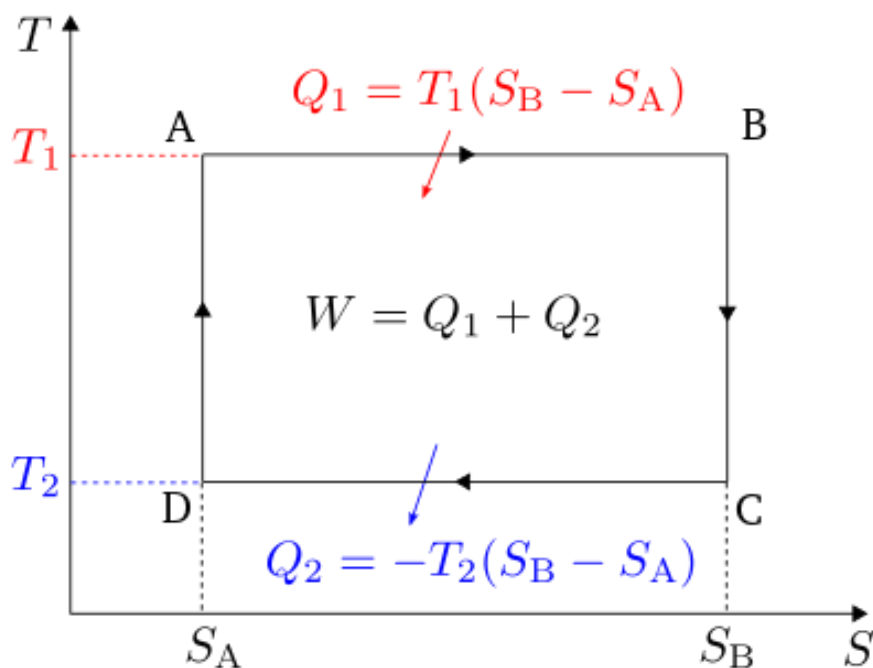


Figure 9. Cycle de Carnot

Coefficient de performance (COP) :

Le cycle de Carnot étant un cycle théorique, de ce fait plusieurs systèmes thermodynamiques définissent une efficacité à partir du cycle de Carnot. La performance d'un système étant défini par le rapport de l'énergie utile récupérée en entrée à l'énergie fournit en sortie à ce système, le coefficient de performance (COP) est défini par [10] :

$$COP = \frac{\text{Energie utile en Sortie}}{\text{Energie fournie en Entré}} \dots \dots \dots (1)$$

Pour une machine frigorifique, la performance est le rapport de la chaleur extraite de la source Froide Q_f rapportée au travail fournit en général sous forme d'énergie électrique W , ce qui

Donne :

$$COP = \frac{Q_f}{w} \dots \dots \dots (2)$$

Sachant que

$$\Delta U = w + Q \dots \dots \dots (3)$$

Pour un cycle fermé

$$\Delta U = 0 \dots \dots \dots (4)$$

Ce qui donne pour le cas d'un cycle fermé

$$w = -(Q_f + Q_c) \dots \dots \dots (5)$$

On remplace, et on obtient

$$COP = \frac{Q_f}{-Q_f - Q_c} \dots \dots \dots (6)$$

Avec $Q_f > 0$ et $W > 0$, On a

$$COP = \frac{Q_f}{-Q_f - Q_c} = \frac{1}{-1 - \frac{Q_c}{Q_f}} \dots \dots \dots (7)$$

L'efficacité maximale est obtenue pour

$$\frac{Q_c}{Q_f} = -\frac{T_c}{T_f} \dots \dots \dots (8)$$

Après transformation, on a

$$COP = \frac{1}{-1 - \frac{Q_c}{Q_f}} = \frac{1}{\frac{T_c}{T_f} + 1} = \frac{T_f}{T_c - T_f} \dots \dots \dots (9)$$

Ce qui donne finalement le coefficient de performance pour une machine frigorifique est :

$$COP = \frac{T_f}{T_c - T_f} \dots \dots \dots (10)$$

- *Diagramme de Mollier (P-H) :*

Les différentes évolutions du FF de la machine frigorifique sont représentées sur le diagramme enthalpie, il s'agit du cycle frigorifique de la machine communément appelée cycle de référence ou cycle pratique par les frigoristes [6]. (Voir figure 10).

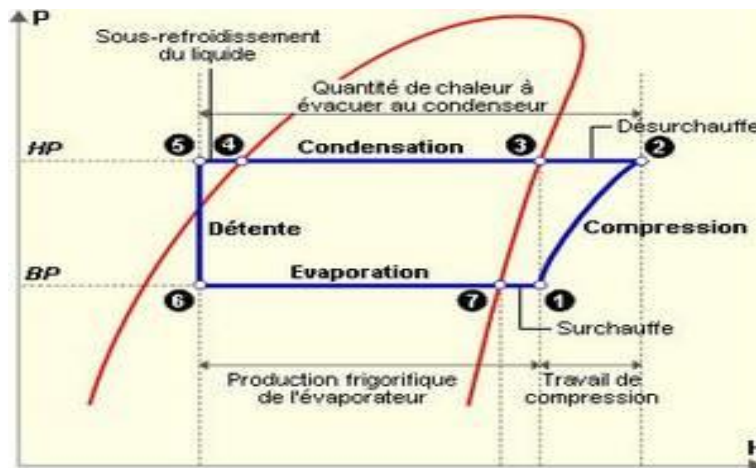


Figure 10. Cycle adiabatique

Le cycle frigorifique de référence (cycle pratique) est un compromis qui permet d'effectuer l'étude et le dimensionnement des machines frigorifiques avec une précision acceptable. En pratique, ce cycle est tracé sur les bases suivantes [6] :

- Compression isentropique
- Détente iso enthalpie
- Surchauffe de 5°C (pour étude de conception) ou SH mesurée
- Sous-refroidissement de 5°C (pour étude de conception) ou SR mesuré.

- *Diagramme de Clapeyron :*

Le diagramme de Clapeyron, ou diagramme PV, est une représentation où on indique la pression P d'un système thermodynamique en fonction de son volume massique V (en physique), ou de son volume molaire (en chimie) pour suivre l'évolution d'une transformation [11]. (Voir figure 11).

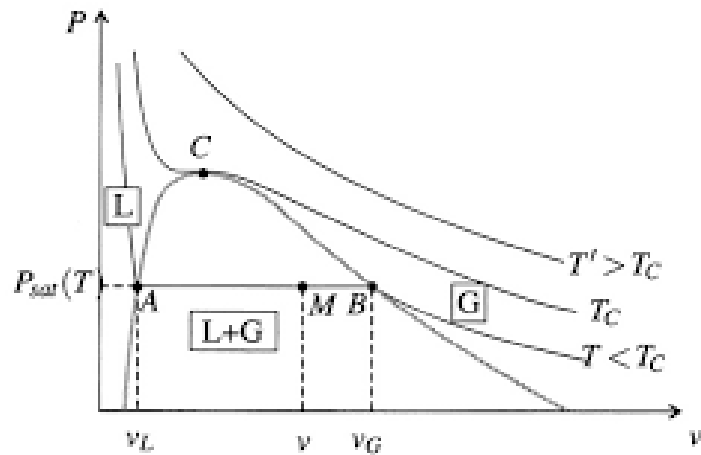


Diagramme de Clapeyron ($P > P_c$ et $T > T_c$).

Figure 11. Diagramme de Clapeyron

Dans le diagramme de Clapeyron les isobares sont horizontales et les isochores verticales les isothermes sont des courbes en $1/V_m$ L'enthalpie du gaz parfait ne dépendant que de la température les isenthalpiques se confondent avec les isothermes.

Les isentropiques sont des courbe en $1/(V_m^\gamma)$ de pentes plus fortes que les isothermes

L'aire sous la courbe correspond à l'opposé du travail échangé lors de la transformation

$$\alpha = \int_1^2 P dV_m = \int_1^2 -\delta W_e = -W_e \dots \dots \dots (11)$$

1.5 Fluide frigorigène

Un fluide frigorigène est un fluide qui permet la mise en œuvre d'un cycle de réfrigération. Il peut être pur ou un mélange de fluides purs présents en phase liquide ou gazeuse ou les deux en même temps en fonction de sa température et de sa pression. Le fluide absorbe la chaleur à basse température et à basse pression, puis libère la chaleur à une température et une pression plus élevées, généralement par un changement d'état [12]. Les fluides frigorigènes sont utilisés dans les systèmes d'absorption de chaleur (climatisation, congélateurs) ou dans les pompes à chaleur, qui absorbent l'énergie thermique de l'extérieur et la restituent à l'intérieur d'une pièce. Ces mêmes fluides peuvent également se retrouver dans d'autres applications impliquant d'autres cycles thermodynamiques, comme les turbines à vapeur, et perdent alors ou non, selon le contexte, leur qualification de fluide frigorigène.

I.5.1 Propriétés du fluide frigorigène

La principale propriété des fluides frigorigènes est de s'évaporer à une faible température sous pression atmosphérique. Les fluides frigorigènes sont utilisés dans les systèmes de production de froid. En théorie, l'air ou l'azote (des fluides courants sur notre planète...) pourraient servir de réfrigérant. En somme, tout fluide présente un potentiel en termes de réfrigération. Mais, en pratique, il en est tout autrement [13]. Ces fluides doivent répondre aux critères suivants :

- Les fluides réfrigérants sont sélectionnés principalement pour leur grande propriété d'absorption de chaleur (calories) lorsqu'ils passent de leur phase liquide à leur phase gazeuse (la chaleur absorbée par le fluide lors du changement d'état est appelée : chaleur latente de vaporisation). Les réfrigérants sont utilisés purs ou en mélange dans les métiers du froid et de la climatisation.
- Ces fluides doivent respecter l'environnement du fait du risque de fuite dans l'atmosphère.
- Ils doivent aussi être inoffensifs pour l'homme.
- Ils sont également choisis en fonction des températures de fonctionnement des deux échangeurs du circuit frigorifique concerné (le condenseur et l'évaporateur). En effet, les fluides utilisés pour obtenir des basses températures sont différents des fluides de climatisation par exemple [13].

I.5.2 Catégories du fluide frigorigène

On distingue parmi les gaz réfrigérants différentes catégories de molécules :

a) ChloroFluoroCarbures (CFC)

Les chlorofluorocarbures ou CFC sont une sous-classe de gaz fluorés, eux-mêmes faisant partie de la famille des halogénoalcanes. Ce sont des gaz composés dérivés des alcanes, où tous les atomes d'hydrogène ont été substitués par des atomes de chlore et de fluor. Ils font partie des gaz qui contribuent à la dégradation de la couche d'ozone. On a quelque fluide CFC [14] : voir tableau (1).

Tableau 1. Fluide frigorigène CFC

Cod réfrigérant	Nom	Formule brute
R11	Trichlorofluorométhane	CCl_3F
R12	Dichlorodifluorométhane	CCl_2F_2
R114a	1,1-dichloro-1,2,2,2-tétrafluoroéthane	$\text{C}_2\text{F}_4\text{Cl}_2$
R214	1,2,2,3-tétrachloro-1,1,3,3-tétrafluoropropane	$\text{C}_3\text{F}_4\text{Cl}_4$

b) HydroChloroFluoroCarbures (HCFC)

Les hydrochlorofluorocarbures ou HCFC, sont des gaz organiques dont la molécule est formée d'atomes de chlore, de carbone, de fluor et d'hydrogène. Ce sont des alcanes halogénés. Ils sont utilisés comme gaz réfrigérants et comme agents propulseurs dans les aérosols, en remplacement des CFC, interdits à partir de 2000 à cause de leur contribution à l'effet de serre et à la destruction de la couche d'ozone. Les HCFC sont moins stables que les CFC, donc moins destructeurs, mais conservent cependant un impact non négligeable sur la couche d'ozone et sont de puissants gaz à effet de serre. Ainsi, le protocole de Copenhague appelle à leur interdiction d'ici 2030 pour les pays industrialisés et 2040 pour les pays en développement. On a quelque fluide HCFC [14] : voir tableau (2).

Tableau 2. Fluide frigorigène HCFC

<i>Cod réfrigérant</i>	<i>Nom</i>	<i>Formule brute</i>
<i>R21</i>	Dichlorofluorométhane	CHFCl_2
<i>R31</i>	Chlorofluorométhane	CH_2FCl
<i>R121</i>	1,1,2,2-tétrachloro-1-fluoroéthane	C_2HFCl_4
<i>R121a</i>	1,1,1,2-tétrachloro-2-fluoroéthane	C_2HFCl_4

c) HydroFluoroCarbures (HFC)

Les hydrofluorocarbures (HFC, ou F-gases pour les anglophones) sont des halogénoalcanes gazeux de la famille des fluorocarbures (FC). Ces gaz fluorés d'origine synthétique composés d'atomes de carbone, de fluor et d'hydrogène tendent à remplacer à la fois les chlorofluorocarbures (CFC) et les hydrochlorofluorocarbures (HCFC) comme fluides frigorigènes, propulseurs de sprays et pour la fabrication de mousses isolantes. En plus de ne pas directement attaquer la couche d'ozone, les HFC ont une efficacité énergétique bien meilleure que les CFC et des propriétés techniques proches de celles des CFC : ininflammabilité ou inflammabilité modérée dans le cas du HFC-152a, faible toxicité et température de fusion permettant de les utiliser comme fluides frigorigènes. Les HFC peuvent remplacer les CFC dans la majorité de leurs applications, tout en réduisant la quantité de gaz nécessaire. N'attaquant pas directement la couche d'ozone, ils ont été présentés comme une alternative aux CFC, mais leur contribution au réchauffement climatique est néanmoins importante car leur pouvoir de réchauffement global (PRG) sur cent ans peut être jusqu'à 14 800 fois supérieur à celui du COP 21. En tant que gaz à effet de serre, ils relèvent du Protocole de Kyoto, mais son application n'est obligatoire que pour les pays développés (alors que l'usage des HFC augmente surtout dans les pays tropicaux en développement pour les besoins de réfrigération/climatisation). On a quelque fluide HFC [14]: voire tableau (3).

Tableau 3. Fluide frigorigène HFC

Cod réfrigérant	Nom	Formule brute
R23	Trifluorométhane	CHF_3
R32	Difluorométhane	CH_2F_2
R41	Fluorométhane	CH_3F
R125	Pentafluoroéthane	C_2HF_5

I.5.3 Réglementations

En raison de l'appauvrissement de la couche d'ozone, le remplacement des CFC (chlorofluorocarbures) et HCFC (hydrochlorofluorocarbures) par les HFC

(hydrofluorocarbures) a été rendu obligatoire suite au protocole de Montréal (1987) visant alors l'interdiction à terme de l'utilisation des CFC et des HCFC. Comme les HFC ont un potentiel de réchauffement global très important, une nouvelle réglementation à travers le protocole de Kyoto a été signée dans le but de réduire les gaz à effet de serre. La déclinaison du protocole de Kyoto au niveau européen s'est traduit par la réglementation « F-Gaz » qui incite au confinement et réglemente l'utilisation des gaz fluorés ainsi que leur récupération et la régénération [15]. Cette réglementation a pour objectif de réguler le secteur de la réfrigération via des normes environnementales.

1.5.4 Fluide frigorigène Naturel

On utilise de plus en plus le fluide frigorigène naturel dans les systèmes de réfrigération et de climatisation aujourd'hui. Et pour cause, l'interdiction des hydrocarbures halogénés CFC et HCFC. Leurs impacts environnementaux sont énormes. Les HFC et les fluides frigorigènes naturels émergent petit à petit, car ils sont moins nocifs pour l'environnement. Ils sont étudiés pour s'adapter aux installations thermodynamiques de réfrigération, de climatisation ou de pompe à chaleur. On a des exemples sur les fluides naturels [16] :

L'eau ou R718 :

L'eau appartient à la famille des fluides inorganiques. Elle n'est donc pas toxique. Son potentiel thermodynamique est importante. Malgré tout, elle ne permet pas encore la production de froid en dessous de 0 °C. Elle n'est pas exploitable dans les cycles de compression. Rares sont les domaines où on l'utilise en tant que fluide frigorigène [16].

CO₂ ou R744 :

Avec un GWP =1, le dioxyde de carbone est un fluide frigorigène qui suscite beaucoup l'intérêt dans le monde de la réfrigération et de la climatisation. Il est ininflammable, non toxique et peu coûteux. Il présente aussi des performances intéressantes malgré quelques contraintes. Une pression élevée, allant au-delà de 100 bars, est nécessaire pour le faire fonctionner dans la production de froid. Cela implique forcément l'utilisation de composants adaptés pour des raisons de sécurité. Le CO₂ reste également peu performant dans un climat chaud. En ce moment, il est plus utilisé dans les processus de réfrigération, notamment dans les

procédés agroalimentaires et la production de froid négatif. Les domaines d'application préconisés : commerce alimentaire, pompes à chaleur, réfrigération industrielle, refroidissement d'équipements électroniques, etc. [16].

L'ammoniac (NH₃ ou R717)

L'ammoniac est un fluide de type B2L, c'est-à-dire toxique et légèrement inflammable. Il a de meilleures propriétés de transfert de chaleur et s'avère très économe en énergie. Son GWP est égal à zéro, ce qui en fait un fluide frigorigène très écologique. Les coûts de l'ammoniac et de son exploitation sont moins élevés comparés à ceux des HFC. Cependant, son utilisation demande de se soumettre à des réglementations et à des normes de sécurité très strictes. Le domaine d'application de ce fluide frigorigène naturel reste pour le moment les installations industrielles. Pour vous conformer aux réglementations, Friga-Bohn vous propose des produits frigorifiques innovants, pensés pour s'adapter aux fluides frigorigènes naturels. Contactez ce grand spécialiste de la réfrigération pour bénéficier d'équipements répondant à la fois aux normes en vigueur et à vos besoins spécifiques [16].

Fluide R600a

L'isobutane, ou R-600a, est un hydrocarbure utilisé dans certains équipements de réfrigération, comme les réfrigérateurs domestiques ou les petits appareils de réfrigération commerciale. Le R-600a a une capacité volumétrique inférieure de 50 % à celle du R-12 ou du R-134a, il ne peut donc pas être considéré comme un substitut de ces derniers. Il est très important, lorsque l'on travaille avec des réfrigérants de type hydrocarbure, qu'ils soient d'une grande pureté, car toute proportion avec d'autres impuretés, comme les sulfures, l'eau, etc., peut contribuer à la dégradation des huiles de lubrification de l'installation, à une panne des compresseurs, etc. Par ailleurs, si l'hydrocarbure n'est pas de grande pureté, il arrive parfois que d'autres hydrocarbures y soient mélangés, ce qui peut modifier considérablement les propriétés physiques et thermodynamiques de l'hydrocarbure d'origine. L'isobutane utilisé dans les applications de réfrigération n'étant pas odorisé comme les produits domestiques (l'hydrocarbure domestique est odorisé afin d'être rapidement détectable en cas de fuite), il n'est pas facilement détectable en cas de fuite [17].

I.7 Analyse bibliographique

De nombreuses études visant à optimiser la performance des cycles frigorifiques existent dans la littérature. Dans la dernière partie de ce chapitre, une synthèse bibliographique consacrée à une revue des différents travaux concernant les systèmes de réfrigération domestique. Dans la réfrigération domestique, les principaux facteurs qui influencent la consommation d'énergie des réfrigérateurs-congérateurs :(1) la température ambiante, (2) l'ouverture des portes, (3) le réglage des commandes/thermostats ou la température du compartiment, (4) l'humidité relative, et (5) la charge des aliments [18].

I.7.1 Effet de température ambiante

La plupart de la charge thermique d'un réfrigérateur-congérateur se fait par conduction à travers la paroi du réfrigérateur-congérateur. ASHRAE [19] montre qu'environ 60 à 70 % de la charge totale du réfrigérateur et du congélateur provient de la conduction des parois de l'armoire. Cette charge de conduction est proportionnelle à la différence entre la température ambiante et la température interne du compartiment/congélateur. Plus la différence est importante, plus la charge imposée à un réfrigérateur-congérateur est élevée. C'est pourquoi la température de l'air autour d'un réfrigérateur-congérateur est un facteur déterminant de la consommation d'énergie. Comme l'efficacité du compresseur diminue également lorsque la température ambiante augmente, la consommation d'électricité d'un réfrigérateur-congérateur est très sensible à la température ambiante. Selon Meier [20], la consommation d'énergie varie de 1,25 kWh/jour à 2,6 kWh/jour avec une augmentation de 11 °C de la température ambiante. L'auteur a mené l'expérience pour un réfrigérateur de style américain. Dans cette expérience, la consommation d'énergie a augmenté de 560 Wh/jour à 1120 Wh/jour lorsque la température ambiante est variée entre 16 °C à 31 °C dans un modèle produit en Malaisie. La consommation d'énergie a augmenté d'environ 40 Wh pour une augmentation de 1 °C de la température. Saidor et al. [21] La température ambiante et d'autres facteurs, tels que l'ouverture de la porte et la position du thermostat, ont été évalués expérimentalement sur la consommation d'énergie d'un réfrigérateur.

I.7.2 Effet de ouvertures de portes

Lorsque la porte du réfrigérateur-congérateur est ouverte, l'air chaud et humide se mélange à l'air froid à l'intérieur du réfrigérateur-congérateur. Lorsque la porte est fermée, une masse d'air à température ambiante est piégée dans le compartiment. Le gain de chaleur pendant

l'ouverture des portes est dû (1) au transfert de chaleur/vapeur sur les surfaces intérieures du réfrigérateur/congélateur, et (2) à l'échange d'air en vrac. Les cinq catégories de charges suivantes sont associées aux ouvertures de portes Alissi (1987). Il s'agit de :

- Le transfert de chaleur par convection de l'air ambiant chaud circulant sur les surfaces plus froides du réfrigérateur.
- Le transfert de chaleur latente avec la condensation de la vapeur d'eau de l'air humide circulant sur les surfaces plus froides du réfrigérateur.
- Le transfert de chaleur par rayonnement de l'environnement vers les surfaces intérieures.
- Le transfert de chaleur sensible de la masse d'air chaud dans l'espace refroidi après la fermeture de la porte.
- Le transfert de chaleur latente dû à la déshumidification de l'air après la fermeture de la porte.

Alissi [22] a montré une augmentation d'environ 32% de la consommation d'énergie des réfrigérateurs et congélateurs pour 100 ouvertures de porte. Grimes et al. [23] ont constaté une consommation d'énergie supérieure de 6 à 8 % pour 24 ouvertures de porte. Parker et Stedman [24] ont estimé que chaque ouverture de porte entraîne une augmentation de 9 Wh de la consommation d'énergie. Cette expérience a été réalisée avec de multiples ouvertures de portes, en commençant par 20 et en atteignant 75 au cours des 10 premières heures du début de l'exploitation. Ces enquêtes montrent une augmentation d'environ 10 Wh de la consommation d'énergie pour chaque ouverture de porte. Khan et al [25] Ce travail de recherche présente l'étude expérimentale des effets du nombre d'ouvertures de la porte, de la durée de la porte restant ouverte, de la température ambiante et de la charge thermique sur la consommation d'énergie d'un réfrigérateur domestique. Les expériences ont été menées à condition que le nombre d'ouvertures de porte varie de 2 à 8 par heure, tandis que la durée d'ouverture de la porte restée ouverte variait de 10 à 40 secondes. L'essai a été réalisé sous la condition que la température ambiante varie de 20 à 33°C à différentes charges thermiques variant de 0,001 m³ à 0,007 m³ d'eau fraîche ; chaque durée expérimentale était de 6 heures. D'après les résultats des tests, la consommation d'énergie du réfrigérateur avec ouverture de porte a augmenté par rapport au même produit sans ouverture de porte. Sans ouverture de porte. En fonction du nombre d'ouvertures de porte, on observe une augmentation de la consommation d'énergie de 7 à 30 % par rapport à la condition de porte fermée. Le résultat du test montre également qu'une quantité significative de consommation d'énergie augmente parce que le temps d'ouverture de la porte augmente. En fonction du temps d'ouverture de la porte, la consommation d'énergie varie de 3 à 20 %. Les résultats expérimentaux confirment également que la consommation

d'énergie augmente d'environ 15% à 53% lorsque la température ambiante passe de 20 à 33°C. Le résultat du test prouve également qu'une quantité importante de la consommation d'énergie augmente parce que la charge de l'armoire (charge thermique) a augmenté. En fonction des différentes charges thermiques, une augmentation de la consommation d'énergie de 18% à 59% a été observée par rapport à une condition sans charge. Consommation d'énergie a été observée par rapport à la condition de non-charge. Si les utilisateurs sont sérieux, une quantité significative d'énergie pourrait être économisée en utilisant correctement le réfrigérateur.

1.7.3 Effet du réglage du thermostat ou de la température interne

Un réfrigérateur-congélateur consommera moins d'électricité si son thermostat est réglé sur une température plus élevée (plus chaude). En raison de la conception à un seul évaporateur de la plupart des réfrigérateurs-Congélateurs. Un changement de température dans le compartiment de congélation entraîne généralement un changement de température dans le compartiment des aliments frais. Grimes et al. [23] ont examiné l'impact de la température du compartiment sur la consommation d'énergie d'un réfrigérateur à dégivrage automatique datant de 1977. La consommation d'énergie a augmenté de 26 % entre les réglages les plus chauds acceptables et les plus froids possibles. Une étude plus récente portant sur neuf grands réfrigérateurs-congélateurs américains datant de 1993, Meier [26], a constaté une augmentation de 6,5 % de la consommation d'énergie pour une réduction de 1 °C de la température du congélateur. Nous avons mené des expériences à partir du plus chaud du réglage du thermostat (position 1) au réglage le plus froid du thermostat (position 7) pour étudier son effet sur la consommation d'énergie. Dans cette enquête, la moyenne, la plus chaude, les températures moyennes, et la plus froide du thermostat ont été autour de -4 °C (position de réglage 1) -13.3 °C (position de réglage 4), et -18 °C (position de réglage 7), respectivement. La consommation d'énergie a augmenté d'environ 790 Wh de la position la plus chaude à la position la plus froide. Cela représente une augmentation d'environ 10 % de la consommation d'énergie pour chaque baisse de température d'un degré. Geppert et al [27] afin de déterminer la sensibilité de la consommation d'énergie des réfrigérateurs à divers facteurs opérationnels reflétant les conditions de vie réelles, quatre réfrigérateurs différents ont été testés en laboratoire à l'aide d'un modèle de Box-Behnken avec trois variables (température ambiante, position de réglage du thermostat et charge thermique supplémentaire due au stockage des aliments chauds). à trois niveaux différents. Les études montrent que la consommation d'énergie des réfrigérateurs est

très sensible aux conditions de fonctionnement réelles. La consommation énergétique quotidienne d'un même appareil peut varier entre quelques wattheures et 2000 Wh, voire plus, en fonction des facteurs de fonctionnement respectifs. L'analyse de la variance (ANOVA) révèle que la température ambiante est le facteur le plus influent sur la consommation d'énergie d'un réfrigérateur. La consommation d'énergie est également affectée, dans une moindre mesure degré, par la température interne du compartiment et la charge thermique supplémentaire. Les résultats des tests sont présentés et les données de consommation d'énergie sont comparées aux valeurs indiquées sur le label énergétique européen. Les résultats sont également discutés en ce qui concerne la question de savoir si l'étiquette énergétique et la norme d'essai associée sont appropriées pour prévoir la consommation d'énergie réelle en cours d'utilisation.

1.7.4 Effet de l'humidité relative

L'humidité a peu d'effet sur la consommation d'énergie. Grimes et al. [23] ont signalé une augmentation de 5% de la consommation d'énergie lorsque l'humidité relative passe de 40% à 60%. L'impact énergétique le plus important de l'humidité est probablement le fonctionnement des chauffages anti condensation à résistance électrique. Lorsque l'humidité augmente, la vapeur se condense sur la paroi du réfrigérateur-congélateur. Un chauffage anti-sueur se met en marche pour éviter que la condensation n'augmente la consommation d'énergie du réfrigérateur-congélateur. Dans cette expérience, nous avons augmenté le taux d'humidité de 60% à 90% et l'augmentation de la consommation d'énergie correspondante était de 10%.

1.7.5 Effet des charges alimentaires sur la consommation d'énergie

Parmi les différents facteurs influençant le bon fonctionnement d'un réfrigérateur domestique, la distribution adéquate du flux d'air dans les compartiments est mise en avant. Ce qui a un impact sur le comportement thermique et, à son tour, sur la consommation d'énergie. À cet égard, la charge thermique (aliments stockés dans les compartiments du réfrigérateur) influence également le comportement thermique, où le consommateur joue un rôle clé dans l'utilisation de cet appareil [28]. Geppert et Stammiger [29] ont évalué le comportement du consommateur par rapport à l'utilisation du réfrigérateur et les principales caractéristiques de ces appareils. Ils ont analysé les conditions de la température ambiante, la température interne du compartiment et les sources de chaleur à proximité du réfrigérateur, aspects qui influencent les performances thermiques et énergétiques de l'appareil ménager. Sur la base des résultats, les auteurs ont formulé une série de recommandations sur l'efficacité énergétique, et ont conclu

qu'il y a un manque d'informations fournies aux consommateurs à ce sujet. Par la suite, les auteurs ont étendu leur étude pour évaluer expérimentalement certains des facteurs opérationnels qui reflètent l'utilisation quotidienne des réfrigérateurs, tels que la température ambiante, la position du thermostat et la charge thermique influencée par la quantité d'aliments. Ils ont conclu que la consommation d'énergie est très sensible à la température ambiante et, dans une moindre mesure, à la température interne du réfrigérateur et à la charge thermique. Juan M. Belman-Flores et al [28], cette étude cherche à comprendre plus largement le comportement thermique et énergétique d'un réfrigérateur domestique en évaluant expérimentalement les principaux effets de la charge thermique (aliments) et de la variation de la température ambiante. Pour réaliser les expériences, la charge thermique a été classée sur la base des résultats d'une enquête menée auprès de différents consommateurs dans l'état de Guanajuato, au Mexique. Le comportement thermique des deux compartiments du réfrigérateur, la consommation totale d'énergie, la puissance du compresseur dans son premier état de marche et le coefficient de performance, selon la classification des charges thermiques et la température ambiante, ont été évalués. Enfin, il est vérifié que la charge thermique et la température ambiante ont une influence significative sur la performance énergétique du réfrigérateur.

1.7.6 Effet de la charge de réfrigérant

Le réfrigérant est le principal acteur dans la réfrigération en général. Plusieurs recherches ont été effectuées dans ce domaine par exemple. D.S. Adelekan et al [30] cette étude examine l'effet de la variation des conditions d'essai, notamment la température ambiante (19, 22 et 25 C), les charges massiques de réfrigérant R600a (40, 50, 60 et 70 g), et des concentrations de nano-lubrifiant TiO₂ (0, 0.2 et 0.4 g/L) sur les performances d'un système de réfrigération domestique R134a de 100g légèrement modifié. Les paramètres étudiés sont la température de l'air de l'évaporateur, la consommation d'énergie, le coefficient de performance et l'efficacité de seconde loi du système. L'efficacité du système. Les résultats ont montré que la performance du système de réfrigération à 0.2 et 0.4 g/L de nano-lubrifiant TiO₂, améliorée dans des conditions optimales de température ambiante et de charge massique de R600a. Dans les conditions optimales, la température de l'air de l'évaporateur et la consommation d'énergie ont été réduites dans la fourchette suivante 5.26 à 26.32 %, et 0.13 à 14.09 % respectivement, tandis que le coefficient de performance et le rendement de seconde loi ont augmenté dans une fourchette de 0.05 à 16.32 % et de 2.8 à 16 %, respectivement. Cependant, dans d'autres conditions (non optimales), la consommation d'énergie et la température de l'air de l'évaporateur

étaient plus élevées, respectivement de 0.28 à 8.26 % et de 5 à 40 %. Et de 5 à 40 % respectivement, tandis que le coefficient de performance et l'efficacité de seconde loi ont diminué dans la plage de 2.99 à 10.94 %. De 2.99 à 10.94 %, et de 0.55 à 13.43 % respectivement. En conclusion, nous avons observé des variations dans les performances du réfrigérateur en fonction des conditions d'essai. T.O Babarinde et al [31] Les systèmes de réfrigération à compression de vapeur fonctionnant au R134a sont associés à une forte demande énergétique et à des problèmes environnementaux. Les consommateurs de réfrigérateurs accordent la priorité à la consommation d'énergie lorsqu'ils choisissent leur système de réfrigération. C'est pourquoi ce travail de recherche a porté sur le R600a dans un lubrifiant MWCNT-nanol (0.4 g/L et 0.6 g/L) en remplacement du R134a dans un système de réfrigérateur domestique avec une charge massique variable de R600a (50, 60 et 70 g). Le réfrigérateur a été instrumenté à l'entrée et à la sortie du compresseur, du condenseur, du détendeur et de l'évaporateur du réfrigérateur. Deux manomètres de type Bourdon ont été connectés à l'entrée et à la sortie du compresseur du système. Les résultats ont été pris et évalués et comparés au résultat obtenu avec le réfrigérant R134a dans le système. Le résultat a montré que le R600a est plus performant en termes de COP, de consommation d'énergie et de capacité de refroidissement par rapport au R134a dans le système avec une température d'évaporateur plus basse de -11°C , une consommation d'énergie de 0.0639 kW et le meilleur COP du système. Par conséquent, le nano-lubrifiant R600a/MWCNT peut servir à remplacer le R134a dans les réfrigérateurs domestiques.

Enfin, la réduction de la consommation d'énergie des réfrigérateurs domestiques est l'objectif de tous les chercheurs en énergie. Plusieurs approches ont été explorées pour trouver un moyen de réduire la consommation d'énergie des réfrigérateurs domestique de manière sûre pour la santé des consommateurs, parmi lesquelles l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP), qui sont des matériaux liquides ou des gels placés dans les réfrigérateurs, les matériaux qui ne constituent pas une menace pour la santé des consommateurs s'ils fuient dans les aliments sont conçus pour réduire le travail du compresseur et prolonger les temps d'arrêt en dissipant la chaleur pendant les temps d'arrêt. Egalement ; Aide de réduire les fluctuations de la température.

CHAPITRE II

Matériau a Changement de Phase

Les matériaux à changement de phase et leurs applications dans les équipements frigorifiques seront présentés dans ce chapitre. Cette partie a souligné le grand intérêt du stockage thermique. Un focus sur l'intégration de MCP dans les applications frigorifiques sera présenté.

II.1 Contexte générale sur les matériaux à changement de phase

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont des matériaux capables de stocker l'énergie lors du changement de phase sous forme latente. L'objectif de ce chapitre est de présenter les matériaux à changement de phase et leur application dans le domaine de froid spécialement dans le réfrigérateur domestique. Puis, les principales caractéristiques des matériaux à changement de phase sont abordées. Un focus sur l'intégration de MCP dans les applications frigorifiques sera Présenté.

II.2 Différents types de MCP

Il existe 2 types de MCP : organique et inorganique

II.2.1 MCP organique

Les MCP organiques les plus utilisés pour le stockage d'énergie sont les paraffines et les acides gras. Les paraffines sont des chaînes carbonées obtenues lors du procédé de raffinage du pétrole de formule générale C_nH_{2n+2} ($CH_3-(CH_2)_n-CH_3$). Elles se caractérisent par une chaleur latente qui varie entre 175 et 250 kJ.kg⁻¹ et une température de fusion entre 5 et 100 °C en fonction du nombre d'atomes de carbone. Les paraffines sont stables chimiquement et thermiquement dans le temps et ne présentent pas de surfusion, mais elles ont l'inconvénient d'être inflammables et d'avoir une variation de volume très importante (supérieure à 12 %) lors du changement de phase. Les acides gras sont des chaînes carbonées obtenues à partir de graisses animales ou végétales paraffines. Ils sont également stables chimiquement et thermiquement dans le temps et ne présentent pas de surfusion, mais ils sont un peu plus coûteux que les paraffines [32]. La table 4 présent les différents types des MCP organique :

Tableau 4. Matériau a changement de phase organique

II.2.2 MCP inorganique

Les MCP inorganiques [32] ont des capacités de stockage par chaleur latente plus importante que les MCP organiques. Ils ont la spécificité d'avoir un changement de phase à une température précise. Les MCP inorganiques les plus utilisés et étudiés sont les sels hydratés.

Ils se caractérisent par une chaleur latente qui varie entre 150 et 250 kJ.kg⁻¹ Ils ont l'avantage d'être peu coûteux et disponibles, et le changement d'état se fait avec une faible variation de volume. Cependant, ils peuvent subir une importante surfusion et sont en général très corrosifs. La table 5 présent les différents types des MCP inorganique :

Tableau 5. Matériau a changement de phase inorganique

II.2.3 MCP eutectiques

Les MCP eutectiques [33] sont des mélanges composés de MCP organiques et MCP Inorganiques.

Matériaux à changement de phase	Point de fusion (°C)	Chaleur de fusion (KJ/Kgk)
Eau (H ₂ O)	0	333
Zn(NO ₃) ₂ .6H ₂ O (Zinc nitrate hexa hydrate)	36.2	246.5
Mn (NO ₃) ₂ .6H ₂ O (Manganèse nitrate hexa hydrate)	25.8	125.9
CaCl ₂ .6H ₂ O (Calcium chloride hexa hydrate)	29.0	190.8
CaBr ₂ .6H ₂ O (Calcium bromide hexa hydrate)	30.2	115.5
LiNO ₃ .6H ₂ O (Lithium nitrate hexahydrate)	30.0	296
Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O (Sodium sulphatedecahydrate)	32.4	254
Na ₂ CO ₃ .10H ₂ O (Sodium carbonate deca hydrate)	34.2	146.9
Na ₂ HPO ₄ .12H ₂ O (Sodium ortho phosphate dodecahydrate)	35.5	265
KF.4H ₂ O (Potassium fluo ride tétra hydrate)	18.5	231

II.3 Critères de choix des MCP

Pour avoir un stockage efficace, il est important de choisir un matériau à changement de phase avec une chaleur latente importante. Cependant, le choix du MCP adéquat ne dépend pas d'un seul paramètre. [33]

Matériau a changement de phase	Point de fusion (°C)	Chaleur de fusion (KJ/Kg)
CH ₃ (CH ₂) ₁₆ COO(CH ₂) ₃ CH ₃ (Butyle stéarate)	19	140
CH ₃ (CH ₂) ₁₂ COOC ₃ H ₇	19	126
CH ₃ (CH ₂) ₁₂ OH 1-tetradecanol	38	205
CH ₃ (CH ₂) (CH ₃) (Paraffine)	20-60	200

Plusieurs critères peuvent être pris en compte :

Critères thermo physiques

- La température de changement de phase
 - La chaleur latente par unité de volume
 - La conductivité thermique
 - La masse volumique
 - La dilatation thermique durant le changement de phase
- Critères chimiques
- Stabilité chimique à long terme et au cours des changements de phase
 - Dangersité - toxicité : Certains produits sont soumis à des réglementations et des

Normalisations à respecter

- Inflammabilité

Critères économiques

- Abondance et disponibilité
- Prix du MCP

II.4 Les avantages et les inconvénients de MCP

L'objectif principal de l'application des MCP à la réfrigération est de réduire ou de déplacer la charge de refroidissement, tout en maintenant une température stable pour l'utilisation finale, c'est-à-dire en gardant le contenu du réfrigérateur constamment froid. [34]

II.4.1 Les avantage

Les MCP peuvent permettre réaliser des économies d'énergie, d'améliorer l'efficacité du système de réfrigération, de prolonger la durée de vie de l'équipement et de réduire les coûts de maintenance. Dans le cas de la réfrigération, la réduction du nombre et de la volatilité des fluctuations de température a des impacts positifs sur la qualité des aliments, l'intégrité des vaccins et d'autres produits réfrigérés utilisant le MCP.

Du point de vue des services publics et du réseau, l'un des avantages les plus cohérents et les plus évidents des MCP est leur capacité à permettre une gestion flexible de la charge. Le pré-refroidissement d'un système de réfrigération avec des MCP avant un événement de pointe ou une panne de courant permet aux exploitants de bâtiments de permettre une gestion flexible de la charge énergétique, car les MCP offrent une énergie de refroidissement stockée. Cet attribut des MCP signifie que le système est non seulement moins susceptible d'ajouter de la charge

lors d'un événement de pointe, mais réduit également considérablement le besoin de carburants de secours inefficaces ou à plus forte intensité de carbone. De plus, les avantages des MCP en matière de gestion flexible de la charge ont des réductions associées des émissions de gaz à effet de serre (GES) dans les zones qui s'approvisionnent en énergie à partir de sources non renouvelables.

II.4.2 Les inconvénients

- Bien que présents dans le commerce depuis quelques années maintenant, les MCP restent des technologies moins abordables que les isolants classiques, notamment en ce qui concerne leur utilisation dans l'habitat. Néanmoins, le surcoût généré à l'investissement peut se retrouver rapidement amorti grâce aux économies d'énergie réalisées, comme le démontre une étude de l'INSA de Lyon sur un produit déjà commercialisé, dont le temps de retour sur investissement est d'environ 8 ans.
- La surfusion correspond à l'état liquide d'un corps alors que sa température est inférieure à la température de cristallisation. Elle n'apparaît que pour certains types de MCP comme les matériaux inorganiques.
- Les vitesses de cristallisation des MCP sont relativement faibles. S'il faut trop de temps au matériau pour accumuler ou libérer de l'énergie, celui-ci perd alors en efficacité dans les applications pratiques (incapacité à "lisser" les pics de températures par exemple).
- Lors du changement de phase du MCP, l'échange thermique a lieu à l'interface solide/liquide. Lorsque le front de solidification ou de fusion se déplace, il laisse derrière lui une nouvelle phase (solide ou liquide) que le flux thermique doit traverser avant d'atteindre le front en question. Plus l'épaisseur de cette phase est importante et plus la résistance thermique qu'elle engendre est grande.

Malheureusement, les MCP ont une conductivité thermique assez faible (de l'ordre de 0,15 W/m.K) ce qui empêche d'ores et déjà un bon transfert thermique. Ce phénomène est alors amplifié par l'épaisseur de la phase à traverser. Il faut donc, si l'on souhaite limiter ces phénomènes de résistance dus au déplacement du front thermique, faire en sorte que l'épaisseur à traverser soit la plus petite possible. C'est pour cela que l'on utilise souvent des microcapsules sphériques qui changent facilement de phase sur l'ensemble de leur volume.

- L'encapsulation semble être une bonne solution au confinement des MCP. En effet, lorsque ce dernier est à l'état liquide, il n'a plus de tenue physique et nécessite un contenant. La difficulté

technologique consiste à maximiser les échanges thermiques par tous les moyens (en choisissant de bons conducteurs thermiques pour la fabrication des capsules par exemple).

- Les MCP utilisés dans l'habitat auraient une durée de vie égale ou supérieure à celle des bâtiments actuels.

II.5 La chaleur latente

La chaleur latente (ou enthalpie) de changement d'état d'une masse ou quantité de matière est la quantité d'énergie qu'il faut lui communiquer pour qu'elle passe de l'état initial (solide, liquide ou gazeux) à un autre état. La valeur de chaleur latente est dépendante de la pression (l'eau par exemple ne bout pas à la même température au niveau de la mer qu'en altitude). Sous la pression atmosphérique la chaleur latente de l'eau est de 333 kJ/kg pour l'eau à 0 °C (c'est à dire qu'au niveau de la mer, il faudra 333Kj pour faire passer 1Kg de glace à l'état liquide). Les valeurs des chaleurs latentes et, plus particulièrement, de celles de vaporisation des fluides frigorigènes sont très utilisées pour les calculs de machines frigorifiques (pompes à chaleur, réfrigérateurs, etc.). [35]

Formule :

$$L_{ch} = Q/m \dots\dots\dots (12)$$

Avec :

m : masse Kg.

L : chaleur latente spécifique d'une substance.

Q : énergie relâchée ou absorbée lors du changement.

II.5.1 Stockage par chaleur latente

Stocker la chaleur fatale récupérée afin de permettre une utilisation décalée dans le temps. Le stockage par chaleur latente est une solution de stockage thermique qui exploite la chaleur latente d'un Matériau à Changement de Phase (MCP), autrement dit sa capacité à passer de l'état solide à l'état liquide (fusion) sous l'effet de la chaleur. L'énergie de changement de phase est absorbée lors de la fusion du MCP et est restituée lors de sa solidification. Cette solution nécessite l'utilisation d'un fluide caloporteur pour transférer la chaleur de la source à l'unité de stockage. Le MCP subissant des cycles de fusion/solidification, il ne peut être utilisé directement comme fluide de transfert. Les technologies de transfert de chaleur sont diverses : échangeur tubes ailettes, échangeur multitubes, encapsulation du MCP. Les schémas suivants expliquent les cycles de stockage et de décharge de l'énergie :

Lorsqu'un fluide chaud entre en contact (indirect) avec le MCP, le MCP passe de l'état solide à l'état liquide (fusion) captant la chaleur du fluide. Voir figure 12

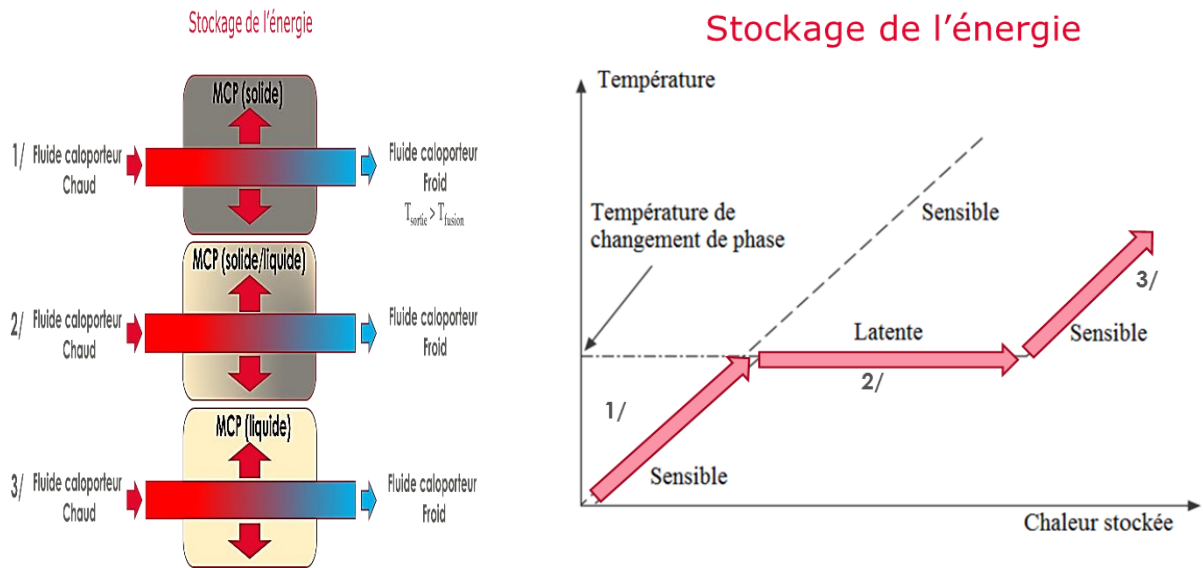


Figure 12. Stockage de l'énergie.

A l'inverse si le fluide est froid, le MCP en se solidifiant restitue sa chaleur au fluide caloporteur. Voir figure 13

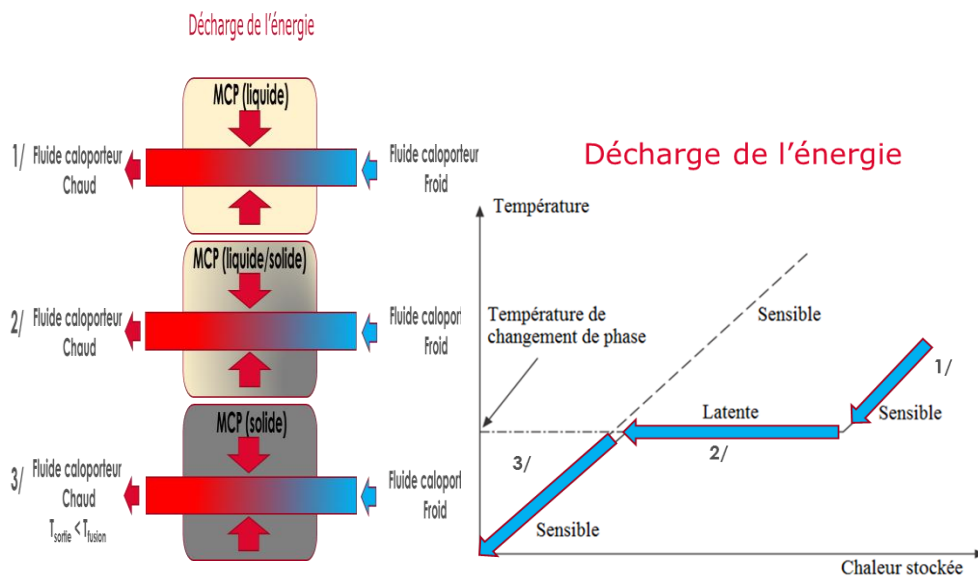


Figure 13. Décharge de l'énergie.

Pour des applications industrielles dont la température de stockage est supérieure à 100 - 150 °C, ce sont principalement les paraffines, les acides gras et des sels hydratés qui sont considérés. Les enthalpies de fusion de ces composés varient de 150 à 600 kJ. L-1. [36]

II.5.2 Le changement de phase d'un point de vue énergétique

Premièrement, il y a le refroidissement du liquide où le corps pur libère de la chaleur sensible pour abaisser sa température de manière à revenir à l'équilibre. Cette étape s'achève lorsque la température de fusion est atteinte. Ensuite, c'est le changement de phase à température constante égale à la température de fusion, La chaleur latente est dégagée. Cette étape s'achève quand tout le corps pur est en phase solide. Troisième étape, le corps pur à l'état solide se refroidit en libérant de la chaleur sensible pour atteindre la température finale d'équilibre T2. L'énergie totale libérée pendant cette transformation avec le passage de T1 à T2 vaut (Voir figure 14) :

1ère étape :

$$h_l = m \times C_{pl} \times (T_1 - T_f) \dots\dots\dots (13)$$

2ème étape :

$$m \times L_{ch} \dots\dots\dots (14)$$

3ème étape :

$$h_s = m \times C_{ps} \times (T_f - T_2) \dots\dots\dots (15)$$

Avec :

CP_l la capacité calorifique massique du liquide, CP_s la capacité calorifique massique du solide et L_{ch} la chaleur latente de fusion. L'aire sous la courbe de flux représente cette énergie échangée [37].

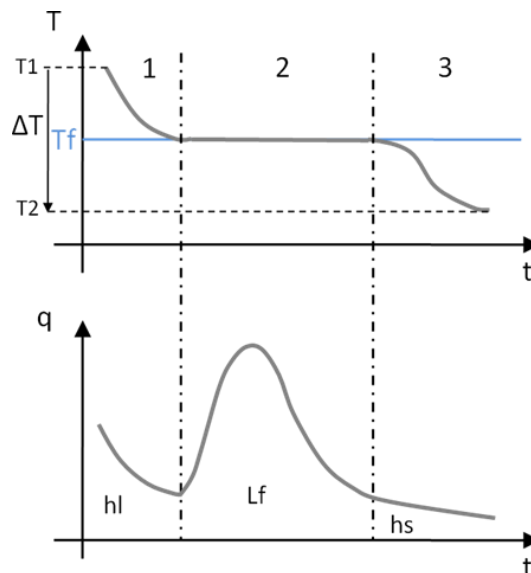


Figure 14. Réponse en température et en flux d'un corps pur idéal lors d'une solidification.

II.6 Les caractéristiques de MCP

De nombreuses caractéristiques sont souhaitées pour un MCP. Puisqu'aucun matériau ne peut satisfaire tous les désirs, le choix d'un MCP pour une application donnée nécessite un examen attentif des propriétés de divers candidats, en tenant compte de leurs mérites et défauts relatifs et, dans certains cas, d'un certain degré de compromis. Les propriétés de nombreux MCP ont été étudiées. Il convient de noter, cependant, que les propriétés des produits de qualité industrielle, qui sont utilisés dans les applications pratiques, peut s'écarter largement des valeurs rapportées en raison de la présence d'impuretés, de variations de composition (mélanges, coupes de distillation) et distribution de longueur de chaîne (dans le cas des polymères). La dilution par des additifs, tels que les agents stabilisants nécessaires aux hydrates de sel, modifient également les propriétés thermiques et, en particulier, la capacité de stockage. Les sélections doivent ainsi être basées sur des valeurs testées des produits et non simplement sur la fiche de manufacturier (lorsque possible). [37]

II .7 Etat de l`art sur l`intégration de MCP dans la réfrigération

Cette partie présente un état de l'Art sur l'intégration des matériaux à changement de phase dans les équipements frigorifiques. Ensuite l'effet du MCP sur les performances de Système de réfrigération, enfin une Application du changement de phase pour l'amélioration de l'efficacité des congélateurs domestiques.

II .7.1 Applications des MCP dans les équipements frigorifiques

Cette partie présente les différentes intégrations des MCP dans les équipements frigorifiques :

II.7.1.1 Transports frigorifiques :

Le transport frigorifique est un maillon important de la chaîne du froid. Ce maillon représente un enjeu énergétique fort car il contribue fortement aux émissions de gaz à effet de serre au travers de la production de froid pour la conservation des denrées transportées et par la fonction transport. Aujourd'hui de nombreux camions frigorifiques utilisés pour les livraisons journalières intègrent des plaques eutectiques pour stocker l'énergie. Ces plaques de MCP sont chargées la nuit sur le secteur puis elles assurent le maintien en température des denrées pendant les livraisons journalières. Ces systèmes sont efficaces, mais peuvent s'avérer insuffisants lors

de périodes estivales et avec des ouvertures de portes fréquentes. Par ailleurs, la présence du groupe froid dans le camion augmente la charge à vide et limite le volume disponible pour les denrées. Des solutions alternatives sont étudiées. Tassou et al. [38] ont mis en avant dans leur revue bibliographique sur le transport frigorifique, l'intérêt d'utiliser des MCP pour stocker de l'énergie, puis de la restituer lors d'un besoin frigorifique pour maintenir la température souhaitée du camion. Le stockage ou la combinaison entre système de stockage et cycle de réfrigération permet de réduire les pertes lors des ouvertures de portes et donc la consommation. Ahmed et al. [39] ont intégré des tubes de MCP dans les panneaux d'isolation des camions pour limiter les pertes vers l'extérieur. L'intégration de la paraffine sur les panneaux d'isolation a permis de réduire les transferts thermiques de 16,3 %. De plus cette nouvelle technologie a permis également de limiter les fluctuations de températures. Ainsi, cette technologie permet de réduire la taille des équipements frigorifiques et la pollution résultant de la réfrigération par moteur thermique (diesel).

II.7.1.2 Meubles frigorifiques de vents :

Très peu de travaux se sont intéressés à l'intégration des MCP dans les meubles frigorifiques de vente. Un nouveau design d'étagère a été étudié dans les travaux de Lu et al. [40]. Les MCP ont été introduits dans les tubes d'échangeurs solidaires à l'étagère. Les résultats expérimentaux ont montré que la température des paquets se trouvant sur l'étagère modifiée est réduite de 3 à 5 °C. De plus l'augmentation de température est maintenue à 1,5°C lors d'un dégivrage. D'une façon générale, les tubes échangeurs avec MCP permettent d'avoir une meilleure homogénéité de température dans le meuble sans aucune modification de la consommation électrique du meuble.

Sevault et al [41] ont étudié numériquement l'intégration des accumulateurs de MCP dans la canalisation arrière. L'échangeur utilisé est composé de 3 fluides : le MCP (de l'eau pure), l'air à refroidir et le CO₂ - le fluide de refroidissement. Les résultats ont montré qu'une variation de la géométrie de l'accumulateur de MCP (distance entre les tubes d'air et de CO₂) modifie énormément les temps de charge et de décharge des MCP. En effet, la durée de charge/décharge de MCP est de 26 mn/4,5 h pour un volume 60 l alors que la durée est de 5 h/63 h pour un volume 90 l.

Mehmet et al. [42] ont étudié l'impact de la présence d'une plaque de MCP sur les écoulements (perte de charge et vitesse) et la thermique du distributeur de boissons réfrigérées. La plaque est fixée contre la paroi de l'évaporateur qui est à 19 mm de la paroi arrière du distributeur. Le MCP utilisé est de l'eau. (Voir figure 15)

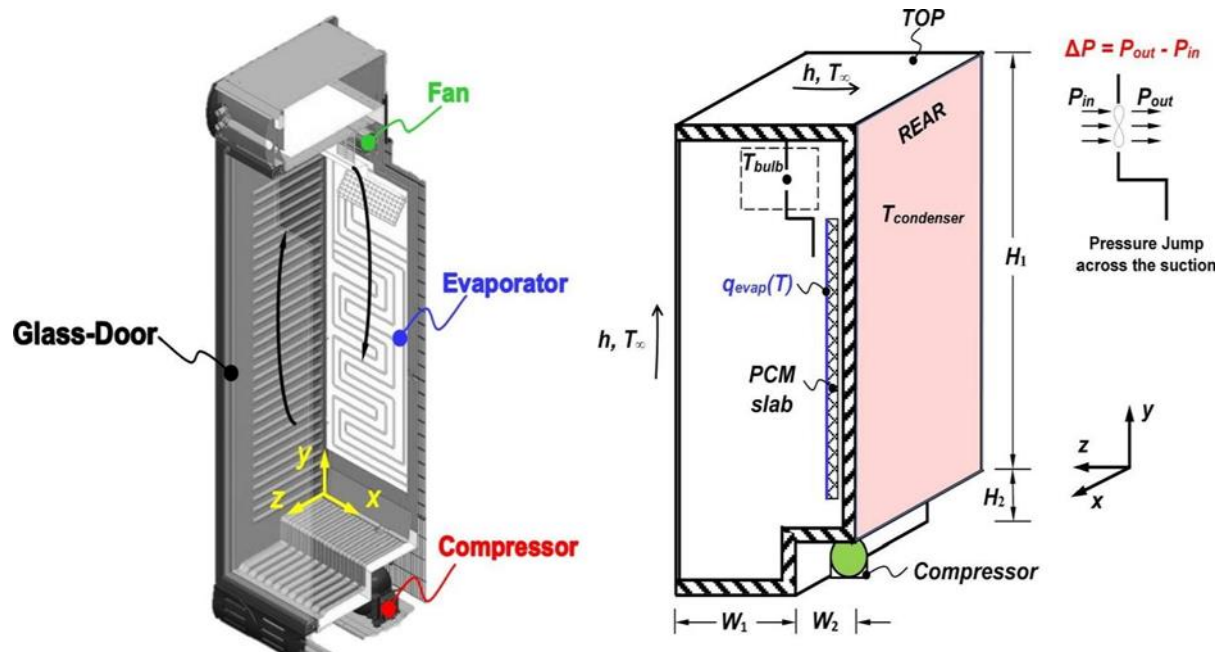


Figure 15. Emplacement de la plaque de MCP étudiée par Mehmet et al.

Les résultats de simulation ont montré que plus l'épaisseur de la plaque augmente plus la perte de charge dans le meuble augmente et la vitesse de l'air diminue (5,55 m.s⁻¹, 5,53 m.s⁻¹, 5,47 m.s⁻¹, 5,28 m.s⁻¹ et 4,94 m.s⁻¹ pour des épaisseurs de plaque de 2, 4, 6, 8 et 10 mm respectivement). De plus, la présence des MCP permet de stabiliser la température du distributeur et aussi de diminuer le nombre de cycle marche-arrêt du compresseur. La configuration étudiée se distingue d'un réfrigérateur par la présence d'un ventilateur et donc plutôt similaire à celle d'un meuble frigorifique de vente. Les auteurs soulignent la nécessité de trouver un compromis entre l'autonomie apportée par la quantité de MCP insérée et la perte de charge due à la présence de l'obstacle (un minimum a été observé pour l'épaisseur de 6 mm). Alzuwaid et al [43] ont quant à eux intégré des radiateurs remplis par 1,2 kg de MCP de type eutectique dans la canalisation arrière d'un meuble frigorifique de vente ouvert (figure). Leurs travaux numériques et expérimentaux ont montré que l'ajout des MCP permet de réduire la température de l'air lors des dégivrages et d'avoir une meilleure homogénéité de température dans le meuble. De plus, l'intégration de MCP contribue à réduire de 5 % la consommation électrique sous les conditions de « climat 3 » c'est-à-dire 20°C et 60% d'humidité relative. (Voir figure 16)

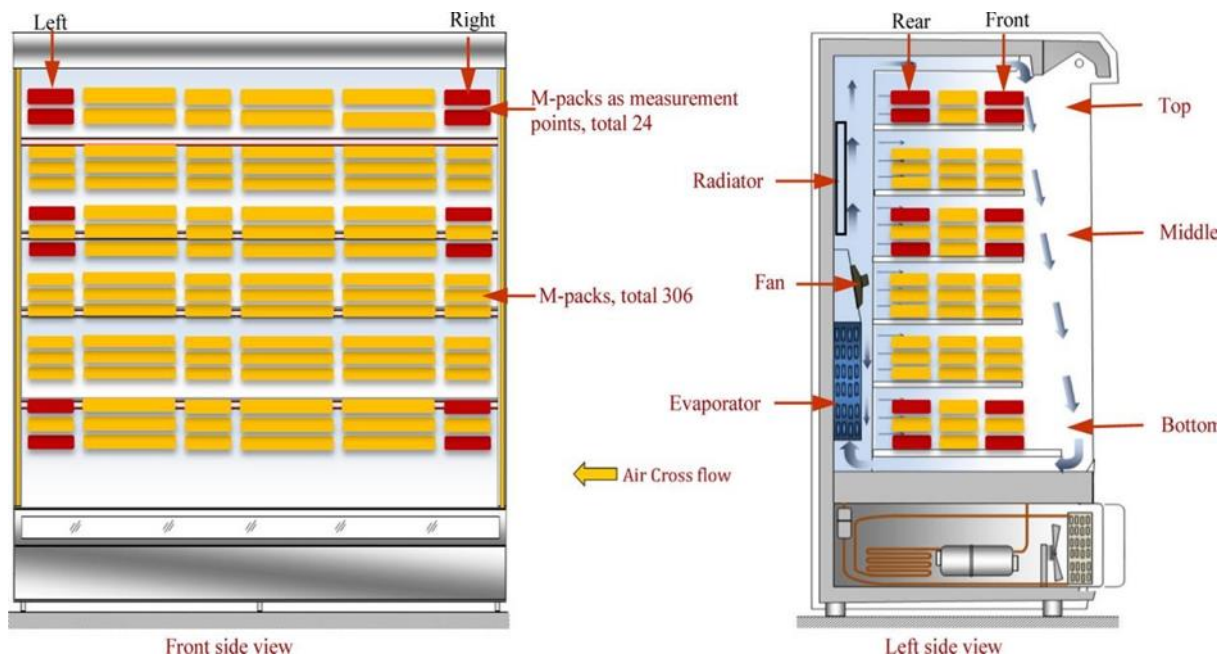


Figure 16. Emplacement de l'échangeur de MCP étudié par Alzuwaid et al.

II.7.1.3 Réfrigérateur domestique :

Azouz et al. [44] se sont intéressés à l'intégration des matériaux à changement de phase dans les réfrigérateurs. Un modèle dynamique de la machine frigorifique intégrant une plaque de matériau à changement de phase a été développée et validée expérimentalement. Les résultats ont montré que l'ajout de MCP en contact avec l'évaporateur améliore le transfert thermique au niveau de l'évaporateur. Une amélioration entre 5 et 15 % au niveau du COP a été observée. De plus le nombre de marche arrêt du compresseur a fortement diminué grâce à l'intégration des MCP qui augmente l'autonomie de l'appareil (5-9 h contrairement à un réfrigérateur conventionnel qui ne garde le froid que pendant 1-3 h) et qui engendre une diminution des fluctuations de température. Elarem et al. [45] ont étudié par une approche expérimentale l'effet de l'intégration d'un échangeur contenant du MCP sur la consommation électrique d'un réfrigérateur domestique. L'échangeur utilisé est solidaire de l'évaporateur et rempli de MCP de type organique ayant une température de changement de phase de 4 °C et une chaleur latente de 200 kJ.kg⁻¹. Puis grâce à leur modèle CFD, ils ont pu tester plusieurs emplacements de MCP dans le compartiment froid du réfrigérateur. (Voir figure 17)

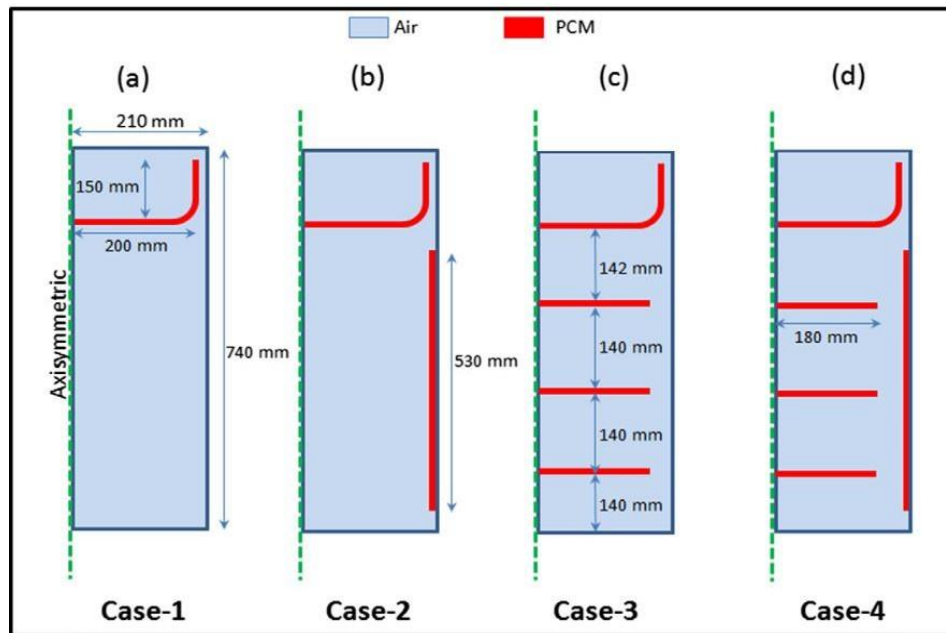


Figure 17. Emplacements étudiés des MPC dans le réfrigérateur.

Les résultats obtenus sont assez prometteurs : un meilleur COP (augmentation de 8 %) a été observé. De plus, la consommation électrique a diminué de 12 %. Enfin, les simulations ont montré qu'une stratification thermique avec des zones froides au milieu de la caisse et des zones chaudes en haut et en bas est observée pour 4 cas d'intégration des MCP. De plus, un régime thermique et aéraulique permanent est atteint plus vite pour la caisse 4 puis 3,2 et enfin 1. Une optimisation de la quantité de MCP introduite est nécessaire pour le cas n°4.

Marques et al. [46] ont développé un modèle CFD permettant de décrire les écoulements ainsi que la distribution de température pour un réfrigérateur avec stockage. Plusieurs paramètres de MCP (types, orientations, température de fusion) sont testés dans le but de comparer l'effet de ces paramètres sur la température du compartiment réfrigéré. Les résultats ont montré que la température moyenne du réfrigérateur est plus basse avec une configuration de MCP horizontale que la configuration verticale. De plus, le MCP avec une température de changement de phase plus basse assure une meilleure stabilité thermique dans ce cas. D'autres chercheurs [47] se sont intéressés à l'intégration des MCP sur les circuits frigorifiques dans le but d'améliorer les performances énergétiques de la machine.

Une étude réalisée par Gin et al. [48] sur l'effet des MCP à température négative ($-15,4\text{ }^{\circ}\text{C}$) a montré que l'intégration de panneaux de MCP sur les parois internes d'un congélateur domestique limitait à la fois les fluctuations de température d'air et des produits. Ils ont aussi montré que la taille des cristaux des crèmes glacées est plus petite pour les congélateurs modifiés. De plus, il y a moins de perte en eau avec la présence des MCP. Ces résultats s'expliquent par l'impact des MCP pour apporter une meilleure homogénéité et stabilité de

température Les mêmes chercheurs ont montré que la présence des MCP permet également de réduire les remontées en température des produits lors d'une coupure d'électricité ou des dégivrages et de diminuer la consommation électrique. En effet, contrairement à un régime stationnaire de fonctionnement des congélateurs, l'effet des MCP est très significatif lors des dégivrages (une diminution de 8 % sur la consommation électrique avec MCP lors des dégivrages) et des ouvertures de portes (une diminution de 7 % sur la consommation électrique lors des ouvertures de portes). EOró et al. [49] ont montré que l'intégration des MCP dans les congélateurs de type commercial permet de maintenir la température de consigne à 4-6 °C plus bas que dans un cas sans MCP. Les MCP permettent de réduire la remontée de température des paquets de 2 °C pendant un arrêt de compresseur de 3 h des paquets par rapport à un cas sans MCP. De plus, les auteurs ont mis en avant l'intérêt de bien choisir la température de changement de phase. En effet, avec un MCP qui change de phase à -18°C, les MCP apportent une meilleure stabilité thermique lorsque la température de régulation du meuble est à -19 °C que lorsque la température est à -22 °C.

II .7.2 Effet du PCM sur les performances de système de réfrigération

Dans cette section nous avons présenté les performances d'un réfrigérateur à base de MCP dépendent des différents aspects du MCP, tels que la température de changement de phase du MCP, l'épaisseur du MCP, la quantité du MCP, la position du MCP et la charge thermique.

II.7.2.1 Effet de la température de MCP sur les performances des systèmes de refroidissement

Les performances du système de réfrigération et la qualité des aliments stockés sont principalement influencées par la température de changement de phase du MCP. Température de changement de phase du MCP. L'objectif principal des systèmes de réfrigération est de conserver les aliments. La température de changement de phase doit donc être compatible avec cet objectif primaire. Il est nécessaire de garder à l'esprit que la sélection de la température de changement de phase est un paramètre de conception important pour le bon fonctionnement du MCP et, s'il est appliqué à l'intérieur du le compartiment, le point de fusion doit se situer dans la plage de température de fonctionnement du thermostat. [50] Une température de changement de phase élevée du MCP augmente le coefficient de performance (COP) du système en raison d'une consommation d'énergie plus faible. Du système en raison d'une consommation d'énergie plus faible. Augmente la température à l'intérieur du compartiment, température à l'intérieur du compartiment, ce qui entraîne une baisse de la qualité des aliments. [51]

D'autre part, la sélection d'un MCP à très faible température de changement de phase maintient en fin de compte une température très élevée. En revanche, la sélection d'un MCP à très faible température de changement de phase permet de maintenir une température à l'intérieur de l'armoire de stockage. Ceci est plus important pour le compartiment des aliments frais car leur température ne doit jamais descendre en dessous de zéro (pour éviter la congélation et la perte de qualité des aliments). Par conséquent, une plage de température de changement de phase maintenir entre ces deux extrêmes, haut et bas, lors de la sélection du MCP [50]. Khan et Afroz [52] ont soutenu que l'amélioration des performances en utilisant un MCP autour des serpentins d'évaporateur était beaucoup plus élevée si son point de fusion n'était pas inférieur à celui de l'eau. Point de fusion n'était pas inférieure à la température stable du compartiment. Cela peut se produire en raison de la fréquence du compresseur et à une température d'évaporation plus élevée, ce qui se traduit par un COP plus élevé. Température d'évaporation plus élevée, d'où un COP plus élevé. L'effet de sur-refroidissement est un phénomène intéressant qui devrait être pris en compte. Température de changement de phase appropriée. Le super refroidissement diminue l'efficacité du système de réfrigération puisqu'il prolonge la période de changement de phase et atténue les effets de la température de changement de phase. Puisqu'il prolonge la période de changement de phase et atténue la différence de température entre le MCP et le MCP et atténue la différence de température entre le MCP et l'évaporateur. [53] Par conséquent, il réduit le taux de transfert de chaleur et prolonge la durée de fonctionnement du compresseur. Transfert de chaleur et prolonge le temps de marche du compresseur, ce qui compresseur, ce qui augmente par conséquent la consommation d'énergie. En outre, les propriétés thermo physiques des différents MCP sont un autre facteur important. Différents MCP constituent un autre moyen de sélectionner la température de changement de phase particulière. Température de changement de phase particulière. En raison de leur disponibilité, sa grande valeur de chaleur latente et son point de changement de phase distinct, l'eau a reçu une attention signée en raison de ses caractéristiques uniques pour une utilisation comme PCM. [54] Il est également démontré dans la littérature que MCP eutectique présente un meilleur COP que le MCP eau, cela peut être dû à sa température de changement de phase (-5C) [55]. Zalba et al [56]. Ont proposé de nombreux types de MCP à utiliser dans les systèmes de réfrigération. Systèmes de réfrigération ont été suggérés par Zalba et al. [56].

II.7.2.2 Effets de la quantité de MCP sur les performances des systèmes de refroidissement

La quantité de MCP influe fortement sur les performances du système de réfrigération. Il est rapporté qu'une augmentation de la quantité significative de MCP n'a entraîné qu'une augmentation de 6 % du COP du système [57]. Cependant, même en augmentant l'épaisseur du

de ces problèmes, certains chercheurs ont essayé d'incorporer le MCP dans la section du condenseur, et ils ont montré que le placement de MCP dans la section du condenseur permet d'obtenir un COP plus élevé, une consommation d'énergie plus faible pression de condensation température et la pression de condensation. [61]

Cependant, les problèmes sont les suivants : des Co pressurisation plus fréquente, plus de pertes par déplacement de réfrigérant. Les principales limitations de l'installation de MCP dans l'évaporateur et le condenseur ne permettent pas à l'utilisateur de changer les plaques ou même le MCP correctement car il est devenu une autre partie du système. Pour éviter ces complexités, certains auteurs ont essayé d'incorporer le MCP dans le compartiment de stockage des aliments. Et ont constaté une température stable à l'intérieur du compartiment. Mais un COP plus faible inférieur à celui des deux autres positions. Par conséquent, on peut affirmer qu'il n'y a pas de solutions c pour placer le MCP à différents endroits. Par conséquent, des études rigoureuses sont nécessaires pour investiguer la position appropriée de la GCP.

La position appropriée du MCP qui permettra d'améliorer l'nescience énergétique et la qualité de l'air. L'efficacité énergétique et la qualité des aliments.

II.7.2.4 Effet du MCP sur l'évaporation Température et pression

L'amélioration de l'efficacité des échangeurs de chaleur, en particulier de l'évaporateur, est le domaine le plus important. L'évaporateur, est le domaine le plus important pour l'amélioration des performances d'un système de recyclage domestique. Dans l'amélioration des performances d'un réfrigérateur domestique. La consommation d'énergie du réfrigérateur peut être réduite d'environ 3% par l'augmentation de la température d'évaporation de 1,0 K. [59] Par conséquent, il est donc intéressant de chercher des moyens simples d'augmenter la température d'évaporation pour améliorer le COP. L'intégration du MCP dans la section de l'évaporateur a des extractifs. Le MCP fonctionne comme un échangeur de chaleur auxiliaire. Il prend la chaleur de l'armoire pendant le temps de fonctionnement du compresseur. Cette chaleur stockée est prise par le réfrigérant par conduction pendant la période de fonctionnement du compresseur. Par conséquent, la température de la bobine de refroidissement n'a pas besoin de descendre très bas pour maintenir la température souhaitée dans l'armoire. En conséquence, une température d'évaporation supérieure de 2 à 5 °C³⁵ et une pression d'évaporation supérieure de 0,132-0,171 bar³⁶ ont été observées. Azouz et al. [51] ont observé que l'incorporation de MCP l'incorporation de MCP augmentait de manière significative la température d'évaporation en raison de la chaleur latente de fusion élevée du MCP. Ils ont également observé que la température d'évaporation est plus élevée pendant le changement de phase qui est

essentiellement contrôlée par sa température de changement de phase et la pression du changement de phase. D'autre part, une pression d'évaporation plus élevée signifie une température d'évaporation plus élevée dans un système avec MCP et donc un COP plus élevé. [62] Cependant, la température d'évaporation plus faible nécessite un temps plus long pour la solidification du MCP en raison du transfert de chaleur du MCP et d'un COP plus faible.

II.7.3 Application du MCP pour l'amélioration de l'efficacité des congélateurs domestiques

Les congélateurs ont été testés dans les mêmes conditions selon la norme ISIRI 13700 [63]. L'alimentation électrique, la consommation d'énergie, les fluctuations de température et le cycle de fonctionnement propriétés du congélateur ont été testées.

Le MCP utilisé dans ce travail était une solution eutectique de polyéthylène glycol et acheté chez Marck, Allemagne. Comme précédemment mentionné, les aliments congelés doivent être conservés en dessous de 18 C, ce fait démontre que la température de changement de phase MCP doit être proche à la température de conservation des aliments congelés. Températures de changement de phase de 10 C, 15 C et 20 C ont été choisies. Ces températures ont été obtenues en mélangeant différentes compositions de PEG200 et 300. Le tableau 6 montre les compositions de MCP avec différentes températures.

Tableau 6. Compositions de MCP avec différentes températures.

MCP	Point de fusion (°C)	PEG200 (% en poids)	PEG300 (% en poids)
A	-10	4	96
B	-15	20	80
C	-20	30	70

Les MCP sont stockés dans des packs en aluminium situés dans chaque plateau du congélateur. Dans la Fig. 1, les packs MCP sont représentés. Afin de réaliser l'expérimentation un congélateur vertical (TUP 310 N PHILVER) avec un volume de stockage de 180 L a été utilisé. Tableau 7 montre les caractéristiques du congélateur utilisé.

Tableau 7. Les caractéristiques du congélateur utilisé.

Caractéristiques	Unités	Évaluer
Largeur	Cm	63
Profondeur	Cm	60
Hauteur	Cm	156
Capacité	L	262
Puissance	KWh	402

Afin de simuler des aliments congelés dans le congélateur, la mesure des packs (M-packs) a été utilisée. Les M-packs se composaient de 232 g d'oxyéthylméthyl cellulose, 725 g d'eau, 43 g de chlorure de sodium, et 0,6 g de polyéthylène téréphtalate. Les M-packs (50 mm 100 mm 100 mm) avaient un point de congélation de 5 C et propriétés similaires à la viande. Les plateaux du congélateur ont été chargés avec un total de 60 kg de M-packs. La figure montre l'emplacement des M-packs et MCP dans le congélateur voire figure. Certains des packs M étaient équipés d'un capteur de température pour mesurer leur température. Le placement des M-packs et du MCP est visible sur la Fig. voire figure. Pour simuler un environnement de cuisine chaud, le congélateur a été testé à l'intérieur d'une salle d'essai réglée pour maintenir une température et un niveau spécifiques d'humidité. La pièce a pu maintenir une température entre 16 et 43 C et une humidité relative entre 45% et 75% [63]. Des thermocouples de type T avec une précision de 0,1 C ont été utilisés pour mesurer différentes températures telles que condenseur, compresseur et tous les six plateaux du congélateur. Les capteurs étaient positionnés suivant la norme ISIRI 13700 [63]. La température des M packs a été mesurée en insérant des thermocouples dans certains d'entre eux dans chaque bac et en les surveillant en permanence. La température de l'air à l'intérieur du congélateur et les températures ambiantes ont également été contrôlée. La figure 18 montre l'emplacement des thermocouples. Le congélateur a été testé dans des conditions standard de température et d'humidité dans la salle de test avec et sans MCP chargé avec ou sans M-packs afin d'étudier l'effet de Présence MCP et M-pack. Les tests comportaient trois parties. D'abord, à effectuer les tests de congélation après avoir chargé les capteurs de température dans le congélateur vide une fois que l'appareil a atteint la température stable conditions, toutes les températures à l'intérieur de l'appareil ont été surveillées pendant 24 h par le logiciel de surveillance. Ensuite, des expériences ont été répétées avec les M-packs, afin de simuler le comportement de la chambre lorsqu'elle est pleine d'aliments congelés. Enfin, le roman congélateur équipé de MCP et M-pack a été testé. Au bout du l'essai, la quantité d'énergie consommée pendant cette durée était annoncé par le logiciel.

Ces tests étaient basés sur l'ISIRI norme 13700 [62]. Le taux de réduction d'énergie a été calculé en utilisant l'équation. (18) alors que l'équation. (19) a été utilisé pour calculer la réduction rythme des variations de température. Dans l'équation. (19), $n_{thermostat}$ est le nombre de raccordement du thermostat alors que $DT_{MAX, MOY}$ est la valeur moyenne de la température maximale du cycle total dans chaque test calculé par Equation. (20).

$$E(\%) = \frac{E_{sans\ mcp} - E_N}{E_{sans\ mcp}} \dots\dots\dots (18)$$

$$T(\%) = \frac{(DT_{max;ave} \times n_{thermostat})_{sans\ mcp} - (DT_{ave,max} \times n_{thermostat})_{RunN}}{(DT_{ave,max} \times n_{thermostat})_{sans\ mcp}} \dots\dots\dots (19)$$

$$DT_{max;ave} = \frac{DT_{max;cycle\ 1} + DT_{max;cycle\ 2} + \dots + DT_{max;cycle\ n}}{n} \dots\dots\dots (20)$$

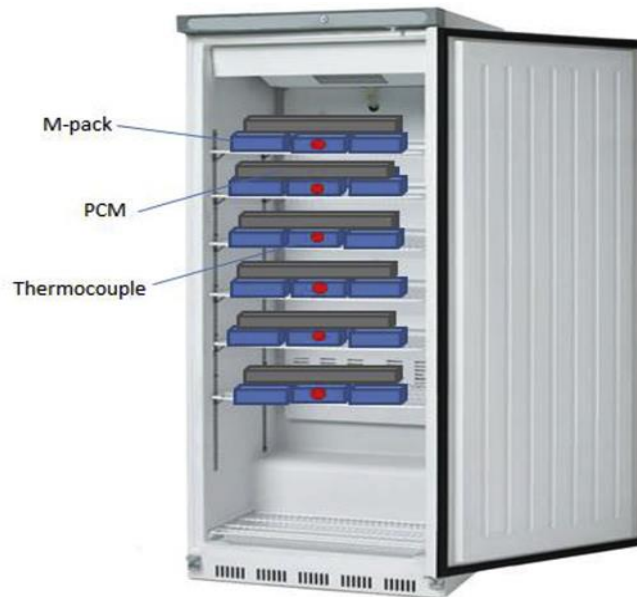


Figure 18. Schéma du congélateur montrant les positions des thermocouples et le placement des M-packs et du MCP.

De nombreuses recherches rapportées dans la littérature ont étudié l'application des MCP comme stockage de chaleur latente dans les congélateurs. De ce fait, dans cette étude, l'analyse expérimentale et l'optimisation de l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) à l'intérieur d'un congélateur domestique ont été menées dans le but de minimiser la consommation d'énergie et les fluctuations de température. En utilisant le polyéthylène glycole dans le congélateur et Léau pure dans les étages dans notre expérience.

CHAPITRE III

Montage expérimental

Le chapitre 3 consacré sur les procédures expérimentales utilisées pour l'évaluation des performances de la réfrigération domestique avec l'intégration des matériaux à changement de phase, ainsi que la méthode d'optimisation basée sur les plans d'expériences de Box-Benken. Cette étude a été concrétisée par la mise en place d'un banc d'essais utilisant réfrigérateur domestique No Frost à compression à vapeur.

III. 1 Description de dispositif expérimentale

Le dispositif expérimental illustré sur la figure est un réfrigérateur domestique de 1.7 m hauteurs 0.6 m de largeur et de 0.6 m de profondeur est de volume total de 331L. Le réfrigérateur comporte deux parties, un compartiment congélateur supérieur d'un volume de 60 L et un second compartiment d'un volume de 221 L.



Figure 19. Photo d'un réfrigérateur domestique.

Le réfrigérateur testé est de marque Brandt en Algérie avec un afficheur digital. Dans la partie congélateur, la température minimale est de -23°C et la température maximale -15°C , également, dans le compartiment réfrigérateur la basse température est 1°C est la haute 8°C .

Le congélateur à froid ventilé de dimension de $0.6 \times 0.6 \times 0.5$ m et avec une porte de 0.5m de hauteur, 0.6m de largeur et 0.06m d'épaisseur. (Voir figure 20).

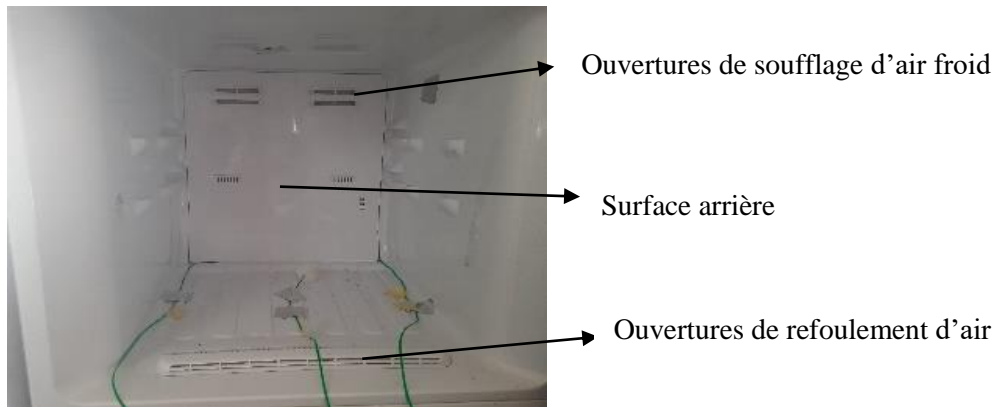


Figure 20. Compartiment congélateur.

Le congélateur basé sur un évaporateur à ailettes placé sur la surface arrière munie par un ventilateur dont le débit d'air libre est de 2200 rmp qui permettent d'aspirer l'air sur les serpentins de l'évaporateur et le fait circuler dans le congélateur et le réfrigérateur.

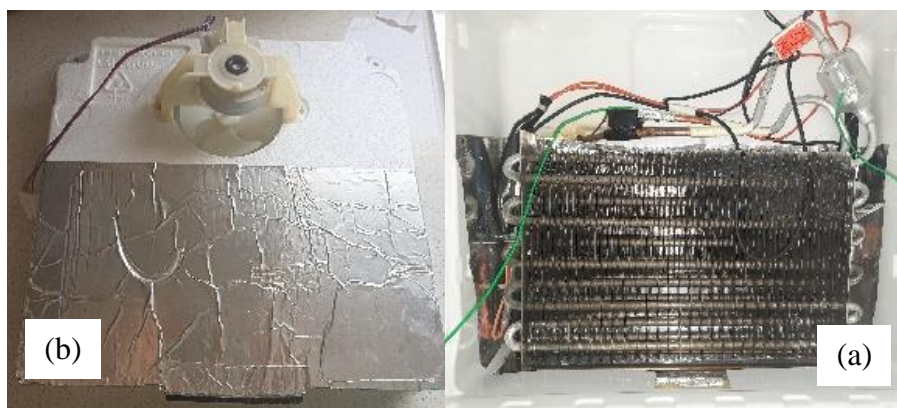


Figure 21. Evaporateur à ailette avec ventilation : (a) Evaporateur, (b) Ventilateur.

Le compartiment réfrigérateur est constitué de 3 étages et deux bacs supérieurs et inférieur. L'air froid dans le compartiment réfrigérateur est assuré à l'aide d'une gaine. Le réfrigérateur a une porte de dimension 1.2m hauteur, 0.6m de largeur et de 6cm d'épaisseur. Le réfrigérateur se compose d'un compresseur de type HDL140A voir figure (22) avec une tension de 220-240V et une fréquence de 50Hz. Un condensateur intègre et un capillaire pour la détente voire la figure. Le fluide frigorigène qui circuler dans le réfrigérateur domestique est r600a avec une masse de 50g.



Figure 22.Le compresseur du réfrigérateur.

Un condenseur encastré à l'arrière du réfrigérateur permet la transformation de la vapeur haute température (haute pression) venant du compresseur en liquide sous-refroidi par échange avec l'air, le condenseur rejette de ce fait de la chaleur. La détente du fluide frigorigène est obtenue par chute de pression lors de son passage du fluide dans le tube capillaire.

III. 2 Matériel ET mesure

Dans l'étude expérimentale le matériel utilisé est important pour avoir des résultats justes, le matériel utilisé dans cette expérience est d'écrire ci-dessous :

III.2.1 Systèmes de mesure de la température

Les thermocouples font partie des capteurs de température les plus courants dans l'industrie (Voir figure 23). Leurs avantages certains les rendent largement utilisés. Ci-dessous, la liste des thermocouples les plus courants ainsi que leur composition (Voir tableau 8).



Figure 23. Photo de thermocouple.

Le thermocouple est aussi un capteur très robuste. Bien que les thermocouples ne soient pas aussi précis que les sondes des résistives, ils le sont suffisamment pour un grand nombre d'applications. De plus, les thermocouples sont plutôt bon marché et leur circuit de mesure ne nécessite pas de courant d'excitation.

Tableau 8. Descriptions des différents types de thermocouple [64].

Type	Fil positif	Fil Négatif
B	70 % Platine	96 % Platine
	30 % Rhodium	6 % Rhodium
E	Chromel	Constantan
J	Fer	Constantan
K	Chromel	Alumel
N	Nicrosil	Nisil
R	87 % Platine	Platine
	13 % Rhodium	
S	90 % Platine	Platine
	10 % Rhodium	
T	Cuivre	Constantan

Il existe plusieurs types de thermocouples, chacun optimisé pour différentes applications. Les noms sont pour la plupart très courts, souvent réduits à une seule lettre comme les types K, R, S, J, N, etc. Lors de nos expériences nous avons utilisé des thermocouples de type K d'une précision de ± 0.5 °C, Pour le contrôle de la température de réfrigérateur et les MCP.

III.2.2 Description du système d'acquisition de données

Les températures mesurées en fonction du temps sont enregistrées par un Data Logger de type Hydra 2700 comme le montre la figure 30, capable de gérer jusqu'à 48 thermocouples en même temps. La communication entre le data logger et le PC s'effectue via un câble de type RS232.



Figure 24. Photos du Data Logger type Hydra 2700 face avant et arrière.

La figure 24 montre la photo de l'avant et de l'arrière du data logger. L'avant permet une utilisation manuelle et autonome du dispositif grâce à l'afficheur LCD. La partie arrière permet de connecter les différents thermocouples ainsi que le branchement série avec le

microordinateur. la figure suivante présente photo de l'interface graphique du data logger.

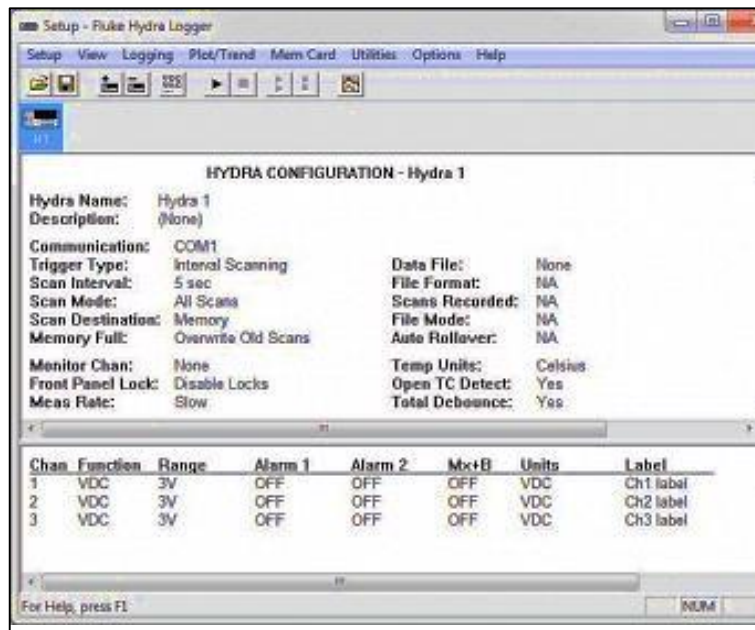


Figure 25. Interface graphique du data logger.

Une fois que les signaux issus des capteurs thermocouples sont numérisés par le data logger, le microordinateur par le logiciel de type HyperTerminal prend en charge leur acquisition et leur mémorisation sous formes de données numériques dans des fichiers de type tableurs (Par exemple Excel) comme le montre l'image de la figure 25.

III.2.3 Systèmes de mesure de consommation d'énergie

La consommation d'énergie doit être mesurée par un compteur énergie comme montre la figure, le compteur de type wechselstromzähler et le principal voltage de 230v et avec une intensité 10/40A. (Voir figure 26)



Figure 26. Photo de compteur électrique utilisée.

Le compteur construit en Allemagne, l'unité de mesure dans ce compteur elle est kWh.

Avec une puissance électrique :

$$P = I \times U \dots\dots\dots (21)$$

Avec :

P : Puissance en watts (W).

I : Intensité en ampère (A)

U : Tension en volt (V).

III.3 Plan d'expérience

Les plans des expériences (P. EX) est une branche de la statistique appliquée axée sur l'utilisation de la méthode scientifique pour la planification, la réalisation, l'analyse et l'interprétation de données issues d'essais ou d'expériences contrôlés. P. EX est une méthodologie mathématique utilisée pour planifier et mener efficacement une étude scientifique qui modifie simultanément les variables d'entrée (X) appelées Facteurs afin de révéler leurs effets sur une variable de sortie (ou plusieurs) (Y) appelée Réponse. En combinant plusieurs variables dans une étude au lieu de créer une étude pour chacune, le nombre d'essais requis sera considérablement réduit et une meilleure compréhension du processus est obtenue.

III.3.1. L'intérêt des plans d'expériences

L'intérêt majeur des plans d'expérience réside dans le fait qu'ils permettent d'optimiser le nombre d'expérimentations à réaliser lors de la phase d'essais, en déterminant au préalable les réels facteurs ou combinaisons de facteurs influents sur la réponse du système à étudier.

III.3.2. Les étapes des plans d'expériences

Pour Obtenir de bons résultats par un PEX on implique les sept étapes suivantes :

a) Poser des objectifs :

Les objectifs d'une expérience sont mieux déterminés par une discussion en équipe. Tous les objectifs doivent être écrits, même ceux qui ne semblent pas très intéressants. Le groupe devrait discuter des objectifs clés et des objectifs "Bons mais pas vraiment nécessaires". La priorisation des objectifs vous aide à choisir la direction à prendre en ce qui concerne la sélection des facteurs, les réponses et un plan particulier.

Sélectionner les variables du processus et leurs plages :

Les variables d'un processus incluent à la fois les entrées et les sorties - c'est-à-dire les facteurs et les réponses. La sélection de ces variables s'effectue mieux en équipe. L'équipe devrait :

- Inclure tous les facteurs importants.
- Déterminer une plage d'étude pour chaque facteur.
- Être prudent en choisissant les niveaux bas et haut des facteurs.
- Vérifier les réglages des facteurs pour des combinaisons non pratiques ou impossibles.
- Inclure toutes les réponses pertinentes.

b) Choisir un plan expérimental

Le choix d'un plan expérimental dépend des objectifs de l'expérience, du nombre de facteurs à étudier et de la quantité de ressources disponibles. Le tableau 9 montre un simple guide exemple de sélection d'un plan.

Tableau 9. Guide de sélection d'un plan.

N⁰-Facteurs	Objectifs comparatifs	Objectifs de dépistage	Surface de réponse
1	Plan totalement aléatoire à 1 facteur	-	-
2-4	Plan de bloc aléatoire	Factoriel complet ou fractionnaire	Central composite ou Box-Behnken
5 ou plus	Plan de bloc aléatoire	Factoriel fractionnaire ou Plackett-Burman	Dépistage en premier pour réduire le nombre de facteurs

c) Exécuter le plan :

Les expériences du plan sont réalisées et les résultats des essais (réponses) sont rassemblés.

d) Vérifier que les données sont cohérentes avec les hypothèses expérimentales

Dans tous les modèles, nous formulons des hypothèses et nous exigeons également que certaines conditions soient approximativement remplies à des fins d'estimation. Ceux-ci sont :

- Les systèmes de mesure sont-ils capables de répondre à toutes vos questions ?
- Vos réponses sont-elles susceptibles d'être bien approchées par de simples modèles polynomiaux ?

- Les résidus (la différence entre les prédictions du modèle et les observations réelles) se sont-ils bien comportés ?

e) Analyser et interpréter les résultats

En supposant l'existence d'un modèle de départ que nous souhaitons l'adapter à nos données expérimentales et que l'expérience ait été conçue correctement pour notre objectif, la plupart des logiciels P EX analyseront ces données et peuvent fournir plusieurs statistiques numériques ainsi que graphiques.

III.3.3. Classes des plans d'expériences :

Il existe trois grandes familles de plans d'expériences plans de mélange, plans de criblage et plans de modélisation ou surfaces de réponses.

a) Les plans de criblages

Dont l'objectif est de découvrir les facteurs les plus influents sur une réponse donnée en un minimum d'expériences.

b) Les plans de surface de réponse

Dont l'objectif est de trouver une relation mathématique (modèle) qui lie les réponses mesurées aux variables associées aux facteurs soit via une démarche mathématique analytique ou purement matricielle. Ce modèle peut être aussi utilisé à des fins d'optimisation du processus étudié.

c) Les plans de mélange

Les plans de mélange sont des plans particuliers adaptés à l'étude des facteurs dépendants. Ils sont principalement utilisés pour l'étude de l'influence des proportions des constituants d'un produit sur une réponse donnée.

III.3.4 Objectifs d'utilisations des plans d'expériences

Les plans d'expérience possèdent plusieurs objectifs :

a) Objectifs de modélisations

La méthodologie de surface de réponse est un ensemble de techniques mathématiques

et statistiques pour la construction de modèles mathématiques empiriques. L'exploitation de ces modèles peut répondre à plusieurs objectifs.

b) Objectif de prédiction

Un modèle mathématique obtenu peut être utilisé pour prédire une réponse à un point quelconque dans les limites des domaines expérimentaux. La précision des réponses obtenues dépend du degré de capacité de prédiction du modèle.

c) Objectif d'optimisation

Une optimisation est effectuée pour déterminer les valeurs des entrées du processus à utiliser pour obtenir la sortie du processus souhaitée. Les objectifs d'optimisation habituels peuvent être de maximiser le rendement d'un processus, de minimiser le temps de traitement nécessaire à la fabrication d'un produit ou d'atteindre une spécification du produit cible.

d) Objectif d'optimisation multi réponse

L'objectif est de déterminer les paramètres des facteurs permettant d'optimiser simultanément (un compromis) plusieurs réponses.

III.3.5 Vocabulaire [65]**a) Facteur**

Les facteurs sont les variables que l'on désire étudier et qui sont supposées avoir une influence sur le système. Ils peuvent être quantitatifs ou qualitatifs, continues ou discrets, contrôlables ou non contrôlables. Généralement, on prend en compte les facteurs caractérisés par une seule variable naturelle qualitative ou quantitative que l'on contrôle. Les facteurs sont limités par deux bornes, inférieure (bas) et supérieure (haut). On désigne le niveau bas par le signe (-1) et le niveau haut par le signe (+1). [65]

b) Réponse

Une réponse expérimentale est une manifestation mesurable que l'on observe lorsque l'on fait varier les paramètres étudiés. Un phénomène peut être éventuellement décrit par plusieurs réponses expérimentales. [65]

c) Domaine expérimental et domaine d'étude

Une interprétation géométrique permet de mieux comprendre la construction des plans d'expériences et de mieux interpréter les résultats. Lorsqu'il y a n facteurs, il faut raisonner dans des espaces à n dimensions. Pour fixer les idées, on prend l'exemple de deux facteurs x et y à deux niveaux (+1) et (-1). Le domaine expérimental est le plan x-y dans lequel toutes les valeurs de x et de y sont possibles. Mais, en général, un expérimentateur limite les variations des facteurs étudiés. On appelle domaine d'étude tous les points de la surface délimitée par les niveaux bas et haut de chaque facteur (surface en trame bleu de la figure 27).

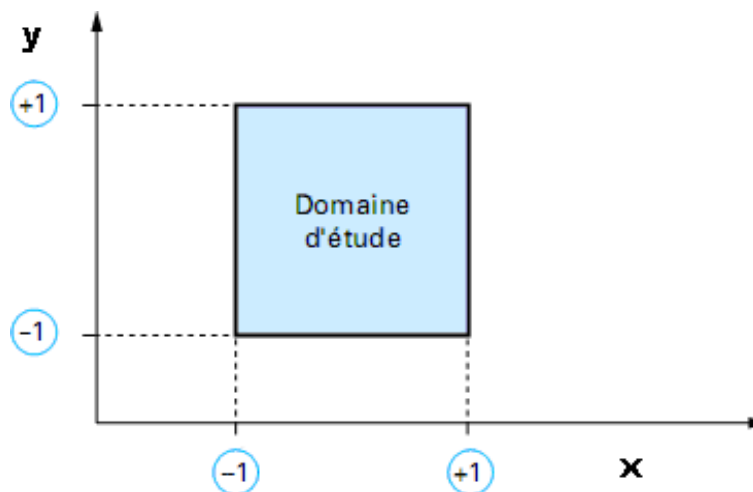


Figure 27. Définition du domaine d'étude. [65]

III.3.6 Plan de surface de réponse RSM

La méthodologie pour surfaces de réponse, ou RSM, est un ensemble de techniques Mathématiques et statistiques dans laquelle une réponse d'intérêt est influencée par plusieurs variables. Les applications les plus étendues de RSM se situent dans les situations particulières où plusieurs variables d'entrée influencent potentiellement une mesure de performance ou une caractéristique de qualité du processus. Ainsi, la mesure de performance ou la caractéristique De qualité s'appelle la réponse. Les variables d'entrée sont parfois appelées variables indépendantes et sont soumises au contrôle du scientifique ou de l'ingénieur, Le modèle polynomial du second ordre peut s'écrire par l'équation : [65]

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i,j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \epsilon \dots \dots \dots (21)$$

Avec :

Y : Réponse, β_0 : Constante, B_{ij} : Effet d'interaction linéaire de X_{ij} , ϵ : Erreur.

a) Plans composites centrés

Les plans composites centrés peuvent ajuster un modèle quadratique complet. Ils sont

souvent utilisés lorsque le plan demande une expérimentation séquentielle, car ces plans peuvent intégrer des informations provenant d'une expérience factorielle correctement planifiée. Vous pouvez utiliser un plan composite centré pour effectuer les opérations suivantes (Voir figure 28) :

- Estimer efficacement les termes des 1 et 2 ordres.
- Modéliser une variable de réponse avec courbure en ajoutant des points centraux et axiaux.

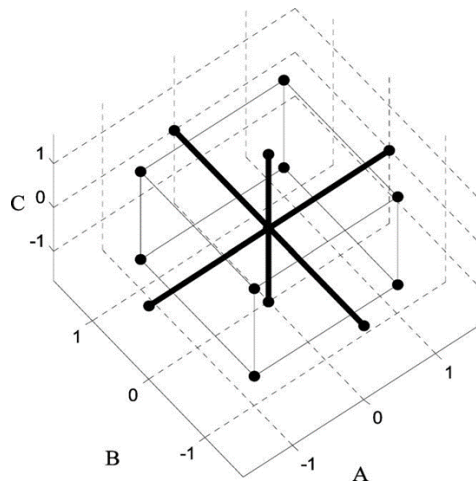


Figure 28. Lieu géométrique des points expérimentaux d'un plan composite centré à 3 facteurs.

Ce type de plans est très précise, il est très efficace dans les teste expérimental.

b) Plan de Box-Behnken

Un plan de Box-Behnken est un type de plan de surface de réponse qui ne contient pas un plan factoriel fractionnaire ou un plan factoriel imbriqué. Pour un plan de Box-Behnken, le nombre de manières d'ajouter des blocs dans un plan dépend du nombre de facteurs. Tous les Plans comportant des blocs ont des blocs orthogonaux. Logiciel affiche les choix adaptés lors de la création du plan. Un plan avec :

- Trois facteurs ne peuvent pas avoir des blocs
- Quatre facteurs peuvent être traités en trois blocs
- Cinq, six, sept ou dix facteurs peuvent être traités en deux blocs
- Neuf facteurs peuvent être traités en cinq ou dix blocs

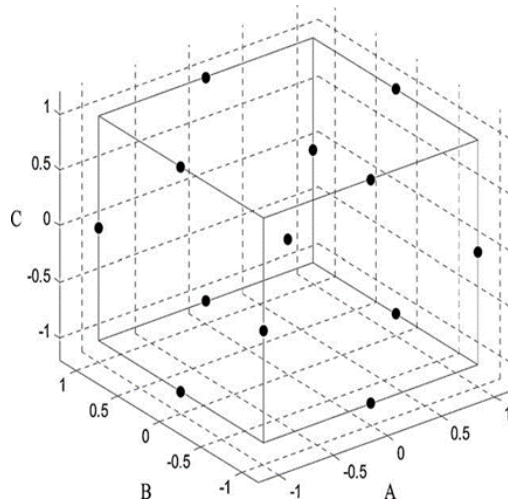


Figure 29. Lieu géométrique des points expérimentaux d'un plan de Box-Behnken à trois facteurs.

Et pour effectuer un plan expérimental, utiliser :

- Stat.
- Plan d'expérience (DOE).
- Surface de réponse.
- Créer un plan de surface

III.3.7 Analyse de variance (ANOVA)

L'analyse de la variance (ANOVA) est un outil essentiel dans la détermination de la signification d'un effet ou d'un modèle mathématique. Le principe de l'analyse de la variance est basé sur le calcul de l'écart total entre les différentes mesures y_i du plan d'expériences et la moyenne de ces mesures. Cet écart se décompose en différentes composantes comme l'illustre la figure (30). [66]

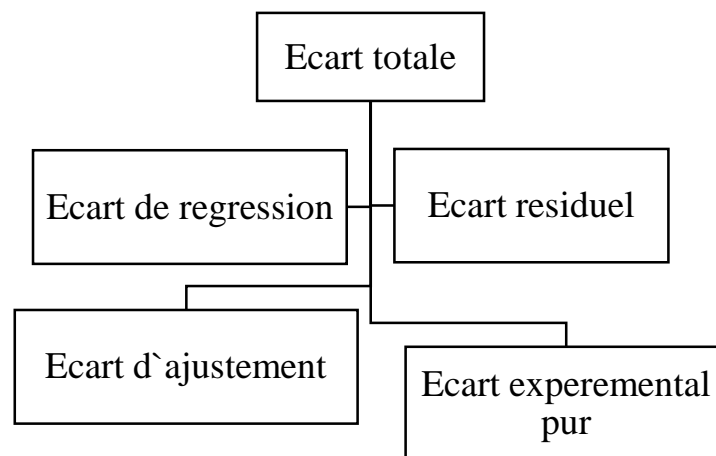


Figure 30. Organigramme descriptif de différents écarts.

Une partie de l'écart total est modélisable par le modèle mathématique, c'est l'écart de régression. Une autre partie de l'écart total n'est pas modélisable, c'est l'écart résiduel. Celui-ci correspond à la différence entre la réponse mesurée expérimentalement et la même réponse modélisée. Cet écart, considéré comme une erreur, est donc la somme de deux composantes : l'erreur expérimentale pure σ_i et l'erreur d'ajustement Δ_i . L'écart expérimental pur correspond à l'erreur aléatoire de l'expérimentation. Cet écart est dû au fait que si l'on répète un certain nombre de fois la même expérience, on obtiendra à chaque fois une mesure y_i de valeur différente. L'écart dû au manque d'ajustement correspond à un choix inadapté du type de modèle postulé.

La statistique la plus importante de l'analyse de la variance est la valeur de Probabilité P. Cette valeur peut prendre des valeurs comprises seulement entre 0 et 1. Si elle est inférieure à 0.05, on conclut que l'effet est significatif et si elle est inférieure à 0.01, il est possible de conclure que le facteur est hautement significatif.

On définit le coefficient de détermination R^2 comme étant la fraction des variations de la réponse expliquée par le modèle seul. Le R^2 est donc une mesure de la qualité du modèle qui prend des valeurs comprises entre 0 et 1. S'il est proche de 1, le modèle permet de retrouver les valeurs des réponses mesurées. S'il est égal à 0, le modèle n'explique rien. On définit de la même façon le coefficient de détermination ajusté R^2_{aju} comme étant la fraction des variations de la réponse expliquée par le modèle seul, relativement aux degrés de liberté correspondants. On a toujours $R^2_{aju} \leq R^2$.

Pour effectuer une ANOVA à deux facteurs contrôlés dans le logiciel, utilisez Stat > ANOVA > Modèle linéaire général > Ajuster le modèle linéaire général. Supposons que votre réponse soit appelée A et que vos facteurs soient appelés B et C.

- 1-Sélectionnez Stat > ANOVA > Modèle linéaire général > Ajuster le modèle linéaire général.
- 2-Dans la zone Réponses, saisissez A.
- 3-Dans la zone Facteurs, saisissez B C.
- 4-Cliquez sur Modèle.
- 5-Dans la zone Facteurs variables, sélectionnez B et C. A droite de interactions jusqu'à l'ordre, sélectionnez 2 et cliquez sur Ajouter.
- 6-Cliquez sur OK dans chaque boîte de dialogue

III.4 Protocole expérimentale

L'ensemble de l'étude expérimentale a été réalisée au niveau de l'UDES, elle repose sur la réduction de la consommation énergétique d'un réfrigérateur domestique grâce à l'utilisation de la technologie de MCP. Les différentes étapes de l'expérimentation sont présentées dans le schéma ci-dessous.

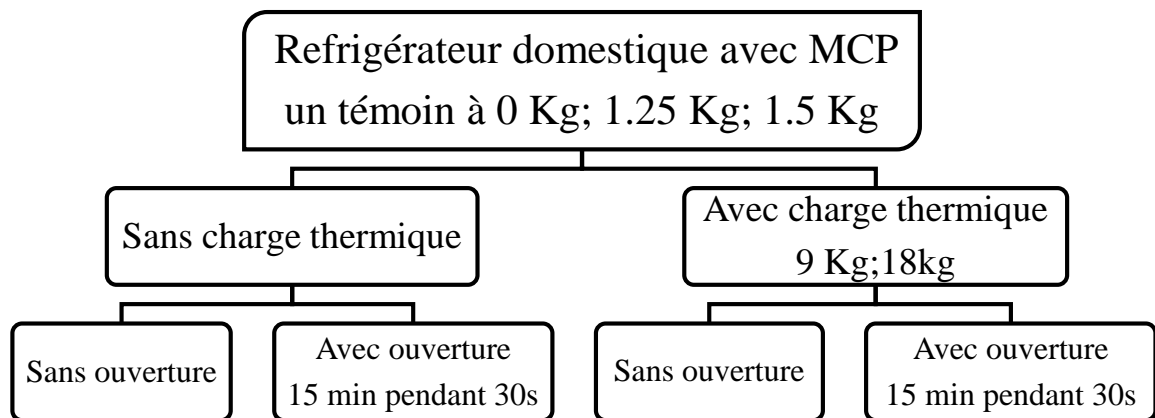


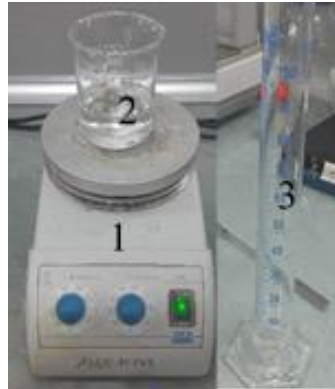
Figure 31. Organigramme descriptif de l'ensemble des tests expérimentaux réalisés.

L'organigramme de la figure récapitule l'ensemble des différentes étapes de l'expérience et avec MCP, afin de réduire la consommation d'énergie et améliorer le rendement du réfrigérateur domestique. Dans une première étape le réfrigérateur est mis en marche avec 3 différentes charges 0, 9, 18 Kg et sans ouverture de la porte du compartiment réfrigérateur. Dans la deuxième étape, on applique des ouvertures de la porte du compartiment réfrigérateur pour chaque 15 mn pendant 30 secondes. Les expériences sont effectuées avec 3 différentes températures de compartiment réfrigérateur 1°C, 4 °C et 8 °C. Également, la température du congélateur est fixée à -15 °C.

III.4.1 Le choix de MCP

Dans le cadre de cette thèse, il a été nécessaire de sélectionner un MCP capable de maintenir la température du réfrigérateur domestique de la température limite haute lors d'un arrêt du compresseur, et dont la température de changement de phase de ce matériau soit suffisamment basse pour limiter la remontée de température pendant des arrêts, tout en permettant une solidification lors de la phase de charge. Le réfrigérateur domestique utilisé étant ici à deux compartiments, un congélateur ayant des températures négatives, la gamme de température des MCP s'est donc limitée à [-18 °C, -11 °C] et un compartiment réfrigérateur positif, la plage de température des MCP est limitée à [-2 °C, 2 °C]. L'eau a été choisie comme MCP avec une température de changement de phase à 0 °C pour la partie positive de

réfrigérateur. Pour la partie négative de réfrigérateur, le mélange eau- propylène glycol 35% est choisi comme MCP avec une température de changement de phase de -13 . Pour la préparation du matériau à changement de phase de propylène glycol que nous avons entreprise, remplissez un bécher par 35% de propylène glycol puis introduisez l'eau pure jusqu'au bord. Ensuite, pour mélanger le MCP, un agitateur magnétique (figure 32) a été utilisé à une vitesse de rotation de 300 tr/mn pendant 1 heure.



1-Agitateur 2-bécher 3- éprouvette

Figure 32.Photo de matériel utilisée dans la préparation de MCP.

III.4.2 Choix d'emplacement de MCP

Le matériau à changement de phase MCP doit être placé dans des zones avec des vitesses d'air si possible élevées permettant un échange convectif plus efficace. Le propylène glycol 35% MCP a été placé dans le congélateur en quantité fixée de 1 Kg (voir figure 33) avec une la température de congélateur sur réglé à -15°C . Dans la phase de cycle de marche du compresseur la température ambiante de congélateur va diminuer jusqu'à -17°C et dans la phase d'arrêt la température va augmenter jusqu'à -10°C . La température de changement de phase de propylène glycol c'était -13°C . Voir figure (33)



Figure 33 .Photo de l'emplacement de MCP dans le congélateur.

Pour le compartiment réfrigérateur, la température de l'air varie d'un endroit à un autre, l'emplacement choisi devrait permettre de souffler de l'air suffisamment froid pour solidifier le MCP l'eau pure. Les mesures montrent qu'au niveau du bac supérieur dans le

compartiment réfrigérateur la température de soufflage d'air varie de -3 à 3 °C et dans les étagères allant de 1 à 5 °C. Pour cela, l'eau pure a été placée dans le baquet supérieur de compartiment réfrigérateur en deux quantités différentes 0.25 et 0.5 Kg. (Voir figure 34)

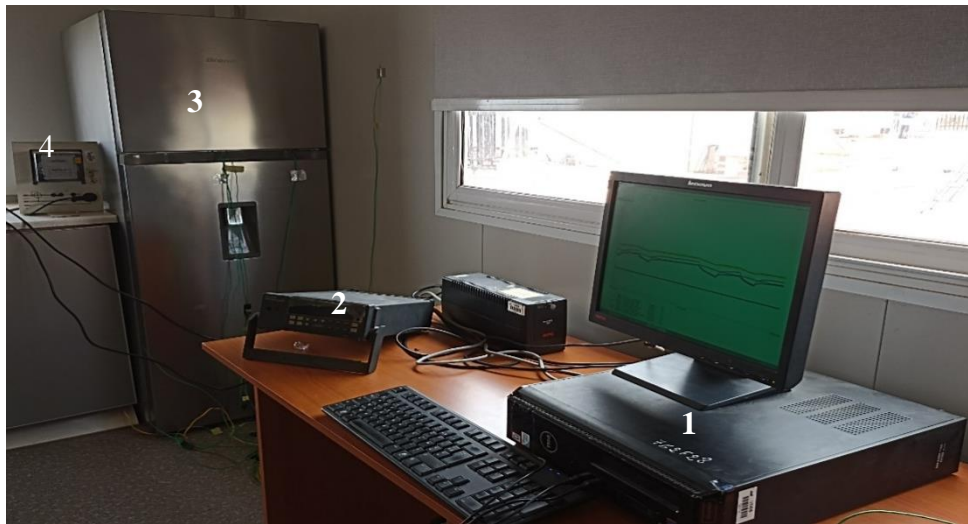


Figure 34. Photo d'emplacemnt de MCP dans le baquet supérieur de compartiment réfrigérateur.

III.4.3 Procédure d'expérimentation

La synthèse des données relevées à partir du banc d'essais est effectué avec une température de congélateur fixé à -15 °C et pour les différentes températures du compartiment réfrigérateur de 1 , 4 et 8 °C et avec une température du milieu ambiant était de 25 ± 1.5 °C. Ces situations sont provoquées pour l'expérimentation de notre réfrigérateur domestique (voir figure35).

Le suivi des différents tests de refroidissement est entrepris par un système d'acquisition des mesures qui est directement relié à un ordinateur via une interface graphique de communication. Ce dernier permet la visualisation et l'enregistrement de l'ensemble des mesures relevées sur le banc d'essai durant un intervalle de temps égal à 30 secondes.



1. Microordinateur 2. Data-logger 3. Réfrigérateur domestique 4. Compteur d'énergie

Figure 35. Connexion du dispositif expérimentale 3 au système d'acquisition.

Il a été noté qu'avant de commencer une nouvelle expérience, le réfrigérateur domestique a été mis hors tension jusqu'à la température initiale. La plage d'erreur de mesure du thermocouple était de $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

III.4.4 Emplacement des thermocouples

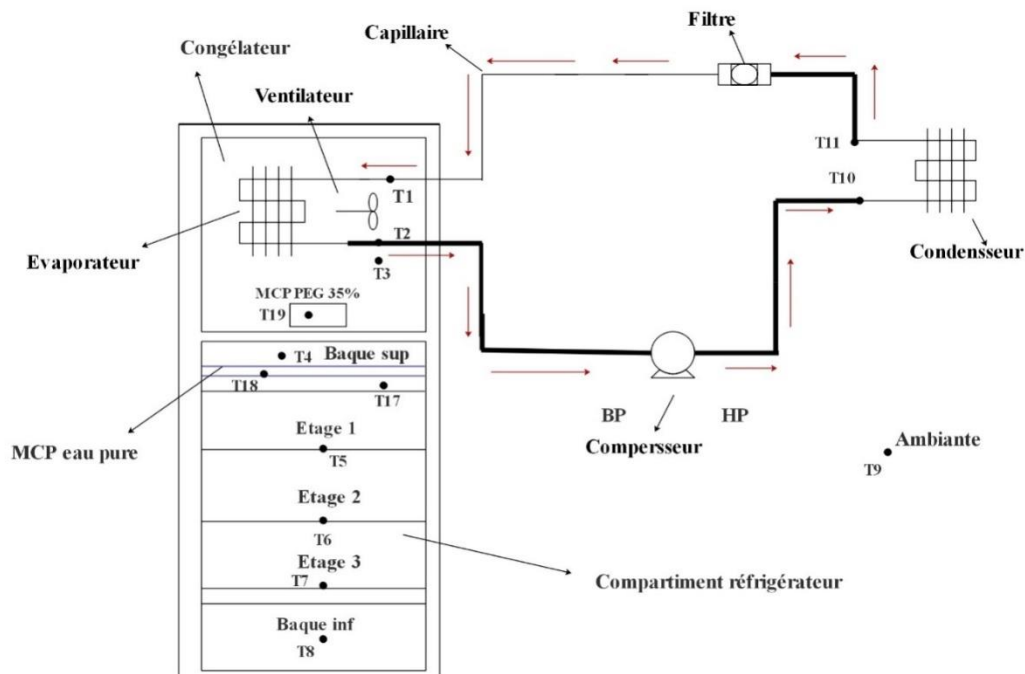


Figure 36. L'emplacement des thermocouples.

Le suivi des différents tests est effectué par 14 thermocouples de type K. Le schéma dans la

figure 36 présente l'emplacement des thermocouples dans le réfrigérateur domestique.

- *Congélateur :*

Dans le congélateur on a trois thermocouples, deux placée dans l'évaporateur thermocouple T1 placée à l'entrée et thermocouple T2 placée à la sortie de l'évaporateur, le troisième thermocouple T3 est placée dans l'enceinte du congélateur (voir figure 37).



Figure 37. Photo des thermocouples placés dans le congélateur.

- *Compartiment réfrigérateur :*

Dans le compartiment réfrigérateur on a placé huit thermocouples pour le suivie de l'évolution exacte de la température dans le compartiment. Le thermocouple T4 est placée dans le bac supérieur avec les thermocouples T5 et T6 plus T7 qui sont placée dans les étages, T5 dans le 1^{er} étage et T6 dans le 2^{eme} étage et T7 dans le 3^{eme} étage.

- *Le milieu ambiant :*

On utilise un seul thermocouple T9 pour mesurer la température ambiante de ne pas la laisser dépasser 26°C.(voir figure 38)



Figure 38. Photo de thermocouple placée dans l'ambiante.

- *Le condenseur :*

Deux thermocouples placés dans le condenseur, T10 est placée à l'entrée du condenseur et T11 à la sortie du condenseur.

- *Le MCP :*

On a deux thermocouples placés dans les MCP, le thermocouple T12 est placé dans les MCP propylène glycol 35% et T13 est placée dans le MCP eau pure. (Voir figure 39)



Figure 39. Photo des thermocouples placés dans les MCP.

III.5 Plan de surface de réponse (Box-Behnken)

Dans notre expérience on utilise le logiciel Minitab, L'utilisation des commandes de Minitab peut se faire de deux manières différentes. La première consiste à écrire, directement dans la fenêtre SESSION, les commandes à exécuter. La deuxième manière utilise les barres de menu et les boîtes de dialogue associées. Dans notre étude on s'intéresse sur le plan d'expérience (DOE) dans le MINITAB qui se trouve dans les menu principaux STAT et ce dernier est entièrement statistique ; il est constitué d'une rubrique à cocher et de 12 sous-menus est parmi ces menu on a les plans expérimentaux. Pour effectuer un plan de surface nous suivons les étapes suivantes :

Sélectionner STAT après plan d'expérience DOE après nous choisissons plan de surface est en clique sur créer un plan de Box Behnken.

- 1- Sélectionnez Stat > DOE (plan d'expériences) > Surface de réponse > Créer un plan de surface de réponse.
- 2- Sous Type de plan, sélectionnez Box-Behnken.
- 3- Dans Nombre de facteurs continus, sélectionnez 3.
- 4- Cliquez sur Plans, puis sur OK.
- 5- Cliquez sur Résultats. Sélectionnez Tableau récapitulatif et tableau de plan.
- 6- Cliquez sur OK dans chaque boîte de dialogue.

Les lettres en haut des colonnes représentent les facteurs et suivent l'ordre que vous avez établi lors de la création du plan. Pour les facteurs continus, les paramètres de facteurs de chaque essai sont affichés en unités codées et MINITAB représente les paramètres comme suit :

- -1 indique le niveau de facteur inférieur
- 1 indique le niveau supérieur
- 0 indique le point central entre les niveaux inférieur et supérieur

- Pour les facteurs de catégorie, MINITAB représente les paramètres de facteurs avec des nombres qui correspondent aux catégories.
 - Le nombre d'essais de base correspond au nombre de combinaisons de niveaux de facteurs dans le plan de base. Le nombre total d'essais correspond au nombre d'essais de base multiplié par le nombre de répliques.
 - Les blocs constituent un groupe d'unités expérimentales (observations) homogènes. Les blocs de base représentent le nombre de blocs avant l'ajout de répliques au plan. Le nombre total de blocs représente tous les blocs créés par les répliques dans le plan.
 - La table de plan indique les paramètres de facteurs de chaque essai de l'expérience. Prenant moins de place que la feuille de travail, elle peut donc être utile pour les rapports dans lesquels l'espace est limité.
 - On remarque que, Minitab randomise le plan. Ainsi, lorsque vous créez le plan, l'ordre des essais ne correspond pas à celui de l'exemple de résultats. Lorsque vous effectuez une expérience, l'ordre des essais doit être randomisé. Chaque essai correspond à un point du plan et tout l'ensemble des essais constitue le plan. De multiples exécutions des mêmes conditions expérimentales sont considérées comme des essais distincts et sont appelées répliques.
- On saisit le nombre de fois qu'en veut effectuer chaque essai de l'expérience dans le plan de base. D'ordinaire, en prenez en compte les ressources disponibles et le but de notre plan lorsqu'en sélectionne le nombre de répliques. Nous pouvons ajouter des répliques à notre plan ultérieurement avec l'option Stat > DOE (plan d'expériences) > Modifier le plan. Pour plus d'informations sur les répliques. La figure suivante récapitule le plan (nombre total de facteurs, essais, blocs et répliques).

OrdEssai	Blocs	MCP (%)	Qh (Kg)	Tcf	E(kwh)	CDP
1	1	1,25	18	1	*	*
2	2	1,50	0	4	*	*
3	3	0,00	0	1	*	*
4	4	1,50	18	4	*	*
5	5	0,00	0	8	*	*
6	6	1,25	0	1	*	*
7	7	0,00	9	1	*	*
8	8	1,25	9	4	*	*
9	9	1,50	9	8	*	*
10	10	1,25	18	8	*	*
11	11	0,00	18	4	*	*
12	12	1,25	0	8	*	*
13	13	1,40	9	1	*	*
14	14	1,00	9	8	*	*
15	15	0,00	0	4	*	*

Figure 40. Exemple de formulation par plan de Box Behnken.

La figure 40, présente le nombre d'expérience à réaliser en fonction du nombre de facteurs pour notre plan d'expérience. Dans notre expérience on a 3 facteurs : le MCP (0, 1.25, 1.5 Kg), la charge thermique Q_h , allant de 0 à 18 Kg et le dernier facteur est la température du compartiment réfrigérateur T_{cf} , allant de 1 à 8°C. Ce qui nous amène à 15 essais par plan de Box Behnken.

Deux réponses ont été étudiées, la 1^{ère} réponse est la consommation d'énergie pendant 24/h sous symbole $E/24h$ en KWh, et la deuxième réponse c'est le COP « coefficient de performance » en pourcentage.

III.6 Statistique expérimentale:

La méthode expérimentale et Box-Behnken a été utilisée pour déterminer les meilleures interactions possibles entre les paramètres et les variables de réponse. Box-Behnken est très approprié pour trois, quatre ou cinq plans factoriels. Box-Behnken convient aux surfaces méthodologie car elle permet de l'estimation des paramètres du modèle quadratique et la conception et la régression pas à pas et l'utilisation de blocs, et absence de détection d'ajustement du modèle [18–20]. Box-Behnken fait les prédictions sur la plus petite variance moyenne possible pour l'ensemble disponible d'expérimentes et est préféré à d'autres méthodes de conception sur la précision, voir tableau 10.

Tableau 10. Conception expérimentale de niveaux de facteurs.

Variables	Symbole	Niveaux		
		-1	0	1
Code de niveau		-1	0	1
Matériaux à changement de phase MCP (Kg)	X_1	0	1,25	1,5
Charge thermique (Q_h) (Kg)	X_2	0	9	18
Température de compartiment réfrigérateur (T_{cf}) °C	X_3	1	4	8

Le tableau 2 montre la conception expérimentale des niveaux et est codée en niveaux bas (- 1) et niveaux hauts (1). Box-Behnken est utile pour identifier les variables individuelles et leurs interactions. Il décrit l'interaction mutuelle entre les variables indépendantes du polynôme équation, ce qui est très utile pour prédire les réponses dans des conditions aux limites prédéfinies. Le Box-Behnken est un second ordre rotatif plan basé sur le plan factoriel incomplet. Le nombre d'expériences requis est défini comme $N = 2k(k - 1) + Co$ (k est le

nombre de facteurs et Co est le nombre de points centraux). Les variables de réponse sont la consommation d'énergie par jour (E) et le COP du réfrigérateur. La matrice détaillée du DOE factoriel pour 15 essais a été obtenue à l'aide de plan d'expérience DOE pour la conception à trois facteurs deux avec le centre est indiqué dans le tableau 11. Ce tableau présente le plan d'expérience de Box-Behnken pour 3 variables

Tableau 11. Plan Box-Behnken pour 3 variables.

Nombre d'expérience	MCP	Tf	Qh
1	-1	-1	0
2	1	-1	0
3	-1	1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	1	0	-1
7	-1	0	1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	1	-1
11	0	-1	1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

L'analyse de variance (ANOVA) a été réalisée à l'aide de Minitab, L'analyse des moyens a été testée pour obtenir l'adéquation et la compétence de mesures comme le coefficient de détermination (R^2), R^2 ajusté et R^2 prédit pour observer l'implication du modèle pour chaque terme. La probabilité (valeur p et valeur f) est calculée à l'aide de l'ANOVA ; les valeurs de p doivent être inférieures ou égales à 0,05 [26].

Dans ce chapitre le montage expérimental est constitué par le réfrigérateur domestique et les différents instruments de mesure pour étudier l'influence énergétique de l'intégration des matériaux à changement de phase sur la consommation d'énergie du réfrigérateur. Également

les protocoles expérimentaux, le plan d'expérience et la préparation de matériaux à changement de phase ont été présentés. La discussion des résultats du montage expérimental étudié fait l'objet du prochain chapitre.

Chapitre IV

Résultats et discussions

Ce chapitre présente les différents résultats obtenus par notre étude expérimentale, tels que l'amélioration de la consommation d'énergie, diminution de fluctuation de température dans le compartiment réfrigérateur ainsi que les résultats de plans d'expérience.

IV.1. Effet du MCP sur le cycle marche/ arrêt du compresseur

Pour évaluer l'influence de MCP sur la réduction de consommation d'énergie, nous avons réalisé une comparaison entre le temps de marche de compresseur t avec et sans MCP à une température de congélateur réglée à -15°C . Les figures ci-dessous montrent les profils de températures en fonction de temps et avec et sans MCP, ainsi qu'avec et sans charge thermique.

IV.1.1 Cas de la température du compartiment réfrigérateur égale 1 et 8°C avec $Q_h = 9 \text{ Kg}$

La figure 41 indique que lorsque le début de cycle de marche du réfrigérateur à $t = 900 \text{ s}$ et pour $T_f = 1^{\circ}\text{C}$ avec $Q_h = 9 \text{ Kg}$, on remarque que le temps de marche du réfrigérateur avec MCP est plus long par rapport à un réfrigérateur sans MCP. Donc, dans le cas de réfrigérateur sans MCP, le temps de marche du compresseur t_{on} est de 1530 s et avec MCP, $t_{\text{on}} = 1050 \text{ s}$.

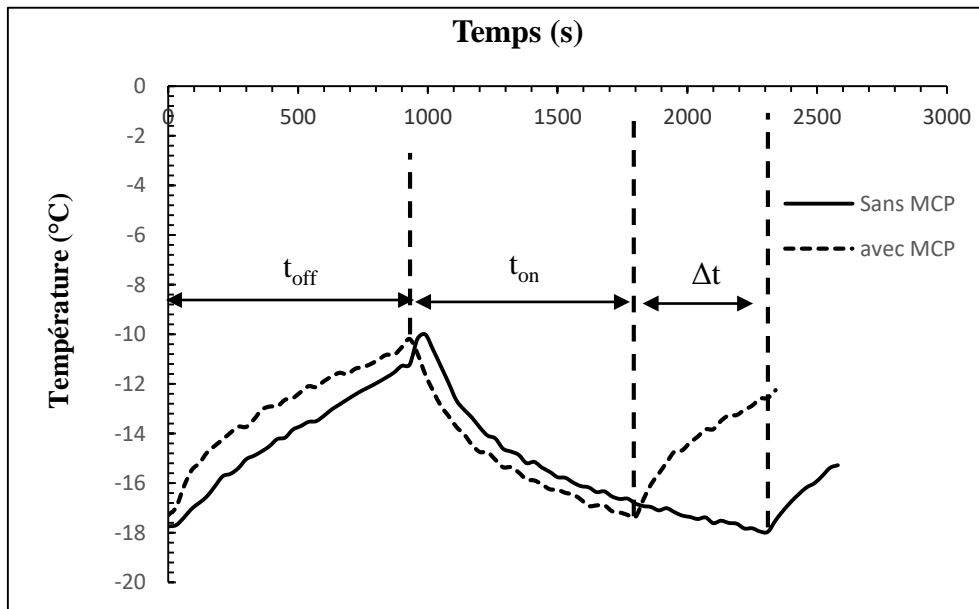


Figure 41. Profils de température en fonction de temps avec Q égale à 9 Kg .

On note également sur la figure 42 que quand le début de cycle de marche du réfrigérateur à $t = 930 \text{ s}$ et pour $T_{c_f} = 8^{\circ}\text{C}$, on constate que dans le cas de réfrigérateur sans MCP, le temps de marche de compresseur t_{on} est de 1750 s et avec MCP, $t_{\text{on}} = 910 \text{ s}$.

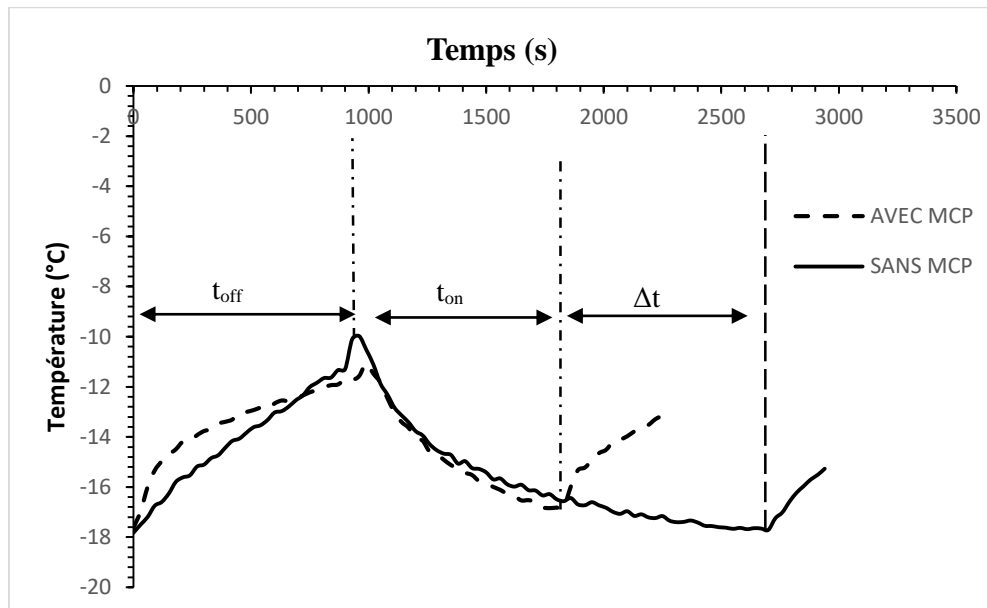


Figure 42. Profils de température en fonction de temps avec Q_H égale à 9Kg.

Par conséquent, lors de l'utilisation de MCP, il y a une diminution de 480 s et 840 s du temps de fonctionnement du compresseur pour $T_{cf} = 1^\circ\text{C}$ et 8°C , respectivement.

IV.1.2 Cas de la température du compartiment réfrigérateur égale 4°C avec une $Q_h = 18\text{Kg}$

On peut observer sur la figure 43 que lorsque le début de cycle de marche du réfrigérateur à $t = 1080\text{ s}$ et pour $T_{cf} = 4^\circ\text{C}$ avec $Q_h = 18\text{ Kg}$, le temps de marche du compresseur t_{on} est de 1530 s et avec MCP, $t_{on} = 2190\text{ s}$ et avec MCP compresseur tourne pendant 1800 s

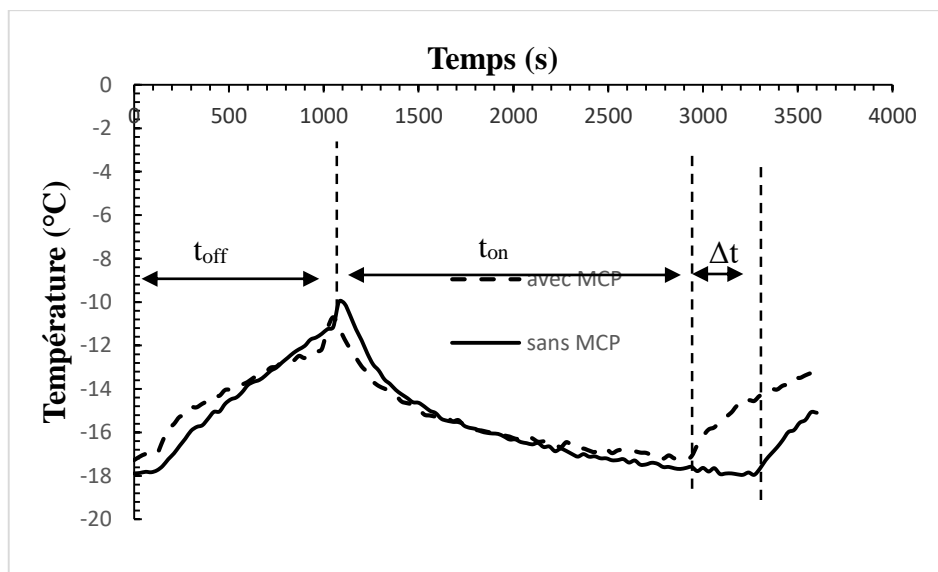


Figure 43. Profils de température en fonction de temps avec Q_h égale à 9Kg.

IV.2 L'effet du MCP sur les fluctuations de température à l'intérieur du compartiment réfrigérateur

L'ouverture de la porte du compartiment réfrigérateur entraîne des fluctuations des températures dans les différentes étagères, l'effet de MCP sur la diminution de fluctuation de température est présentée dans les histogrammes suivants :

IV.2.1 Cas de la température du compartiment réfrigérateur égale 1°C

Nous pouvons observer dans la figure (44) une diminution notable de la fluctuation de température dans les étagères par rapport à la température de référence. Dans le premier étage avec l'ouverture de la porte dans le cas de réfrigérateur sans MCP la température augmente jusqu'à 12.09°C avec une différence de 7.53°C par rapport à la température de référence

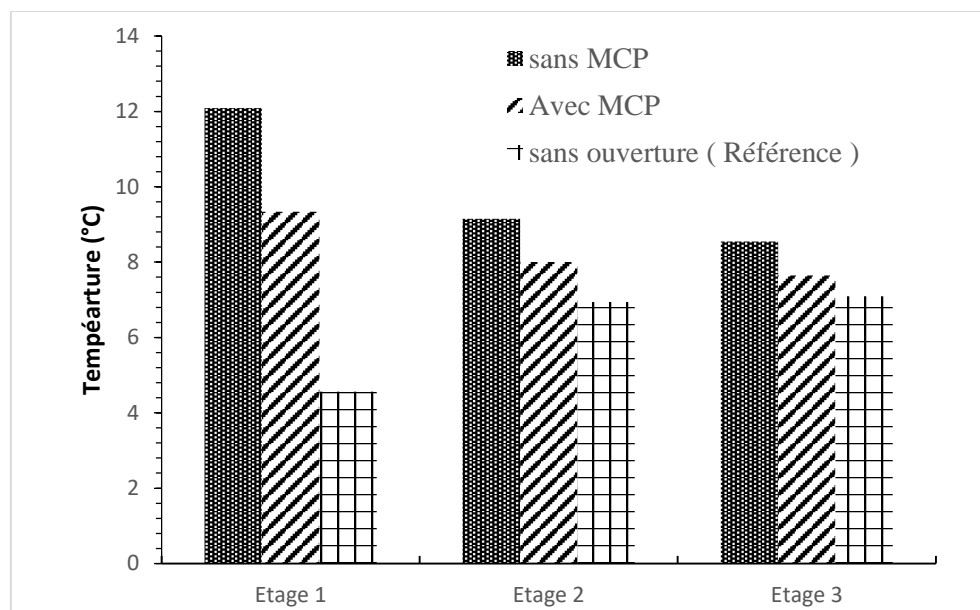


Figure 44. Distribution de la température dans les différentes étagères du compartiment réfrigérateur avec une température de thermostat égale 1°C.

Par contre, dans le cas de réfrigérateur avec MCP la température est moins élevée pendant l'ouverture de la porte $T = 9.34^{\circ}\text{C}$ avec une différence de 4.78°C par rapport à la température de référence. Alors, l'écart de température de fluctuation avec et sans MCP, $\Delta T = 2.75^{\circ}\text{C}$.

Dans l'étage 2 on a une température de référence est de 6.94°C . Dans le cas où le réfrigérateur sans MCP on a une augmentation de température jusqu'à 9.15°C pendant l'ouverture de la porte avec une augmentation de 2.21°C par rapport à la température de référence, par contre dans le cas de réfrigérateur avec MCP la température est moins élevée pendant l'ouverture de la porte

$T = 8^{\circ}\text{C}$ avec une différence de 1.06°C par rapport à la température de référence. L'écart de température de fluctuation avec et sans MCP, $\Delta T = 1.15^{\circ}\text{C}$.

Dans l'étage 3 la température référence mesurée est de 7.09°C , on remarque que l'effet de MCP sur la fluctuation de température est faible par rapport les deux étages supérieurs. Dans le cas de réfrigérateur sans MCP la température pendant l'ouverture de la porte augmente jusqu'à 8.55°C , et dans le cas de réfrigérateur avec MCP la température autour de 7.65°C et avec, un écart de température de fluctuation avec et sans MCP, $\Delta T = 0.90^{\circ}\text{C}$. Donc, on remarque une amélioration notable pendant l'utilisation de MCP sur la fluctuation de température dans les deux étages supérieurs par rapport à l'étage inférieur.

IV.2.2 Cas de la température du compartiment réfrigérateur égale 4°C

Nous pouvons observer dans la figure (45) une diminution notable de la fluctuation de température dans les étagères par rapport à la température de référence. Dans le premier étage avec l'ouverture de la porte dans le cas de réfrigérateur sans MCP la température augmente jusqu'à 13.35°C avec une différence de 11.46°C par rapport à la température de référence

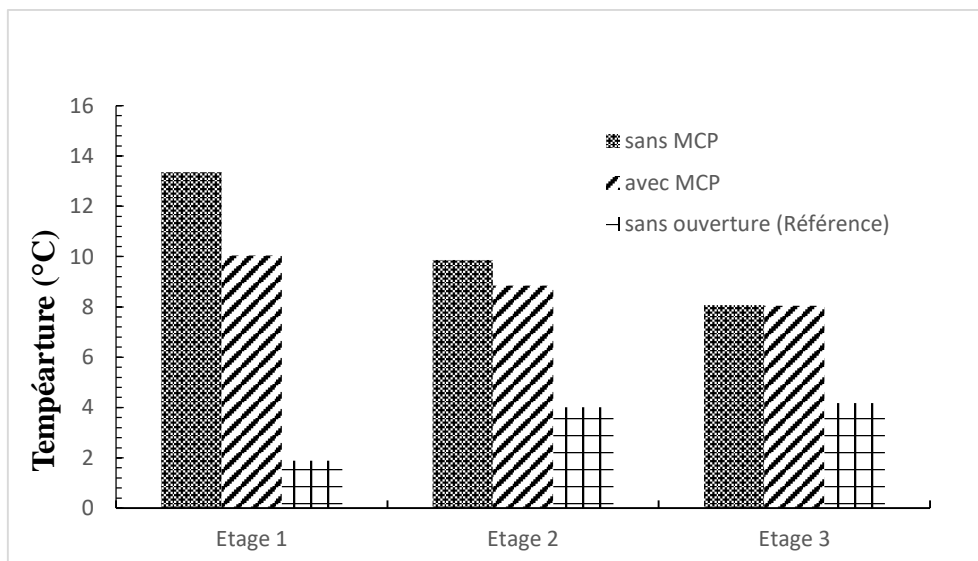


Figure 45. Distribution de la température dans les différentes étagères du compartiment réfrigérateur avec une température de thermostat égale 4°C .

Par contre, dans le cas de réfrigérateur avec MCP la température est moins élevée pendant l'ouverture de la porte $T = 10.05^{\circ}\text{C}$ avec une différence de 8.16°C par rapport à la température de référence. Alors, l'écart de température de fluctuation avec et sans MCP, $\Delta T = 3.3^{\circ}\text{C}$.

Dans l'étage 2 on a une température de référence est de 4.01°C . Dans le cas où le réfrigérateur sans MCP on a une augmentation de température jusqu'à 9.86°C pendant l'ouverture de la porte avec une augmentation de 5.85°C par rapport à la température de référence, par contre dans le

cas de réfrigérateur avec MCP la température est moins élevée pendant l'ouverture de la porte $T= 8.85^{\circ}\text{C}$ on a une différence de 4.84°C par rapport à la température de référence. Avec, un écart de température de fluctuation avec et sans MCP, $\Delta T=1.01^{\circ}\text{C}$. Dans l'étage 3 la température référence mesurée est de 4.17°C , on remarque que l'effet de MCP sur la fluctuation de température est faible par rapport les deux étages supérieurs. Dans le cas de réfrigérateur sans MCP la température pendant l'ouverture de la porte augmente jusqu'à 8.87°C , et dans le cas de réfrigérateur avec MCP la température est moins élevée par rapport sans MCP, $T= 8.84^{\circ}\text{C}$ et avec, un écart de température de fluctuation avec et sans MCP, $\Delta T=0.03^{\circ}\text{C}$. Donc, on remarque une amélioration notable pendant l'utilisation de MCP sur la fluctuation de température dans les deux étages supérieurs par rapport à l'étage inférieur.

IV.2.3 Cas de la température du compartiment réfrigérateur égale 8°C

Nous pouvons observer dans la figure (46) une diminution notable de la fluctuation de température dans les étagères par rapport à la température de référence. Dans le premier étage avec l'ouverture de la porte dans le cas de réfrigérateur sans MCP la température augmente jusqu'à 13.25°C avec une différence de 5.78°C par rapport à la température de référence

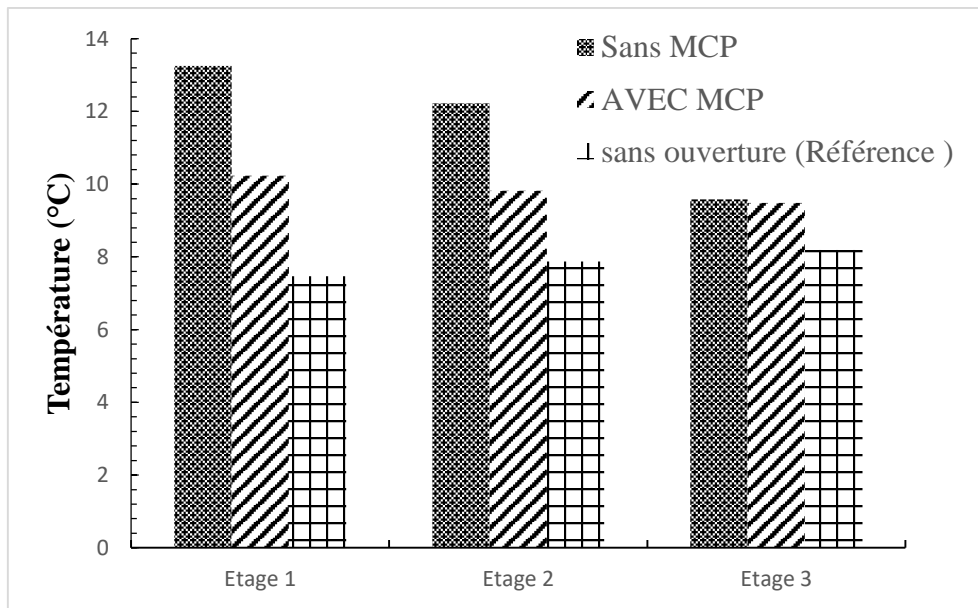


Figure 46. Distribution de la température dans les différentes étagères de compartiment réfrigérateur avec une température de thermostat égale 8°C .

Par contre, dans le cas de réfrigérateur avec MCP la température est moins élevée pendant l'ouverture de la porte $T= 10.23^{\circ}\text{C}$ avec une différence de 2.76°C par rapport à la température de référence. Alors, l'écart de température de fluctuation avec et sans MCP, $\Delta T=3.12^{\circ}\text{C}$.

Dans l'étage 2 on a une température de référence de 7.87°C . Dans le cas où le réfrigérateur sans MCP on a une augmentation de température jusqu'à 12.22°C pendant l'ouverture de la porte

avec une augmentation de 4.35°C par rapport à la température de référence, par contre dans le cas de réfrigérateur avec MCP la température est moins élevée pendant l'ouverture de la porte $T=9.82^{\circ}\text{C}$ on a une différence de 1.95°C par rapport à la température de référence. Avec, un écart de température de fluctuation avec et sans MCP, $\Delta T=2.4^{\circ}\text{C}$.

Dans l'étage 3 la température référence mesurée est de 8.19°C , on remarque que l'effet de MCP sur la fluctuation de température est faible par rapport aux deux étages supérieures. Dans le cas de réfrigérateur sans MCP la température pendant l'ouverture de la porte augmente jusqu'à 9.58°C , et dans le cas de réfrigérateur avec MCP la température est moins élevée par rapport sans MCP, $T=9.48^{\circ}\text{C}$ et Avec, un écart de température de fluctuation avec et sans MCP, $\Delta T=0.1^{\circ}\text{C}$. Donc, on remarque une amélioration notable pendant l'utilisation de MCP sur la fluctuation de température dans les deux étages supérieurs par rapport à l'étage inférieur.

Dans cette partie on remarque que l'intégration de MCP, est diminuée la consommation d'énergie entre 20-48% avec une charge thermique de 9kg pour $T_f=1$ et 8°C . Dans le cas d'une charge thermique de 18Kg et $T_f=4^{\circ}\text{C}$ on remarque qu'il y a une diminution de 17%. Ainsi que on observe une diminution de la fluctuation de température dans les étages.

IV.3 Analyses statistiques par plan d'expériences

Le plan d'expérience Box-Behnken appliquée dans notre étude a réduit le nombre de combinaisons de facteurs nécessaires pour évaluer les effets de trois facteurs sur la consommation d'énergie et le coefficient de performance à 15 tests.

IV.3.1 Réalisation des essais

La matrice d'expériences ainsi que le plan d'expérimentation (variables réels) obtenus lors de l'application du plan Box-Behnken sont regroupés dans le tableau. Les 15 essais (expériences) sont effectués conformément au tableau 12 et suivant le protocole expérimental relatif à la consommation d'énergie et le coefficient de performance (cf. chapitre III).

Tableau 12. Plan d'expérience, consommation d'énergie et coefficient de performance

N° Essai	Facteur			Réponse	
	MCP (X ₁) (Kg)	Q _h (X ₂) (Kg)	T _{cr} (X ₃) (°C)	E/24h (Kwh)	COP
1	0	0	4	0,98	2,9
2	0	18	4	1,8	2,65
3	1,25	0	8	1,08	2,77
4	1,25	0	1	0,84	3,15
5	1,25	9	4	0,96	2,78
6	0	9	1	1,08	2,73
7	1,25	18	8	0,96	2,6
8	1,25	9	4	0,96	2,78
9	1,5	9	8	1,2	2,63
10	1,5	18	4	1,44	2,7
11	1,5	9	1	1,08	2,8
12	1,25	9	4	0,96	2,78
13	1,5	0	4	0,96	3
14	0	9	8	0,96	2,74
15	1,25	18	1	1,08	2,77

IV.3.2 Analyse de la variance (ANOVA) :

Les résultats de l'expérience vont être traités statistiquement en utilisant l'analyse de variance (ANOVA). En effet, à partir des résultats obtenus, un modèle du 2^{ème} ordre sera établi. L'objectif principal est de montrer les paramètres qui ont le plus d'effet sur les réponses étudiées E/24h et COP. Dans cette étude, l'analyse de variance est menée à un niveau de signification $\alpha=5\%$ (niveau de confiance égal à 95%). Les résultats de l'analyse de variance de E/24h et COP sont donnés par le tableau 13. Ce tableau montre les degrés de liberté (DL), la somme des carrés (SS), le carré moyen (CM), le test de F et la probabilité (P). Il a été noté qu'une faible probabilité ($P < 0,05$) renseigne sur la signification statistique de la source sur la réponse correspondante.

Tableau 13. Résultats de l'analyse de variance pour la réponse E/24H et COP

Source	DL		SS		CM		F		P	
	E/24h	COP	E/24h	COP	E/24h	COP	E/24h	COP	E/24h	COP
MCP	1	1	0,393	0,21405	0,214046	0,304771	76,50	76,50	0,038	0,036
Qh	1	1	0,3567	0,2198	0,23198	0,112449	12,77	54,13	0,016	0,01
Tf	1	1	0,2654	0,22432	0,224325	0,230309	70,18	14,59	0,029	0,012
MCP*MCP	1	1	0,3467	0,1726	0,217264	0,253478	77,65	13,25	0,047	0,0118
Qh * Qh	1	1	0,2384	0,2135	0,228300	0,211345	0,48	8,23	0,021	0,0035
Tf*Tf	1	1	0,2013	0,17340	0,214046	0,209345	61,97	10,97	0,003	0,037
MCP* Qh	1	1	0,359	0,1028	0,20198	0,230464	8,15	28,15	0,05	0,0258
MCP*Tf	1	1	0,2981	0,2676	0,224325	0,294373	2,42	2,42	0,14	0,094
Qh*Tf	1	1	0,2786	0,2192	0,217264	0,289483	6,86	6,86	0,018	0,028

D’après le tableau 13 l’effet des facteurs sur la consommation d’énergies (E/24h) et le coefficient de performance (COP) est significatif. Ainsi que, l’interaction (MCP*Tf) représentent une contributions faible sur la consommation d’énergies et le coefficient de performance (p= 0.14 et 0,094).

IV.3.2 Modélisation mathématique

Une analyse de régression a été utilisée pour développer le modèle du deuxième ordre de régression pour les réponses E/24h et COP. Afin de comprendre les effets des facteurs de contrôle sur la réponse, du premier ordre, du second ordre et les interactions entre les différents facteurs de contrôle ont été considérés. Le modèle final pour la E/24h et LE COP obtenue est le suivant :

$$E/24h = 0,745 + 0,899 X1 + 0,0287 X2 + 0,0797 Tf + 0,643 X1*X1 + 0,00147 X2*X2 + 0,00789 X3 *X3 + 0,0216 X1*X2 - 0,0251 X1*X3 + 0,00327 X2*X3 \dots \dots \dots (22)$$

$$COP = 2,9640 + 0,253 X1 + 0,03569 X2 + 0,0080 X3 + 0,0747 X1*X1 + 0,000841 X2*X2 + 0,00082 X3*X3 + 0,00182 X1*X2 - 0,02500 X1*X3 + 0,001668 X2*X3 \dots \dots \dots (23)$$

Le coefficient de détermination R², caractérise la relation entre les valeurs observées et prédites, est une mesure directe de bon ajustement en effet, quand la valeur de R² s’approche à l’unité (R² ≈1, tableau 14), c’est une indication claire sur un accord qualitatif entre l’expérimentation et la prédiction.

Tableau 14. Le coefficient de détermination

Modèle	Le coefficient de détermination R ²
E/24h	0,9574
COP	0,9246

La figure 47 présente la probabilité normale des résidus de modèle de la vitesse de forage, on constate que les résidus s’ajustent raisonnablement en ligne droite, ce qui permet de conclure que les erreurs ont une distribution normale et par conséquent le modèle développé est significatif.

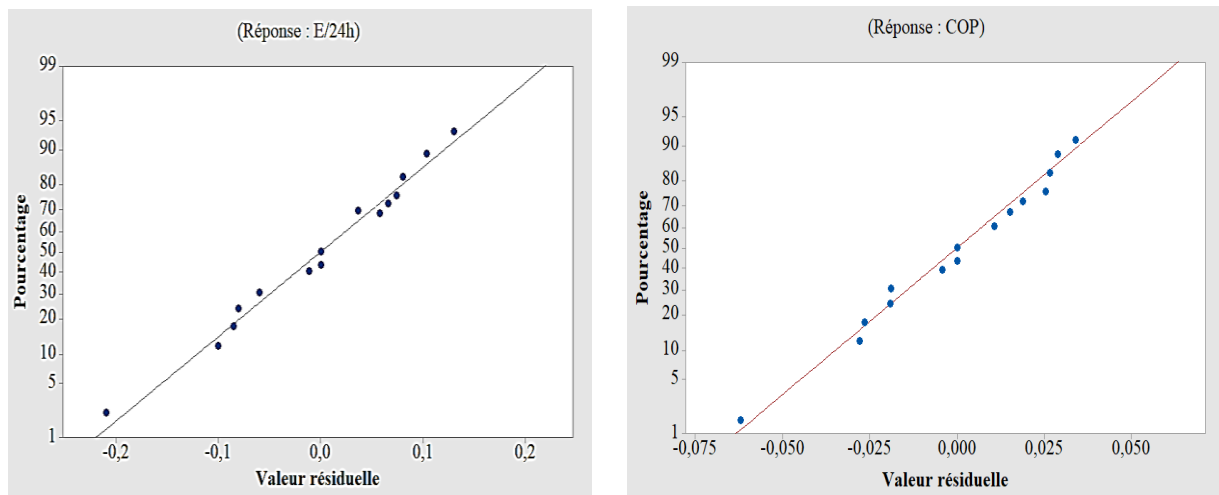
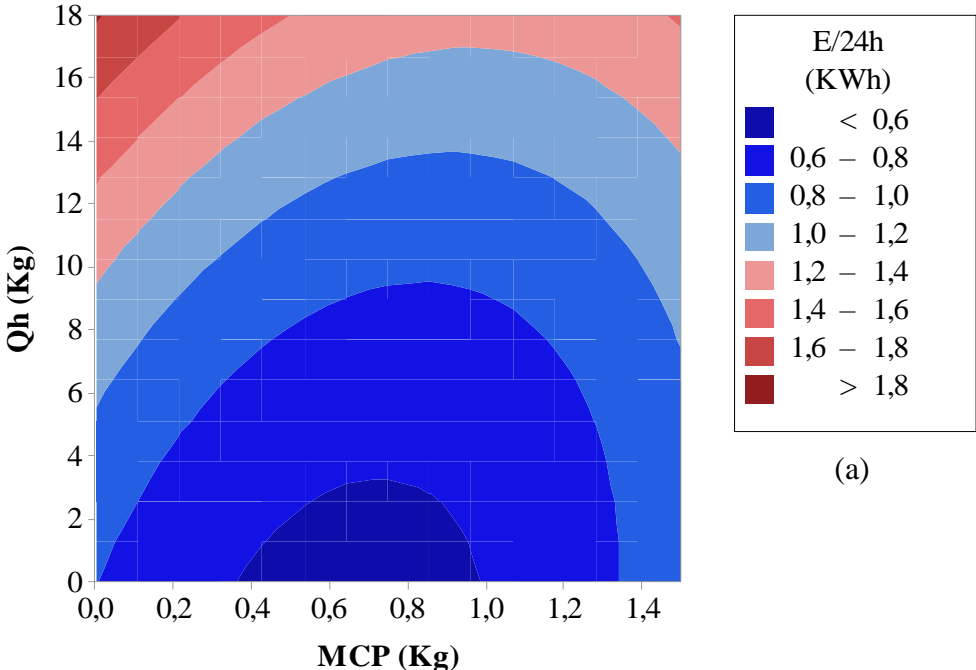


Figure 47. Courbe de la probabilité normale d'E/24h et COP.

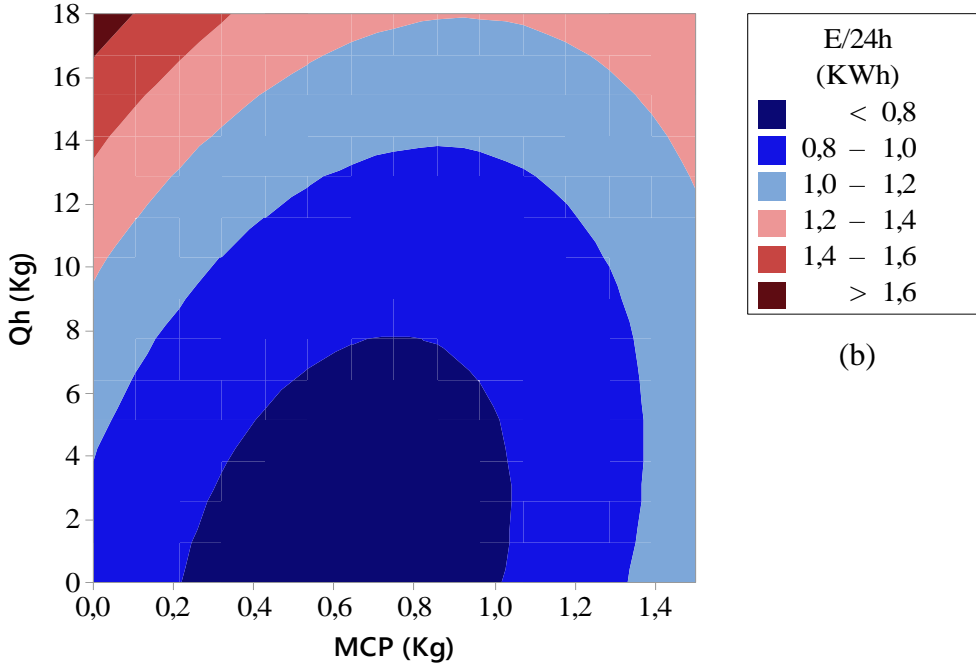
IV.4 Analyse de la consommation d'énergie sur 24h

Les figures ci-dessous montrent l’influence de la charge thermique et le MCP sur la consommation d’énergie du réfrigérateur dans les différentes températures de compartiment

réfrigérateur 1⁰C, 4⁰C et 8⁰C.



(a)



(b)

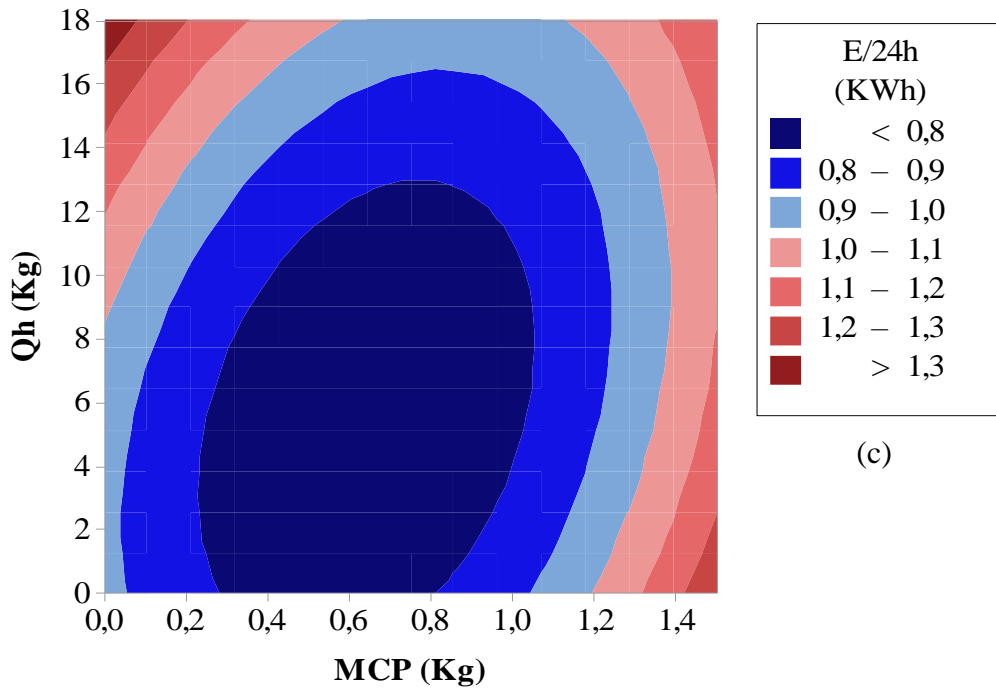


Figure 48. Contours de la consommation d'énergie du réfrigérateur à
(a) $T_f = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, (b) $T_f = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ et (c) $8\text{ }^{\circ}\text{C}$

On observe à partir de la figure 48 (a) le cas de $T_f = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, que la consommation d'énergies diminue avec l'intégration de MCP. Pour m_{MCP} entre 0.4 à 1 Kg et avec une charge thermique variant entre 0 à 2 Kg, il y a une diminution significative de la consommation d'énergie $E < 0.6\text{ KWh}$. Tandis qu'avec m_{MCP} varie entre 0 à 0.4 Kg et entre 1 à 1.3 Kg et pour une charge thermique de 0 à 8 Kg, E varie entre 0.6 à 0.8 KWh. La consommation d'énergie est de 0.8 à 1.0 KWh pour une masse de MCP de 1.3 à 1.5 Kg et avec une charge thermique variant entre 0 à 12Kg. Une consommation d'énergie maximale $E > 1.8\text{ KWh}$ est observée dans le cas de sans MCP avec une charge thermique $> 15\text{Kg}$.

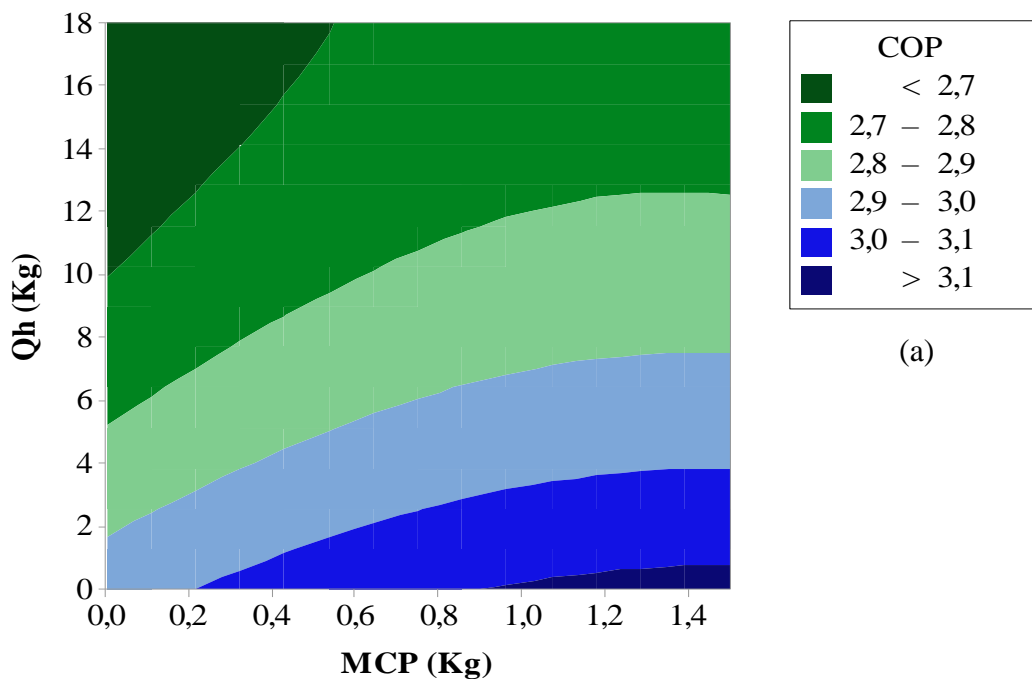
Dans le cas de $T_f = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ On constate qu'à partir de la figure 48 (b), on remarque que la consommation d'énergies diminue avec l'intégration de MCP. Pour m_{MCP} entre 0.2 à 1 Kg et avec une charge thermique variant entre 0 à 8 Kg, il y a une diminution significative de la consommation d'énergie $E < 0.8\text{ KWh}$. Tandis qu'avec m_{MCP} varie entre 0 à 0.2 Kg et entre 1 à 1.3 Kg et pour une charge thermique de 0 à 14 Kg, E varie entre 0.8 à 1 KWh. La consommation d'énergie est de 1 à 1.2 KWh pour une masse de MCP de 1.3 à 1.5 Kg et avec une charge thermique variant entre 0 à 14 Kg. Une consommation d'énergie maximale $E > 1.6\text{ KWh}$ est observée dans le cas de sans MCP avec une charge thermique $> 17\text{Kg}$.

On remarque à partir de la figure 48 (c) le cas de $T_f = 8\text{ }^{\circ}\text{C}$, que la consommation d'énergies augmente avec l'intégration de MCP. Pour m_{MCP} entre 0.3 à 0.8 Kg et avec une charge

thermique variant entre 0 à 12 Kg, il y a une diminution significative de la consommation d'énergie $E < 0.8$ KWh. Tandis qu'avec m_{MCP} varie entre 0.1 à 0.3 Kg et entre 0.8 à 1.0 Kg et pour une charge thermique de 0 à 16 Kg, E varie entre 0.8 à 0.9 KWh. La consommation d'énergie est de 1 à 1.1 KWh pour une masse de MCP de 1.2 à 1.3 Kg et avec une charge thermique variant entre 0 à 18Kg. Une consommation d'énergie a maximale $E > 1.3$ KWh est observée dans le cas de masse MCP entre 1.4 à 1.5 kg.

IV.5 Analyse de coefficient de performance COP

Pour étudier l'effet de la charge thermique et le MCP sur le coefficient de performance COP dans les 3 cas des températures 1 °C, 4 °C et 8 °C, on a obtenu des résultats des expériences dans des contours à l'aide de Minitab.



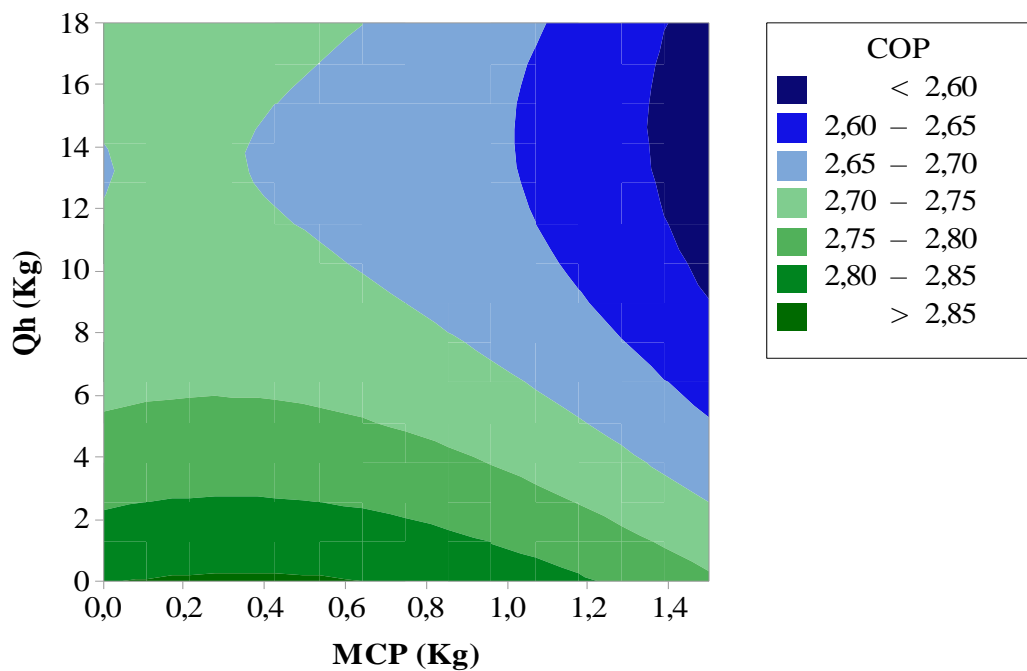
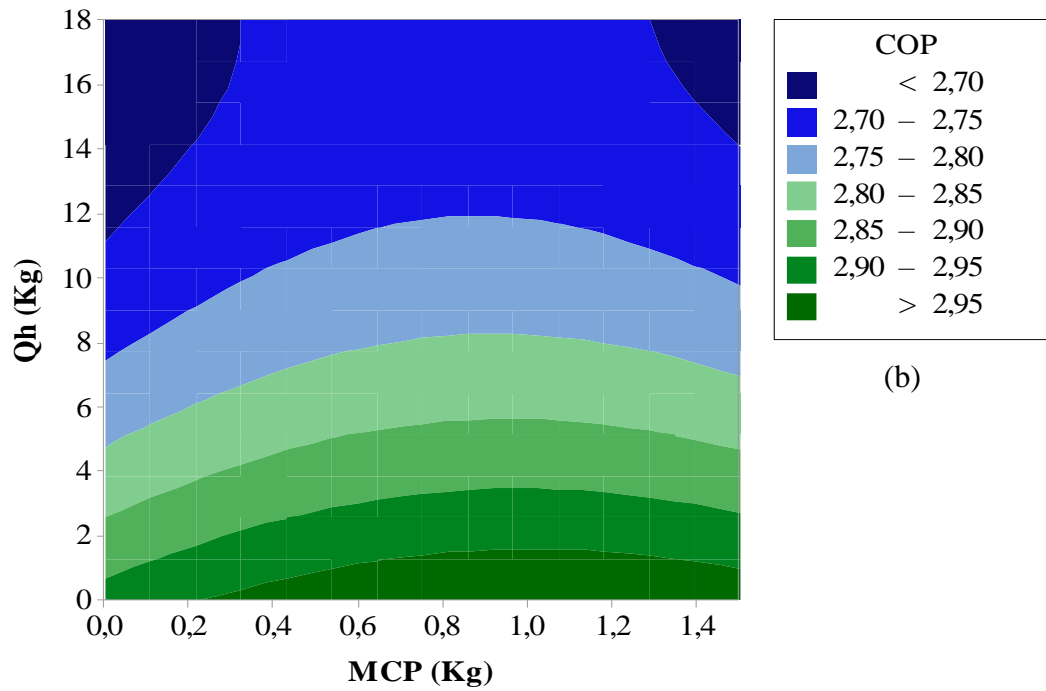


Figure 49.Contour de coefficient de performance (COP)
à (a) $T_f = 1\text{ }^\circ\text{C}$, (b) $T_f = 4\text{ }^\circ\text{C}$ et (c) $8\text{ }^\circ\text{C}$.

On observe à partir de cas de $T_{cf} = 1^\circ\text{C}$ dans la figure (a), que le COP Augmente avec l'intégration de MCP, pour une charge thermique varie entre 10 à 18 Kg, il ya une diminution significative de $\text{COP} < 2,7$, Sachant que pour une charge thermique de 6 à 10 Kg, le COP varie entre 2,7 à 2,8, ainsi qu'avec une charge thermique de 2 à 5 kg le COP est de 2,8 à 2,9, Une valeur maximale de COP est supérieure à 3.1 est observer dans le cas de masse de MCP entre

1.0 et 1.5 kg.

On constate à partir de la figure (49b) dans le cas de $T_{c_f} = 4^{\circ}\text{C}$, une augmentation de COP suite par une intégration de MCP, pour une charge thermique de 12 à 18 kg, il ya une diminution de COP de 2.70 à 2.75, une valeur minimale de COP < 2.70 montre dans le cas de sans MCP avec une charge de $> 12\text{kg}$, ainsi que pour une charge de 0 à 1.5 kg il ya une augmentation de COP de 2.90 à 2.95, une valeur maximale de COP est supérieur a 2.95 est observer dans la masse de MCP varie de 0.3 à 1.5 kg

On remarque à partir de cas de $T_{c_f} = 8^{\circ}\text{C}$ dans la figure (49c), que le COP Augmente avec l'intégration de MCP, pour une charge thermique varie entre 10 à 18 Kg, il ya une diminution significative de COP < 2.60 , Sachant que pour une charge thermique de 6 à 18 Kg, le COP varie entre 2.60 à 2.65, ainsi qu'avec une charge thermique de > 3 kg le COP est de 2.70 à 2.75, et pour une masse de MCP varie entre 0 à 1.2 kg et avec une charge thermique de 0 à 2 kg le COP est de 2.80 à 2.85. Une valeur maximale de COP est supérieure à 2.85 est observée dans le cas de masse de MCP entre 0.1 et 0.6 kg.

IV.6 Analyse comparative des réponses à chaque variable

Les figures ci-dessous montre l'évolution de COP et de E/24h avec différentes températures de compartiment réfrigérateur, avec différent quantité de la charge Q_h et avec la différente quantité de MCP :

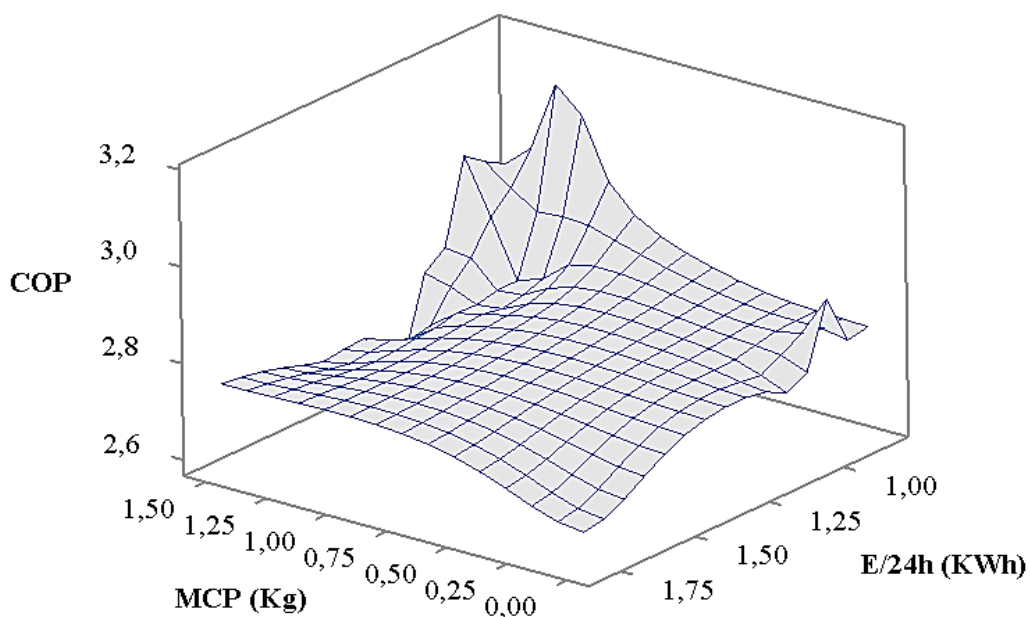


Figure 50. Evolution de COP et E/24h avec différentes quantités de MCP.

On observe sur la figure 50 que, pour une masse de MCP égale à 0kg la valeur de COP =

2.6 et la consommation d'énergie est de 1.75 KWh, ainsi que pour la masse de MCP égale à 1.25 kg le COP et de 2.8 et la consommation d'énergie égale à 1.50 KWh. Tandis que dans la masse 1.50 kg de MCP la valeur de COP atteint sa valeur maximale 3.2 et la consommation d'énergie diminue 1 KWh. Et cela se confirme que plus que la masse de MCP augmente plus que le COP augmente et la consommation d'énergie diminue.

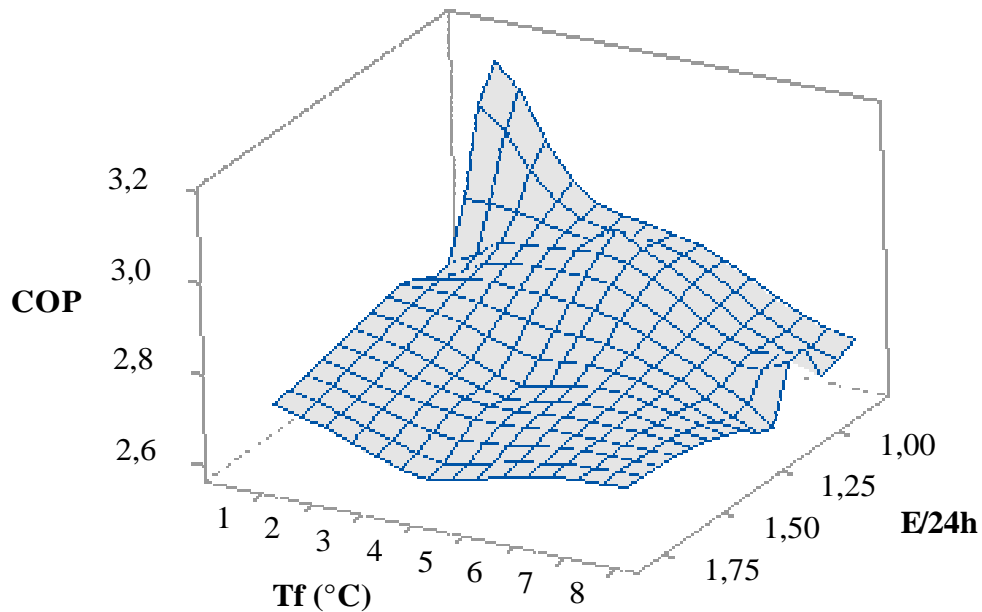


Figure 51. Évolution du COP et E/24h avec différentes températures du compartiment réfrigérateur.

La figure 51 montre que, pour la température égale à 8⁰C la valeur de COP = 2.7 et la consommation d'énergie est de 1.40 KWh, ainsi que pour une température égale à 4⁰C le COP et de 2.6 et la consommation d'énergie égale à 1.75 KWh. Tandis que pour une température de 1⁰C la valeur de COP atteint sa valeur maximale 3.2 et la consommation est diminuée 1 KWh. Et cela confirme l'évolution du COP et la consommation avec différentes températures du compartiment réfrigérateur.

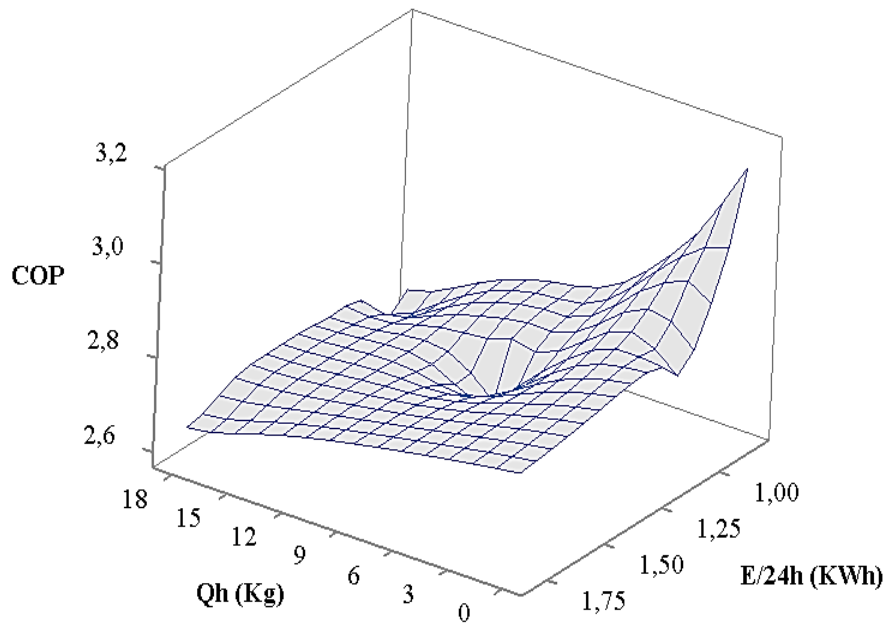


Figure 52. Évolution du COP et E/24h avec différentes quantités de charge thermique Qh

Sur la figure 52 On remarque que pour la charge thermique égale à 0kg la valeur de COP atteinte sa valeur maximale 3.2 et la consommation d'énergie est de 1 KWh, ainsi que pour la charge thermique égale à 9 kg le COP et de 2.8 et la consommation d'énergie égale à 1.25 KWh. Tandis que dans la charge thermique 18 kg la valeur de COP atteint sa valeur minimale 2.6 et la consommation est augmentée 1.75 KWh. Et cela se confirme que plus que la charge thermique augmente plus que le COP diminue et la consommation augmente.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale

Conclusion général

Les travaux de recherche, présentés dans ce mémoire, consiste à évaluer expérimentalement l'effet de l'intégration des matériaux à changement et de la charge thermique sur la consommation d'énergie d'un réfrigérateur domestique et sur l'état thermique de ses compartiments. Pour se faire, une recherche bibliographique riche sur les installations frigorifiques et un état de l'art sur les matériaux à changement de phase et ses applications dans le domaine du froid ont été réalisés dans le but de cerner, dans un premier temps, notre sujet.

Un plan d'expérience de Box Behnken et une méthodologie de surface de réponse utilisant Logiciel Minitab ont été utilisées pour étudier l'effet des paramètres tels que la température de compartiment réfrigérateur (de 1 à 8°C), la quantité de la charge thermique (de 0 à 18 Kg) et la quantité de MCP (0 à 1.5 Kg) intégrée sur le comportement d'un réfrigérateur domestique. L'impact de l'ouverture des portes du réfrigérateur toutes les 15 minutes pendant 2 heures sur la température des étagères dans les différents compartiments du réfrigérateur a également fait l'objet d'une investigation expérimentale.

Le réfrigérateur domestique étudié est un banc d'essais comportant deux parties, un compartiment congélateur supérieur d'un volume de 60 L et un second compartiment d'un volume de 221 L. Dans la partie congélateur, les températures de travail sont comprises entre -23°C et -15°C alors que les températures présentent dans le compartiment réfrigérateur varient entre 1°C et 8°C.

La synthèse des données relevées à partir du banc d'essais est effectuée avec une température de congélateur fixée à -15°C, pour plusieurs températures du compartiment réfrigérateur et pour une température ambiante stable d'environ de 25 °C. Concernant le dispositif de stockage, l'intégration des matériaux à changement de phase entraîne certaines contraintes, liées, notamment au choix du MCP et à son emplacement dans le réfrigérateur. L'eau pure et le mélange eau- propylène glycol 35% sont choisie comme MCP avec une température de changement de phase à 0 °C et -13 °C respectivement. 1 Kg de propylène glycol a été placé au niveau du congélateur au moment où l'eau pure incorporée dans le baquet supérieur de compartiment réfrigérateur en deux quantités différentes ; 0.25 et 0.5 Kg. De l'autre côté, trois charges thermiques de même nature mais en quantité différentes (0 Kg, 9 Kg et 18 Kg) sont expérimentées.

Les résultats obtenus avec MCP montrent clairement l'intérêt de l'intégration d'un tel élément dans un réfrigérateur domestique. Les essais confirment que le stockage par MCP

Conclusion générale

stabilise la température au niveau du volume utile ; la fluctuation de cette température se révèle significativement plus faible (environ 2°C). Dans le même sillage, Il a été constaté qu'avec MCP, la température du compartiment réfrigération lors de l'ouverture de la porte est moins impactée par la température de l'air pénétrant. (D'environ 3 à 5 °C)

Enfin et en guise perspectives, il serait intéressant de compléter ce travail par une étude environnementale du couplage entre énergie renouvelable et stockage dans les réfrigérateurs domestiques.

Bibliographies

Bibliographies

Références bibliographiques

- [1] <https://www.sonelgaz.dz/fr>
- [2] <https://www.aps.dz/algerie/132664>
- [3] Matemilola, S., Fadeyi, O., & Sijuade, T. (2020). Paris agreement. Encyclopedia Of Sustainable Management. 2020, 1–5. 10.1007/978-3-030-02006-4_516-1
- [4] McGill, I., 2014. Trends in Refrigerator Designs and Operational Issues. Senior refrigeration design engineer, Fisher & Paykel Appliances Personal Communication with the Author (Ed.)
- [5] D.Y. Liu, W.R. Chang, J.Y. Lin, Performance comparison with effect of door opening on Variable and fixed frequency refrigerators/freezers, Appl. Therm. Eng. 24 (14e15) (2004) 2281e2292.
- [6] ABBAS Djamel & HOCINE Ali ; Etude et dimensionnement d'un centre de dépôt frigorifique ; UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ – BOUIRA - ; 2017.
- [7] <https://www.climamaison.com/lexique/cycle-frigorifique.htm>
- [8] https://fr.wikipedia.org/wiki/Cycle_thermodynamique
- [9] <https://elearning.univ-usto.dz/pluginfile.php>
- [10] Dr BAKI Touhami ; machine frigorifique et pompe a chaleur ; Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF ;2021
- [11] https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_Clapeyron
- [12] Systèmes de climatisation [archive], sur iso.org (consulté le 12 avril 2020).
- [13] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Fluide-frigorigene.htm>
- [14] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Chlorofluorocarbure>
- [15] Ronia BEN ABDALLAH ; Intégration des matériaux à changement de phase dans les meubles frigorifiques de vente pour améliorer leur efficacité énergétique et leur flexibilité ; Sorbonne Université ; 2019
- [16] <https://www.hvac-intelligence.fr/fluide-frigorigene-nature>
- [17] <https://gas-servei.com/shop/docs/fiche-technique-r600a-gas-servei.pdf>
- [18] Saidur R, Masjuki H.H and Jamaluddin M.Y;A New Approach to Investigate the Energy Performance Of A Household Refrigerator-Freezer;International SnergyJournal;Vol. 7;March 2006
- [19] ASHRAEH and book (equipment). 1988.House hold refrigerators and freezers.Atlanta: ASHRAE.

Bibliographies

- [20] Meier A. 1995. Refrigerator energy use in the laboratory and in the field. *Energy and Building*; 22,233-43.
- [21] Saidur, R.; Masjuki, H.H.; Choudhury, I.A. Role of ambient temperature, door opening, thermostat setting position and their combined effect on refrigerator-freezer energy consumption. *Energy Convers. Manag.* **2002**,43, 845–854.
- [22] Alissi MS. 1987. The effect of ambient temperature, ambient humidity and door openings on House hold refrigerator energy consumption. MSME thesis, Purdue University, Indiana.
- [23] Grimes JG, William PEM, Shomaker BL. 1977. Effect of usage conditions on house hold refrigerator-freezer and freezer energy consumption. *ASHRAK Transaction*;83(1):81828.
- [24] Parker DS, Stedman TC. Case study and analysis: Measured savings of refrigerator replacement. In: Mary AP, editor. Proc. Conf. of ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings. Washington(DC): American Council for Energy Efficiency Economy,1992:199—212.
- [25] Khan Md Imran Hossen; Effect of Different Operating Variable on Energy Consumption of House hold Refrigerator; International Journal of Energy Engineering (IJEE); January 2013
- [26] Meier AK. 1994. Do refrigerator thermostat setups save energy? *Homeenergy*;11(3):11.
- [27] Jasmin Geppert; Analysis of effecting factors on domestic refrigerators' energy consumption in use; Energy Conversion and Management; Volume 76, December 2013, Pages 794-800.
- [28] Juan M. Belman-Flore; Therma and Energy Evaluation of a Domestic Refrigerator under the Influence of the Thermal Load; *Energies*;27 January 2019
- [29] Geppert, J.; Stamminger, R. Do consumers act in a sustainable way using their refrigerator? The influence of consumer real life behavior on the energy consumption of cooling appliances. *Int. J. Consum. Stud.* 2010, 34, 219–227. [Cross Ref]
- [30] D.S. Adelekan; Performance of a domestic refrigerator in varying ambient temperatures, concentrations of TiO₂ nano lubricants and R600a refrigerant charges; www.cell.com/heliyon;2021
- [31] T. O Babarinde; Energy performance evaluation of R600a/MWCNT-nano lubricant as a drop-in replacement for R134a in house hold refrigerator system; The 6th International Conference on Power and Energy Systems Engineering (CPESE 2019);20–23 September 2019.
- [32] Lu, Y.L., et al., Expérimental study of Heat Transfer intensification by using a novel combined shelf in Food réfrigérâté display cabinets (Experimental study of a novel c

Bibliographies

- abinets). *Applied Thermal Engineering*, 2010. 30(2–3): p. 85-91.
- [33] Azzouz, K., D. Leducq, and D. Gobin, Performance enhancement of a house hold refrigerator by addition of latent heat storage. *International Journal of Refrigeration*, 2008. 31(5): p. 892-901.
- [34] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Materiau-a-changement-de-phase-thermique-page-3.html>.
- [35] <file:///C:/Users/PC/Desktop/memoire%202022/chaleur%20latente.pdf>
- [36] <http://www.recuperation-chaleur.fr/stockage-par-chaleur-latente>.
- [37] Julien Borderon, L'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, intégration des matériaux à changement de phase comme système de régulation dynamique en rénovation thermique. 31/10/2012.
- [38] Tassou, S.A., G. De-Lille, and Y.T. Ge, Food transport refrigeration – Approaches to reduce energy consumption and environmental impacts of road transport. *Applied Thermal Engineering*, 2009. 29(8): p. 1467-1477.
- [39] Ahmed, M., O. Meade, and M.A. Medina, Reducing heat transfer cross the insulated walls of refrigerated truck trailers by the application of phase change materials. *Energy Conversion and Management*, 2010. 51(3): p. 383-392.
- [40] Lu, Y.L., et al., Experimental study of heat transfer intensification by using a novel combined shelf in food refrigerated display cabinets (Experimental study of a novel cabinets). *Applied Thermal Engineering*, 2010. 30(2–3): p. 85-91.
- [41] A. Sevault, K.B., J. Bakken, A. Hafner, A novel PCM accumulator for refrigerated display cabinet: design and CFD simulations, in 12th IIR Conference on Phase-Change Materials and Slurries for Refrigeration and Air Conditioning 2018: Orford (Québec), Canada.
- [42] Ezan, M.A., et al., A numerical study on the usage of phase change material (PCM) to prolong compressor of period in a beverage cooler. *Energy Conversion and Management*, 2017. 142: p. 95-106.
- [43] Alzuwaid, F., et al., The novel use of phase change materials in a refrigerated display cabinet: An experimental investigation. *Applied Thermal Engineering*, 2015. 75: p. 770-778.
- [44] Azzouz, K., D. Leducq, and D. Gobin, Performance enhancement of a household refrigerator by addition of latent heat storage. *International Journal of Refrigeration*, 2008. 31(5): p. 892-901.
- [45] Elarem, R., et al., Performance analysis of a house hold refrigerator integrating a PCM

Bibliographies

- heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 2017. 125: p. 1320-1333.
- [46] Wang, F., et al., The novel use of phase change materials in refrigeration plant. Part 1: Experimental investigation. *Applied Thermal Engineering*, 2007. 27(17): p. 2893-290
- [47] Marques, A.C., et al., Theoretical modelling and experimental investigation of a thermal energy storage refrigerator. *Energy*, 2013. 55: p. 457-465.
- [48] Gin, B. and M.M. Farid, The use of PCM panels to improve storage condition of frozen food. *Journal of Food Engineering*, 2010. 100(2): p. 372-376.
- [49] Oró, E., et al., Improving thermal performance of freezers using phase change materials. *International Journal of Refrigeration*, 2012. 35(4): p. 984-991.
- [50] M. M. Joybari, F. Haghighata, J. Moat and P. Sra, Heat and cold storage using phase change materials in domestic refrigeration systems: The state-of-the-art review, *Energy Build.* 106 (2015) 111–124.
- [51] K. Azzouz, D. Leducq and D. Gobin, Performance enhancement of a house hold refrigerator by addition of latent heat storage, *Int. J. Refrig.* 31 (2008) 892–901.
- [52] M. I. H. Khan and H. M. M. Afroz, Diminution of temperature fluctuation inside the cabin of a house hold refrigerator using phase change material, *Recent Adv. Mech. Eng.* 3 (2014) 43
- [53] F. Wang, G. Maidment, J. Missenden and R. Tozer, A review of research concerning the use of PCMs in air conditioning and refrigeration engineering, *Adv. Build. Technol.* 2 (2002) 1273–1280.
- [54] A. Marques, G. Davies, G. Maidment, J. Evans and I. Wood, Novel design, and performance enhancement of domestic refrigerators with thermal storage, *Appl. Therm. Eng.* 63 (2014) 511–519.
- [55] M. I. H. Khan and H. M. M. Afroz, Effect of phase change material on the performance of a house hold refrigerator, *Asian J. Appl. Sci.* 6 (2013b) 56–67.
- [56] B. Zalba, J. M. Marin, L. F. Cabeza and H. Mehling, Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis, and applications, *Appl. Therm. Eng.* 23 (2003) 251–283.
- [57] M. I. H. Khan and H. M. M. Afroz, An experimental investigation of the effects of Phase Change Material on Coefficient of performance (COP) of a house hold refrigerator, *Proc. Int. Conf. On Mechanical Engineering and Renewable Energy 2011 (ICMERE2011)*, Chittagong, Bangladesh, 22–24 December 2011.
- [58] D. Onyejekwe, Cold storage using eutectic mixture of NaCl/H₂O: An application to

Bibliographies

- photovoltaic compressor vapors freezers, *Solar Wind Technol.* 6 (1989) 11–18.
- [59] M. I. H. Khan and H. M. M. Afroz, Experimental investigation of performance improvement of house hold refrigerator using phase change material, *Int. J. Air Cond. Refrig.* 21 (2013a) 1350029-1–8.
- [60] K. Azzouz, D. Leducq and D. Gobin, Enhancing the performance of House hold refrigerators with latent heat storage: An experimental investigation, *Int.J. Refrig.* 32 (2009) 1634–1644.
- [61] W.L. Cheng and Y. X. Dong, Numerical analysis of a novel house hold refrigerator with shape-stabilized PCM (phase change material) heat storage condensers, *Energy* 59 (2013) 265–276.
- [62] M. I. H. Khan and H. M. M. Afroz, Experimental investigation of performance improvement of house hold refrigerator using phase change material, *Int. J. Air Cond. Refrig.* 21 (2013a) 1350029-1–8.
- [63] Institute of Standards and Industrial Research of Iran. ISIRI 13700 :1389 House hold Refrigerating Appliances Characteristics and Test Methods; 1389.
- [64] <https://blog.beamex.com/fr/lesthermocouples>
- [65] Rousselle J.J. Thèse de doctorat. Les contours actifs, une méthode de segmentation application à l'imagerie médicale. Université François Robelais, 2003.
- [66] Angellier, H. Thèse doctorat. Nanocristaux d'amidon de maïs cireux pour applications aux composites. Université Grenoble 1, 2005.