

Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf –Mila

**Institut des Sciences et de Technologie
Département de Génie Mécanique et Électromécanique**



N° Réf :.....

**Mémoire préparé en vue de l'obtention du diplôme de
MASTER
En : Génie Mécanique**

Spécialité : ENERGETIQUE

***Etude et conception d'un réfrigérateur
statique solaire. (Start-Up)***

**Préparé par : Bousseloub Salah eddine.
 Laouar Moussa.**

Membre de jury

**Président
Examineur
Promoteur**

**MCB, CU.Mila
MCA, CU.Mila
MCA, CU.Mila**

**Touahria Abdejouad
Bendjaghlouli Ali
Litouche Billel**

Année universitaire : 2024/2025

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier *ALLAH*, tout puissant, de nous avoir donnée la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés. Nous remercions le Docteur ***LITOUCHE Billel*** notre encadreur d'abord, d'avoir accepté de nous encadrer, et puis pour son aide, ses conseils et ses orientations.

Nous remercierons sincèrement *Dr. TOUAHRIA Abdejouad & Dr. BENDJAGHLOULI Ali* pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être le président du jury.

Nous adressons également nos remerciements tous nos enseignants qui nous ont donné la base de la science.

Merci mes parents, les quels grâce à *ALLAH* et à eux je suis ici, et merci pour tout ce qu'ils ont fait et entrain de faire pour nous.

Mes remerciements vont aussi à nos frères, nos sœurs, et nos collègues.

في هذا العمل، قمنا بدراسة وتصميم ثلاجة شمسية ثابتة كحل بديل وصديق للبيئة لتقنيات التبريد التقليدية، وذلك من خلال أربع فصول رئيسية. في الفصل الأول، تناولنا المبادئ الأساسية للتبريد، بما في ذلك تاريخه، والتقنيات المستعملة، والمفاهيم الديناميكية الحرارية (مثل دورة كارنو). الفصل الثاني خصصناه للطاقة الشمسية وتطبيقاتها في مجال التبريد، مع التركيز على المبادئ الأساسية وتقنيات التحويل. في الفصل الثالث، قمنا بتصميم ثلاجة شمسية من خلال تحديد الحاجيات، دراسة المكونات، البعد الحراري، وتحليل حالة أولية عبر نموذج أولي. أما الفصل الرابع، فقد خُصص لاختبار الأداء من خلال تجارب مخبرية وتحليل النتائج، بالإضافة إلى إبراز الفوائد البيئية للنظام. تُختتم المذكرة بخلاصة عامة وآفاق مستقبلية لتحسين النموذج واستغلاله على نطاق أوسع.

Résumé

Dans ce travail, nous avons étudié et conçu un réfrigérateur solaire statique comme alternative écologique aux systèmes de réfrigération conventionnels, à travers quatre chapitres principaux. Le premier chapitre aborde les principes de base de la réfrigération, son historique, les technologies utilisées ainsi que les notions de thermodynamique (Cycle de Carnot). Le deuxième chapitre est consacré à l'énergie solaire et ses applications en réfrigération, en mettant l'accent sur les principes fondamentaux et les technologies de conversion. Dans le troisième chapitre, nous avons conçu un réfrigérateur solaire en définissant les besoins, en étudiant les composants, l'aspect thermique, et en réalisant une étude de cas avec un prototype. Le quatrième chapitre est dédié aux tests de performance en laboratoire et à l'analyse des résultats, en soulignant les avantages environnementaux du système. Le mémoire se termine par une conclusion générale et des perspectives d'amélioration.

Abstract

In this work, we studied and designed a static solar refrigerator as an eco-friendly alternative to conventional refrigeration systems, through four main chapters. The first chapter covers the basic principles of refrigeration, its history, technologies used, and thermodynamic concepts (such as the Carnot cycle). The second chapter focuses on solar energy and its applications in refrigeration, highlighting fundamental principles and solar conversion technologies. In the third chapter, we designed a solar refrigerator by defining requirements, studying components, thermal modeling, and presenting a case study with a prototype. The fourth chapter is dedicated to performance testing in the laboratory and results analysis, while highlighting the environmental benefits of the system. The thesis concludes with a general conclusion and future perspectives for system improvement and broader implementation.

INTRODUCTION GENERALE.....	01
----------------------------	----

Chapitre 1 : Principe de base de la réfrigération.

1. HISTOIRE DE LA REFRIGERATION.....	01
1.1. Introduction à l'histoire de la réfrigération.....	01
1.2. Définition de réfrigération.....	01
1.3. Réfrigération dans l'Antiquité.....	01
2. TECHNIQUES DE REFROIDISSEMENT.....	02
2.1. Réfrigération par compression de vapeur.....	02
2.1.1. Eléments du cycle frigorifique à compression de vapeur.....	02
a. Compresseur.....	03
b. Condenseur.....	04
c. Détendeur.....	05
d. L'évaporateur.....	05
2.1.2. Fonctionnement.....	06
2.2. Réfrigération par absorption.....	07
2.2.1. Machine frigorifique à absorption.....	07
2.2.2. Cas d'une machine frigorifique basée sur un processus à absorption.....	07
a. Le cycle frigorifique à absorption simple effet.....	08
b. Le cycle frigorifique à absorption demi effet.....	09
c. Le cycle frigorifique à absorption double effet.....	09
d. Le cycle frigorifique à absorption triple effet.....	10
2.2.3. Réfrigération thermoélectrique (Effet Peltier).....	11
2.2.4. Réfrigération magnétique.....	13
3 . COMPARAISON DES TECHNIQUES DE REFRIGERATION.....	13
4. PRINCIPE THERMODYNAMIQUE DE LA REFRIGERATION.....	14
4.1. Cycle frigorifique ditherme.....	14
4.2. Coefficients de Performance.....	15
4.3. Diagramme de MOLLIER.....	15

D

Chapitre 2 : Energie Solaire et application en refrigeration.

1. INTRODUCTION A L'ENERGIE SOLAIRE.....	17
2. DEFINITION DE L'ENERGIE SOLAIRE.....	18
3. IMPORTANCE DE L'ENERGIE SOLAIRE.....	19
4. ASPECTS POSITIFS ET NEGATIFS DE L'UTILISATION DE L'ENERGIE SOLAIRE.....	21
5. FACTEURS AFFECTANT L'UTILISATION DE L'ENERGIE SOLAIRE	21
6. PRINCIPE DE BASE DE L'ENERGIE SOLAIRE.....	23
6.1. Rayonnement solaire.....	23
6.2. Mesure du rayonnement solaire.....	24
6.3. Transformation de l'énergie solaire en électricité.....	25
6.3.1. Conversion thermodynamique (méthode indirecte).....	25
6.3.2. Méthode directe (cellules solaires).....	27
6.3.3. Types de cellules solaires.....	28
a. Silicium.....	29
a.1. Silicium mono-cristallin.....	29
a.2. Silicium multicristallin (Polycristallin).....	29
b. Cellules solaires amorphes : (Cellules solaires fines).....	30
7. Systèmes utilisés pour collecter et stocker l'énergie solaire.....	30
7.1. Collecteur solaire.....	30
7.2. Types de capteurs solaires.....	31
7.2.1. Capteurs plans non vitrés à revêtement sélectif.....	31
7.2.2. Capteurs plans vitrés.....	31
7.2.3. Capteurs à tubes sous vide.....	32
7.2.4. Capteurs solaires concentrés.....	34
8. TECHNOLOGIE SOLAIRE POUR LA REFRIGERATION.....	34

Chapitre 3 : Conception d'un réfrigérateur solaire.

1. TRANSFERT DE CHALEUR.....	35
1.1. Modes de transfert de chaleur.....	35
1.1.1. Conduction.....	35
1.1.2. Convection.....	35
2. ISOLATION THERMIQUE ET SES CARACTERISTIQUES.....	35
3. SPECIFICATIONS DE REFRIGERATEUR SOLAIRE.....	37

3.1. Données de Base.....	37
3.1.1. Données Géométriques.....	37
a. Volume utile.....	37
b. Dimensions internes.....	37
c. Circuit fluidique d'un réfrigérateur statique.....	38
3.1.2. Données thermique.....	38
a. Conditions intérieures d'entreposage.....	38
b. Conditions extérieures d'entreposage : Conditions d'essai.....	39
4. CHOIX DES DIFFERENTES PAROIS.....	39
4.1. Portes (Ref ou Frz).....	39
4.2. Murs extérieures (Latérale et Arrière).....	39
5. ÉLEMENTS ET COMPOSANTS D'UN REFRIGERATEUR SOLAIRE.....	39
5.1. Composants principaux du réfrigérateur solaire.....	39
6. BILAN THERMIQUE ET DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME.....	40
6.1. Données de base de calcul.....	40
6.2. Charges thermiques externes.....	41
6.2.1. Charges thermiques par transmission à travers les parois (Q_{tr}).....	41
6.2.2. Charge thermique à travers les joints.....	42
6.3. Charges thermiques internes.....	42
6.4. Charge totale de l'application.....	42
6.5. Caractéristique du compresseur.....	42
6.5.1. Calcul de débit du fluide.....	42
6.5.2. Calcul le volume aspiré.....	43
6.5.3. Calcul de rendement volumique du compresseur. (η_v).....	43
6.5.4. Calcul de volume balayé. (V_b).....	43
6.5.5. Calcul du cylindré de compresseur. (C).....	44
7. CLASSE ENERGETIQUE.....	44
7.1. Volume équivalent.....	44
7.2. Consommation annuelle d'énergie standard (CES).....	45
7.3. Consommation annuelle d'énergie réelle (CEA) en kWh/an.....	46
7.4. Indice d'efficacité énergétique (α_i).....	46

8. DIMENSIONNEMENT DU CIRCUIT FLUIDIQUE.....	47
--	----

Chapitre 4 : Energie Solaire et ses applications en réfrigération.

1. DIMENSIONS DU CYCLE LA REFRIGERATION	49
1.1. Charges thermiques externes.....	49
1.1.1. Charge thermique par transmission à travers les parois.....	49
a. Calcul du coefficient d'échange global K pour la paroi	49
a.1. Calcul de la résistance totale.....	49
b. Calcul des surfaces d'échange.....	50
c. Calcul d'écart de la température.....	51
d. Calcul des apports thermiques.....	52
1.1.2. Charge thermique à travers les joints. (Q_T joint).....	52
1.1.2.1. Calcul Charge thermique à travers les joints (Comp Frz).....	52
a. Calcul du coefficient d'échange K du joint.....	52
a.1. Calcul de la Résistance.....	52
b. Calcul de la surface totale.....	53
c. Calcul l'écart ΔT	53
1.1.2.2. Calcul charge thermique à travers les joints. (Comp Ref).....	53
a. Calcul coefficient d'échange K du joint.....	53
a.1. Calcul de la Résistance.....	53
b. Calcul de la surface totale.....	54
c. Calcul l'écart ΔT	54
1.2. Charges thermiques internes.....	54
1.3. Charge totale de l'application. (Q_T).....	54
2. CARACTERISTIQUES DU COMPRESSEUR.....	55
2.1. Calcul de débit du fluide (m).....	55
2.3. Calcul le volume aspiré. (V_{asp}).....	56
2.4. Calcul le rendement volumique du compresseur. (η_v).....	56
2.5. Calcul le volume balayé. (V_b).....	57
2.6. Calcul du cylindre de compresseur (C).....	57
3. CLASSE ENERGETIQUE.....	58
3.1. Calcul du volume équivalent. (V_{eq}).....	58
3.2. Calcul de la consommation annuelle d'énergie standard. (CEs).....	58

3.3. Calcul de la consommation annuelle d'énergie réelle. (CEa).....	58
3.3.1 Calcul de la puissance du compresseur. (P_{cp}).....	58
3.3.2. Indice d'efficacité énergétique. ($I\alpha\%$).....	59
4. CAPTEUR.....	59
4.1. Caractéristiques techniques de base.....	60
CONCLUSION GENERALE.....	62

Liste des tableaux

Tableau 1	Performance des cycles absorption.	11
Tableau 2	Comparaison des différentes techniques de réfrigération.	14
Tableau 3	Avantages et inconvénients de l'énergie solaire.	21
Tableau 4	Description d'un réfrigérateur (Données Géométriques).	37
Tableau 5	Températures de stockage (Données thermique).	38
Tableau 6	Caractéristiques thermimo-physiques des matériaux dans les portes	39
Tableau 7	Caractéristiques thermimo-physiques des matériaux (Mur extérieur et plafond)	39
Tableau 8	Tableau thermodynamiques du Gaz R600a	47
Tableau 9	Propriétés thermiques et résistances superficielles des matériaux.	49
Tableau 10	Caractéristiques des matériaux utilisés dans le réfrigérateur.	49
Tableau 11	Résistance thermique de chaque couche de la paroi.	49
Tableau 12	Coefficient de performance .	50
Tableau 13	Surfaces d'échange	51
Tableau 14	Ecart de la température	51
Tableau 15	Apports thermiques.	52
Tableau 16	Débit du fluide.	56
Tableau 17	Volume aspire.	56
Tableau 18	Rendement volumique du compresseur.	57
Tableau 19	Volume balayé.	57
Tableau 20	Calcul du cylindré de compresseur.	57
Tableau 21	Model de compresseur.	57
Tableau 22	Volume équivalent.	58
Tableau 23	Consommation annuelle d'énergie standard.	58
Tableau 24	Classification énergétique d'un réfrigérateur	59

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1	Cycle de réfrigération à compression de vapeur	03
Figure 2	Cycle de compression	03
Figure 3	Types de condenseur	04
Figure 4	Cycle de Détendeur	05
Figure 5	Evaporateur	05
Figure 6	Cycle théorique d'un système de réfrigération à compression de vapeur (a)Diagramme Entropique, (b) Diagramme d'Enthalpie	06
Figure 7	Schéma d'une machine réfrigération solaire à absorption	08
Figure 8	Schéma de cycle frigorifique à absorption simple effet	09
Figure 9	Schéma de cycle frigorifique à absorption double effet	10
Figure 10	module Peltier	12
Figure 11	Schéma explicatif de l'effet Peltier (thermoélectrique)	12
Figure 12	Dispositif de réfrigération magnétique	13
Figure 13	Cycle frigorifique ditherme	14
Figure 14	Diagramme Mollier	15
Figure 15	Représentation du cycle frigorifique à compression de vapeur sur le diagramme enthalpique	16

Chapitre 2

Figure 16.	Rayonnement solaire total annuel moyen dans les pays d'Afrique et du Moyen Orient	19
Figure 17.	Types de rayonnement solaire	24

Figure 18.	Mécanisme de production d'énergie électrique à l'aide de miroirs solaires (héliostats)	26
Figure 19.	Mécanisme de fonctionnement des cellules solaires (grid-of)	28
Figure 20.	Connexion des cellules solaires en mode de raccordement direct (grid-on)	28
Figure 21.	Types de cellules solaires	30
Figure 22.	Capteurs solaires non vitrés à revêtement sélectif	31
Figure 23.	Capteurs plans vitrés	32
Figure 24.	Principe de fonctionnement des capteurs plans vitrés	32
Figure 25.	Capteurs à tube sous vide	33
Figure 26.	Principe de fonctionnement des capteurs à tubes sous vide	33
Figure 27.	Capteur solaire à tube thermique	33
Figure 28.	Ensemble de concentrateurs solaires paraboliques	34

Chapitre 3

Figure 29.	Composants principaux du réfrigérateur et le mécanisme de fonctionnement	38
Figure 30.	Étiquette énergétique d'un réfrigérateur et ses indications principaux	44

Chapitre 4

Figure 31.	Diagramme frigorifique d'un fluide R600a	55
Figure 32.	Plan de conception d'un panneau solaire avec les détails des dimensions	60
Figure 33.	Schéma d'un système de réfrigération solaire	61

NOMENCLATURE

<i>symbole</i>	<i>Grandeurs</i>	<i>Unités</i>
T_e	Température extérieure de bas	$^{\circ}\text{C}$
T_h	Température humide	$^{\circ}\text{C}$
V	Vitesse de l'air	m/s
Q_{tr}	Charge thermique par transmission à travers les parois	W
S	Surface	m^2
ΔT	Ecart de température.	$^{\circ}\text{C}$
K	Coefficient de transmission thermique global .	$\text{W/m}^2.\text{K}$
R_i	Résistance thermique superficielle interne .	$\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C/W}$
R_e	Résistance thermique superficielle externe.	$\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C/W}$
e	Epaisseur .	m
λ	Coefficient de conductivité thermique.	$\text{W/m }^{\circ}\text{C}$
V_c	Volume utile.	m^3
T_c	Température de compartiment concerné.	$^{\circ}\text{C}$
V_{eq}	Volume équivalent.	m^3
N	Nombre de tours du piston de compresseur.	tr/min
P_{cp}	Puissance du compresseur.	W
Q_t	Charge totale.	W
COP	Coefficient de performance	
α_i	Indice d'efficacité énergétique.	$\%$
τ_{Cp}	Taux de compression.	

L_{cd}	Longueur de condenseur	m
L_{ev}	Longueur de l'évaporateur	m
M	Débit du fluide	kg/h
Δh	Difference d'enthalpie	kJ/Kg
$v'1$	Volume spécifique de la vapeur aspiré.	m ³ /kg
V_{asp}	Volume aspiré	m ³
V_b	Volume balayé	m ³
C	Cylindre de compresseur	cm ³
C_{es}	Consommation d'énergie annuelle satandard.	(Kwh/an)
C_{ea}	Consommation d'énergie annuelle.	(Kwh/an)

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Au cours des dernières décennies, l'intérêt pour les énergies renouvelables a considérablement progressé en raison de la nécessité de réduire la dépendance aux combustibles fossiles et d'atténuer leurs effets néfastes sur l'environnement, notamment le réchauffement climatique et la pollution. L'énergie solaire, en tant que ressource abondante et propre, constitue l'une des principales alternatives durables pouvant être exploitées dans divers domaines, allant de la production d'électricité à l'alimentation des appareils domestiques et industriels.

Parmi ces applications prometteuses, l'utilisation de l'énergie solaire pour le fonctionnement des systèmes de réfrigération, et plus particulièrement des réfrigérateurs, revêt une importance capitale. Ces équipements jouent un rôle essentiel dans la conservation des denrées alimentaires et des médicaments, en particulier dans les zones rurales et isolées où l'accès à l'électricité demeure limité.

L'adoption des réfrigérateurs solaires ne se limite pas à la réduction de la consommation d'énergie du réseau électrique, mais vise également à améliorer les conditions de vie dans les régions où l'approvisionnement en électricité est irrégulier. En outre, ces dispositifs s'avèrent indispensables dans le secteur de la santé, où la conservation des vaccins et des médicaments thermosensibles constitue une exigence fondamentale.

L'intégration de l'énergie solaire dans les systèmes de réfrigération présente également des avantages économiques significatifs. En effet, ces réfrigérateurs permettent de réduire les coûts d'exploitation à long terme, puisqu'ils ne requièrent ni alimentation électrique conventionnelle ni générateurs fonctionnant aux combustibles fossiles, réduisant ainsi les dépenses liées à l'achat de carburant et à la maintenance. De surcroît, cette solution contribue à limiter les émissions de gaz à effet de serre, favorisant ainsi une transition énergétique plus respectueuse de l'environnement.

Cette étude a pour objectif d'évaluer scientifiquement cette technologie en analysant ses bénéfices, ses limites et les défis techniques et économiques qui entravent sa généralisation.

La méthodologie adoptée repose sur une approche combinant analyse théorique et études empiriques. Elle comprend :

Une revue approfondie de la littérature scientifique portant sur les réfrigérateurs solaires et les technologies de réfrigération utilisant les énergies renouvelables.

Les réfrigérateurs jouent un rôle central dans la préservation des denrées périssables, contribuant ainsi à la réduction du gaspillage alimentaire et à l'amélioration de la santé publique. Toutefois, leur fonctionnement nécessite une alimentation électrique stable et continue, ce qui constitue un défi majeur dans les régions souffrant d'un accès limité à l'électricité.

L'exploitation de l'énergie solaire apparaît comme une solution durable à cette problématique, permettant d'assurer un approvisionnement énergétique fiable grâce à l'installation de panneaux solaires sur les toits des habitations et des infrastructures locales. L'évolution constante des technologies photovoltaïques et des systèmes de stockage d'énergie renforce davantage la viabilité et l'efficacité de ces solutions.

Cette étude vise à apporter une contribution significative au développement des technologies de réfrigération solaire en mettant en lumière leurs avantages, leurs défis et les opportunités d'amélioration. L'adoption de ces solutions dans les régions à fort ensoleillement, mais souffrant d'infrastructures électriques limitées, pourrait constituer une avancée majeure en matière de développement durable et d'indépendance énergétique.

Chapitre 01

Principe de base de la réfrigération

Dans un contexte où la conservation des denrées alimentaires, la climatisation des espaces, et la maîtrise des températures dans les procédés industriels deviennent de plus en plus essentiels, la réfrigération s'impose comme une technologie incontournable. Depuis ses origines empiriques jusqu'aux systèmes modernes à haute efficacité énergétique, la réfrigération a connu une évolution remarquable, tant sur le plan technique que scientifique. Ce chapitre vise à présenter les fondements de la réfrigération à travers une approche historique, technique et thermodynamique. Nous allons d'abord retracer l'historique de cette technologie, puis aborder les principales techniques de refroidissement utilisées. Ensuite, une attention particulière sera portée sur les principes thermodynamiques qui régissent le fonctionnement des systèmes frigorifiques, notamment à travers le cycle de Carnot. Enfin, nous terminerons par une classification des différents types de réfrigérateurs existants.

1. HISTOIRE DE LA REFRIGERATION

1.1. Introduction à l'histoire de la réfrigération

L'histoire de la réfrigération remonte à l'Antiquité, lorsque les hommes utilisaient la glace naturelle pour conserver les aliments et refroidir les boissons. Cette pratique s'est progressivement développée jusqu'à l'apparition des systèmes de réfrigération modernes basés sur les principes de la thermodynamique.

1.2. Définition de réfrigération

La réfrigération est un processus dans lequel la chaleur est transférée d'un espace froid, à basse température, vers un espace relativement chaud, à une température plus élevée. Comme le flux naturel de chaleur se fait toujours d'une région à température élevée vers une région à température plus basse, cela signifie que, dans le processus de réfrigération, une énergie externe doit être fournie, de manière à forcer la chaleur à circuler dans le sens opposé de son flux naturel. Les applications générales de la réfrigération sont la conservation des aliments et la climatisation. Parmi les principaux types de réfrigération connus en général, on trouve : la réfrigération par compression de vapeur et la réfrigération par absorption, la Réfrigération thermoélectrique (effet Peltier), la Réfrigération magnétique. [1-2]

1.3. Réfrigération dans l'Antiquité :

Le refroidissement a commencé il y a des milliers d'années en Chine, ainsi que chez les Grecs, les Romains, les Indiens et les Égyptiens. Les Romains utilisaient la glace naturelle pour refroidir les aliments et les boissons, et les matériaux d'isolation étaient la paille et les herbes. Les Indiens et les Égyptiens, quant à eux, parvenaient à obtenir de l'eau froide et même de la glace en plaçant de l'eau dans des récipients en terre cuite poreux, laissés pendant la nuit dans des fosses creusées dans le sol.

- ✓ Au début du (19^{ème} siècle), les premières tentatives de production de glace à l'aide de machines de refroidissement ont vu le jour. L'une des premières machines de refroidissement a été enregistrée par (**Jacob Perkins**) en © en (**1834**). Cette machine était composée d'un compresseur manuel, d'un condenseur refroidi à l'eau et d'un évaporateur immergé dans le liquide à refroidir. [1]

- ✓ En **(1834)**, **(John Gorrie)** a inventé une machine à fabriquer de la glace conçue pour utiliser l'air comme fluide de refroidissement. [1]
- ✓ En **(1834)**, **(Alexander Kirk)** a également inventé une machine de refroidissement à air, et il a été rapporté que la consommation de carburant de cette machine était d'une livre de charbon pour produire quatre livres de glace. [1]
- ✓ Vers **(1838)**, le refroidissement a trouvé de nombreuses applications dans la vie quotidienne, comme la conservation de la viande et des aliments. En **(1834)**, le refroidissement industriel a commencé à prendre sa place parmi les différentes industries, et de nouveaux équipements sont apparus, tels que le refroidissement par compression, le refroidissement par absorption et le refroidissement par trombes à vapeur, qui sont devenus populaires au début des années **(1930)** et ont été utilisés pour climatiser les grands bâtiments. Les compresseurs étaient entraînés par des machines à vapeur alternatives à basse vitesse (environ **(80 tours par minute)**). [1]
- ✓ Au début du **(20^{ème} siècle)**, les applications du refroidissement ont commencé à se diversifier dans de nombreuses industries. Au cours des dernières décennies, les industries liées au refroidissement se sont considérablement développées, faisant des progrès significatifs dans l'avancement industriel et la production, contribuant ainsi à l'amélioration du niveau de vie dans notre pays. [1]

2. TECHNIQUES DE REFROIDISSEMENT.

2.1. Réfrigération par compression de vapeur.

La réfrigération par compression de vapeur est un système thermodynamique qui utilise un fluide frigorigène pour transférer la chaleur d'un milieu froid vers à un autre chaud via un cycle fermé.

2.1.1. Eléments du cycle frigorifique à compression de vapeur :

Le cycle se compose des éléments suivants :

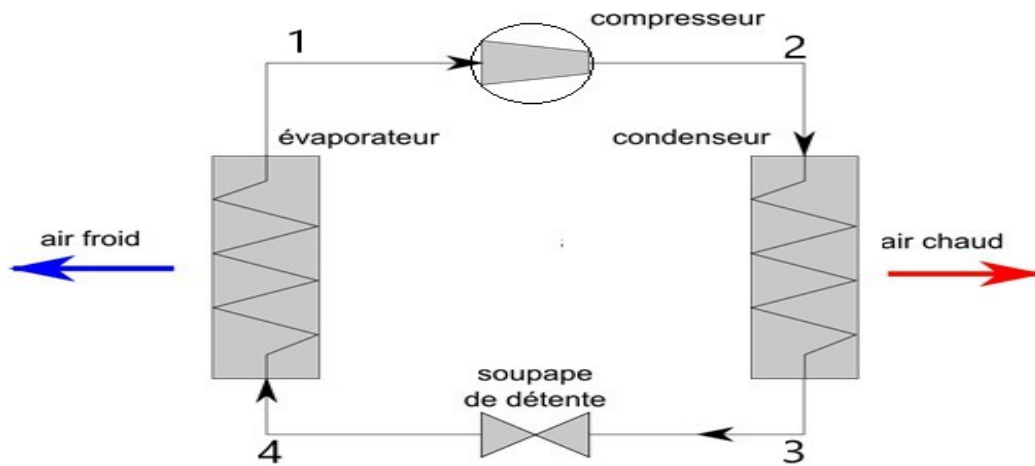


Figure 1. Cycle de réfrigération à compression de vapeur. [2]

a. Compresseur et ses types.

Le compresseur est considéré comme le cœur de l'installation frigorifique, il assure la circulation de fluide dans différentes parties du circuit, il aspire et refoule toujours un réfrigérant en phase gazeuse (vapeur) du bas niveau de température et de pression à un niveau plus haut de température et de pression [3],



Figure 2. Compresseur hermétique. [3]

Il existe différents types de compresseurs sur le marché :

- ✓ **Compresseurs à piston** : c'est un modèle courant qui équipe principalement les réfrigérateurs et les congélateurs ménagers. Peu encombrant et compact. En phase d'admission, le piston aspire le fluide, puis le comprime pour l'évacuer ensuite recomprimer dans le circuit. Et un nouveau cycle recommence. On peut aussi rencontrer ce genre de compresseur dans le froid industriel, pour les groupes de production d'eau glacée par exemple.

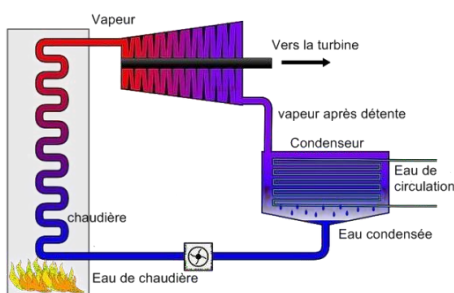
- ✓ **Compresseurs à spirale** : on les appelle aussi compresseurs « scroll ». On les reconnaît à leur forme allongée. Ils emploient deux spirales intercalées comme des palettes pour pomper et comprimer les fluides. Souvent, une des spirales est fixe alors que l'autre se déplace excentriquement, sans tourner de sorte à emprisonner des poches de fluide entre les spires. Leur champ d'application est plutôt pour la climatisation du fait de leur discrétion sonore.
- ✓ **Compresseurs à vis** : on les appelle aussi, hélico compresseur, Ils sont constitués de deux vis synchronisées contre rotatives qui permettent de comprimer le fluide. On joue sur une diminution du volume pour comprimer le fluide. En effet, l'empreinte des vis est plus creusée à l'entrée qu'à la sortie. Suivant les modèles et la distance entre les deux vis, un film d'huile est utilisé pour assurer l'étanchéité. En conclusion à chaque dispositif de froid sa technologie de compresseur.

b. Condenseur.

C'est un échangeur de chaleur qui va permettre l'évacuation de la chaleur contenue dans le fluide frigorigène gazeux issu du compresseur en le liquéfiant. Cette condensation (liquéfaction) est obtenue par le refroidissement du fluide frigorigène gazeux à pression constante par un médium qui peut être de l'eau ou de l'air. [3]

Cette évacuation de chaleur s'effectue en trois étapes :

- ✓ La désurchauffe des vapeurs de fluide frigorigène, évacuation par chaleur sensible
- ✓ La condensation des vapeurs, évacuation par chaleur la tente – étape principale
- ✓ Le sous refroidissement du fluide frigorigène liquide, évacuation par chaleur sensible



a. Condenseur à air



b. Condenseur à eau



c. Condenseur mixte

Figure 3. Types de condenseur. [3]

- a. Condenseur à air : utilise l'air pour condenser la vapeur.
- b. Condenseur à eau de refroidissement : utilise de l'eau pour condenser la vapeur
- c. Condenseur mixte : utilise une combinaison de plusieurs types de condenseurs pour condenser la vapeur.

c. Détendeur.

Il permet de réduire la pression du fluide frigorigène liquide (création de pertes de charge) issu du condenseur avant son introduction dans l'évaporateur dans le but de permettre sa vaporisation à basse température dans l'évaporateur, [3]. On distingue trois types de détendeur:

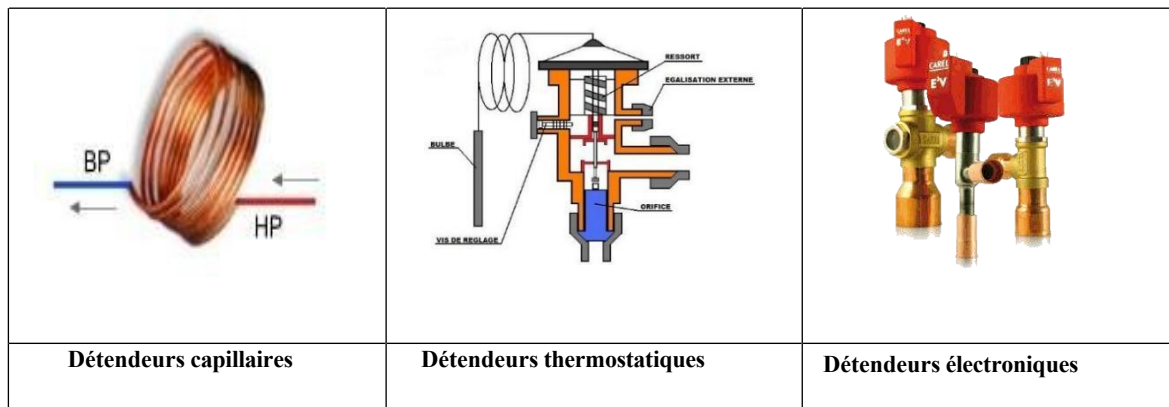


Figure 4. Types de détendeur. [3]

d. Evaporateur.

C'est un échangeur de chaleur dans lequel le fluide frigorigène liquide à bas niveau de température et de pression va absorber la chaleur du milieu à refroidir (air ou eau) à pression constante devenant ainsi gazeux. [3]. Cette absorption de chaleur s'effectue en deux étapes :



Figure 5. Evaporateur. [3]

- ✓ L'évaporation du fluide frigorigène liquide (aspiration de chaleur latente – étape principale.
- ✓ La surchauffe des vapeurs issues de l'évaporation du fluide frigorigène liquide (aspiration de chaleur sensible)

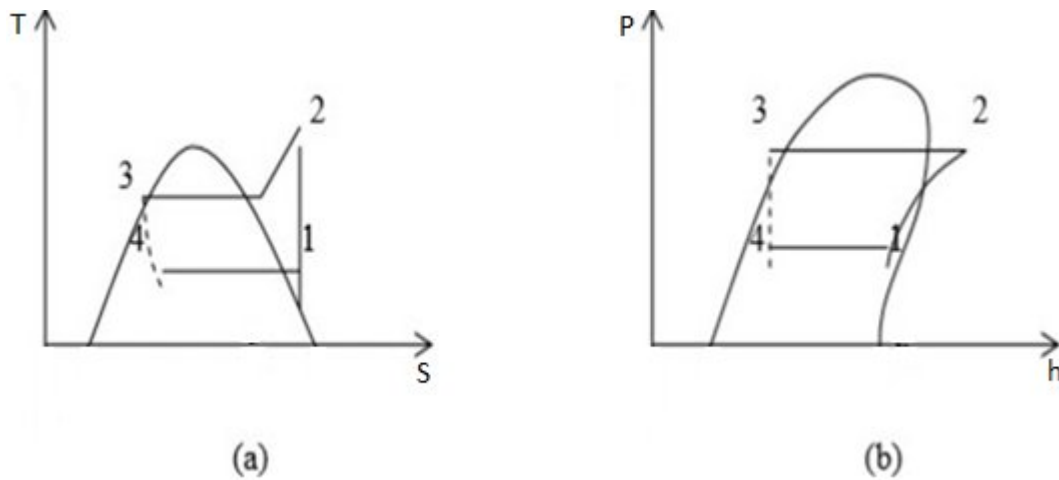


Figure 6. Cycle théorique d'un système de réfrigération à compression de vapeur
(a)Diagramme Entropique- (b) Diagramme Enthalpique. [2]

2.1.3. Fonctionnement :

Dans le cycle théorique, le réfrigérant provenant de l'évaporateur sous forme de vapeur saturée sèche entre dans le compresseur au point (1), il se comprime de manière isentropique jusqu'à le point (2), sous forme de vapeur surchauffée, ensuite pendant son passage dans le condenseur à haute pression, il se condense à pression constante et cède une quantité de chaleur au milieu extérieur, le liquide généré quitte le condenseur au point (3), la chute de la pression s'effectue pendant la détente du réfrigérant à travers une vanne d'étranglement jusqu'à le point (4) et par l'absorption de chaleur du milieu à refroidir le liquide à basse pression s'évapore et quitte l'évaporateur au point (1) sous forme vapeur saturée avant de contaminer un nouveau cycle de réfrigération, Le cycle de compression de vapeur est caractérisé par le fait qu'il faut plus d'énergie pour comprimer la vapeur. [2]

Le travail du compresseur est donné par l'expression :

$$W_{1-2} = h_1 - h_2 \quad (1)$$

La quantité de chaleur retirée du milieu à refroidir dans le processus (4-1), est l'effet réfrigérant utile, et est donnée par l'expression suivante : [2]

$$q_{4-1} = h_4 - h_1 \quad (2)$$

Le rendement du cycle de réfrigération est exprimé comme un Coefficient de performance
 $\text{COP} = \text{effet de réfrigération utile} / \text{apport énergétique net}$

$$\text{COP} = Q_{1-4} / W_{1-2} \quad (3)$$

Le travail du compresseur et, par conséquent, le coût de fonctionnement d'un système de réfrigération, peut être considérablement réduits si le compresseur doit comprimer un liquide, au lieu de la vapeur, C'est la base d'un cycle de réfrigération à absorption. [2]

2.2. Réfrigération par absorption.

2.2.1. Machine frigorifique à absorption.

Le phénomène d'absorption est le mélange d'un gaz avec un liquide, les deux fluides présentent une forte affinité [4]. La procédure de production de froid par absorption liquide- gaz est un procédé où les deux phases de fonctionnement du dipôle sont séparées spatialement et non pas temporellement. Le cycle de basse nécessite donc la mise en œuvre de deux dipôles fonctionnant simultanément [5]. Le système frigorifique à absorption utilise des propriétés couplées d'un absorbant (fluide frigorigène), où ce système est parmi le plus ancien dans la réfrigération.

2.2.1.1. Cas d'une machine frigorifique basée sur un processus à absorption.

Le principe de fonctionnement d'un système frigorifique solaire à absorption est le même que pour un système d'absorption classique à compression, mais en utilisent l'énergie thermique à partir d'un capteur solaire (voir Figure 7.) pour séparer le réfrigérant de l'absorbant.

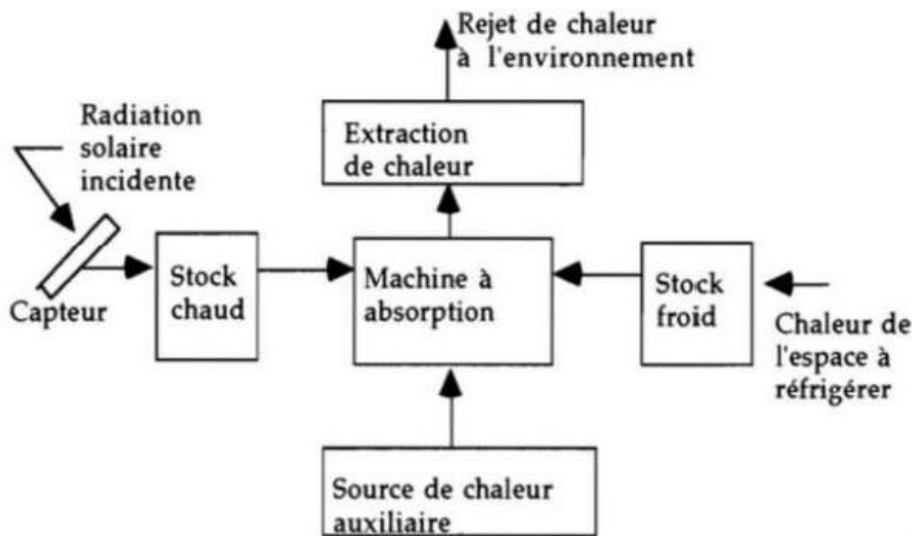


Figure 7. Schéma d'une machine réfrigération solaire à absorption.

Les systèmes d'absorption peuvent être divisés en quatre catégories [6] :

2.2.1.2. Cycle frigorifique à absorption simple effet :

Un système de frigorifique par absorption à simple effet est plus simple lorsque la conception dépend des types de fluide frigorigène. Ce système est basé sur le cycle d'absorption de base qui contient un absorbeur et un générateur comme représenté sur la Figure (8). Dans le générateur, le fluide est séparé de l'absorbant par la chaleur fournie à partir de capteur. La vapeur sont condensés dans le condenseur, puis laminé à vanne de détente et on l'évapore à basse pression à la température d'évaporateur. Le réfrigérant refroidi est absorbé dans l'absorbeur par une faible solution qui retourne au générateur après le laminage dans le détendeur. Le mélange riche créé dans l'absorbeur est pompé par la pompe (P) et renvoyé dans le générateur. L'habitude d'un échangeur de chaleur de la solution (ECS) peut être utilisée pour améliorer l'efficacité du cycle. [8] Un COP plus de 60% peut être obtenue en utilisant l'ECS. [9]

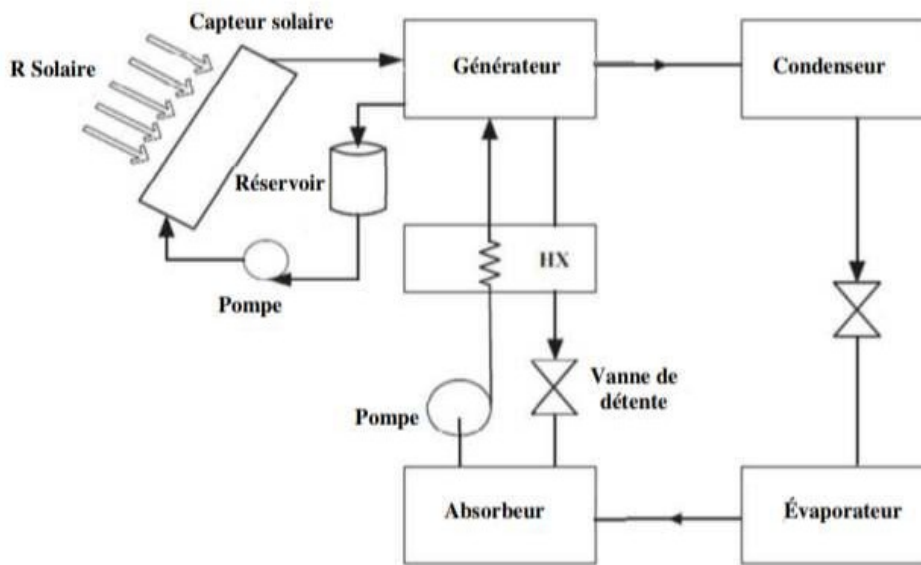


Figure 8. Schéma de cycle frigorifique à absorption simple effet. [7]

2.2.1.3. Cycle frigorifique à absorption demi effet :

La principale caractéristique du cycle d'absorption demi-effet est la capacité de fonctionnement à plus basse température par rapport aux autres. Le nom de (demi-effet) provient du COP ce qui est presque la moitié de celui du cycle simple effet. [8]

2.2.1.4. Cycle frigorifique à absorption double effet :

La technologie de réfrigération par absorption double effet a été lancée en 1956 pour le développement de la performance du système au sein d'une source de chaleur à température plus élevée. [10] La Figure (9) illustre un système d'absorption double effet fonctionnant avec le couple (H₂O/LiBr)

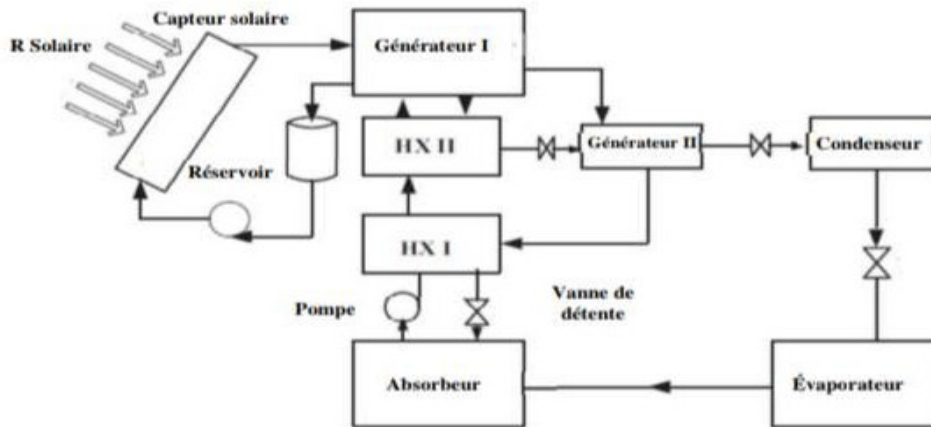


Figure 9. Schéma de cycle frigorifique à absorption double effet. [7]

Le cycle commence avec générateur (I) fournissant de la chaleur au générateur (II). Le condenseur rejette la chaleur et passe le fluide frigorifique vers l'évaporateur ; au cours de cette étape, la réfrigération nécessaire se produit. Ensuite, les fluides passent à travers les échangeurs de chaleur HX-I et HX-II de l'absorbeur à générateur (I) au moyen d'une pompe (P). Grâce à ce processus, HX-II peut passer les fluides au générateur (II) et alors le générateur (II) passe à HX-I. Le cycle complet suit trois différents niveaux de pression : haute, moyenne et faible. Deux systèmes à simple effet forment effectivement un système de réfrigération à double effet. Par conséquent, le COP d'un système de double-effet est presque le double de celle du système d'absorption simple effet. Par exemple, Srihirin et al [11] ont effectué une analyse montrant que le COP d'un système de double-effet est de 0.96, alors que le système simple effet à un COP de 0.6. Le COP des systèmes d'absorption double effet a atteint des valeurs de 1.1 et 1.2 en utilisant la technologie d'absorption au gaz. [6]

2.2.1.5. Cycle frigorifique à absorption triple effet :

La réfrigération par absorption triple effet peut être classé comme cycle unique circuit ou à double circuit. Le cycle triple effet à unique circuit est un circuit fondamentalement de cycle à double effet avec un générateur supplémentaire et le condenseur. Le système résultant avec trois générateurs et trois condenseurs fonctionne de façon similaire au système de double effet. Théoriquement, ce cycle triple effet peut obtenir un COPs d'environ 1.7 [12]. Le cycle triple effet à double circuit se compose de deux cycles simple effet en cascade. Un cycle simple effet fonctionne à une température de fonctionnement normal et l'autre à de température plus élevées. Théoriquement, ce cycle triple effet peut obtenir un COP globale d'environ 1.8 [12]

Le Tableau.1. Présente quelques exemples utilisant le capteur solaire plans dans le cycle de système de réfrigération à absorption avec les performances du chaque système.

Système d'absorption	COP	EER (Btu /Wh)	Température de la source de chaleur	Type de capteur
Simple effet	0.7	2.39	85	Capteur plan
Double effet	1.2	4.10	130	Capteur plan/ Concentrateur
Triple effet	1.7	5.80	220	Tube sous Vide/concentrateur

Tableau1 : Performance des cycles d'absorption. [6]

Il y a aussi à autres systèmes de réfrigération d'absorption par exemple ; les systèmes hybrides qui peuvent atteindre une meilleure performance [13].

2.3. Réfrigération thermoélectrique (Effet Peltier) :

Le principe de fonctionnement du réfrigérateur thermoélectrique dépend de la première loi de la thermodynamique (la loi de conservation de l'énergie), qui concerne l'étude de l'énergie et de ses transformations et l'étude des changements de température dans les systèmes physiques. Le Peltier a plusieurs utilisations dans le refroidissement des appareils électroniques, le chauffage et les applications photovoltaïques portables, car il est simple à installer et est considéré comme une solution alternative d'économie d'énergie sur laquelle on peut compter principalement pour réduire l'utilisation d'énergies épuisables qui dépendent des sources d'énergie traditionnelles provenant des combustibles fossiles qui augmentent les émissions de carbone chaque jour et aggravent le changement climatique dans le monde. Ce sujet aborde actuellement la recherche de solutions pour développer le système thermoélectrique et améliorer ses performances en s'appuyant sur de nouvelles méthodes de refroidissement de l'extrémité chaude du Peltier et de réduction des températures sur l'extrémité froide. [14]



Figure 10. Module Peltier. [15]

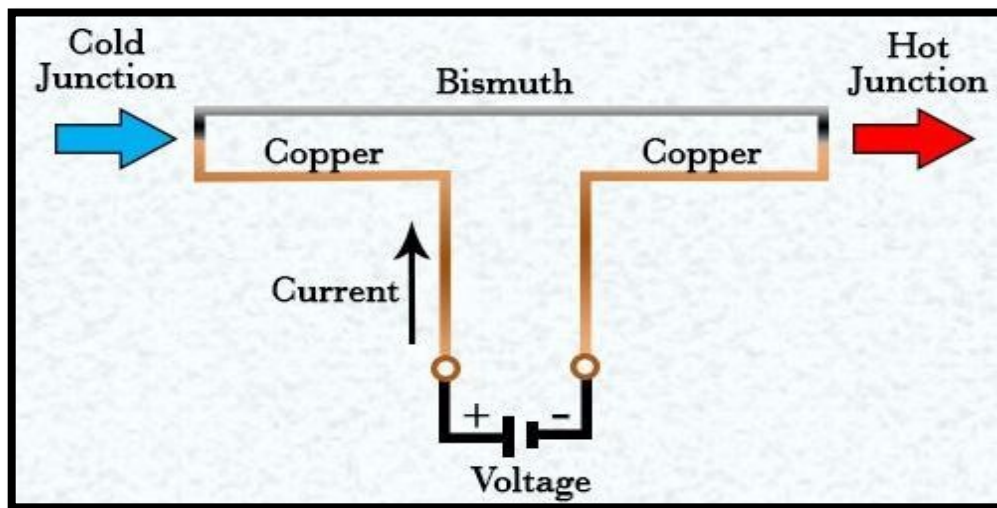


Figure 11. Schéma explicatif de l'effet Peltier (thermoélectrique). [16]

Effet Peltier : c'est un phénomène découvert par le scientifique Peltier, qui a remarqué que lorsqu'un courant électrique continu traverse deux extrémités métalliques différentes, la température diminue ou augmente selon le sens du courant. [17] Si un courant électrique continu traverse deux fils différents, la température de l'une des deux connexions augmente et celle de l'autre diminue. Différentes paires de métaux (fer-cuivre) et (bismuth-cuivre) ont été utilisées pour étudier l'effet Peltier, et une force électrique générée est dirigée du bismuth vers le cuivre, (Voir figure .11). [18]

2.4. Réfrigération magnétique.

La réfrigération magnétique est une technologie de rupture pour produire du froid qui n'utilise pas de gaz à effet de serre et est plus efficace que la réfrigération à compression de gaz. Elle est basée sur l'effet magnétocalorique, une propriété de certains matériaux à changer de température lorsqu'ils sont soumis à une variation de champ magnétique. [19]

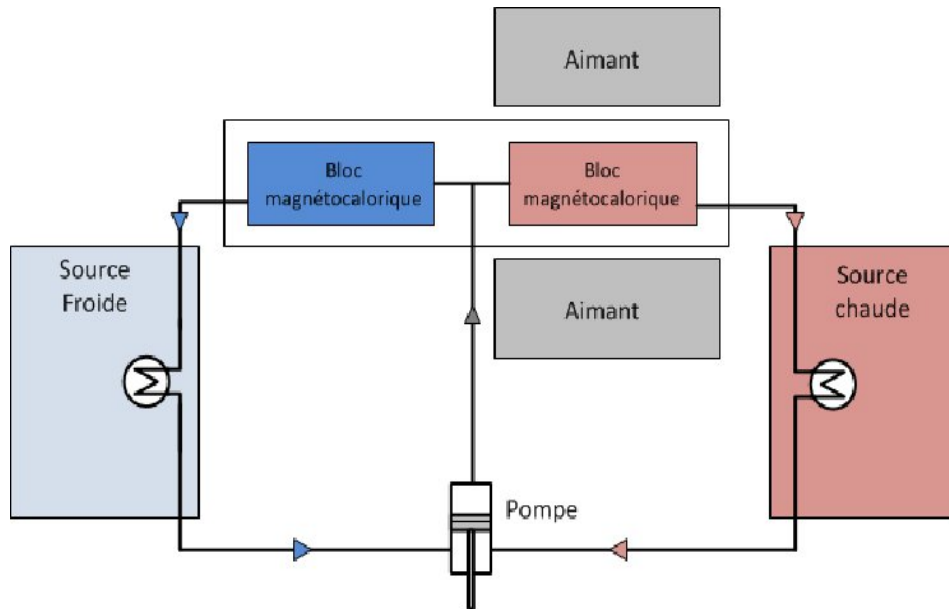


Figure 12. Dispositif de réfrigération magnétique. [20]

Le matériau magnétocalorique est un ruban de gadolinium (Gd pur à 99,9 %) fixé sur un disque en plastique et plongé dans un fluide caloporteur (huile d'olive). Le cycle magnétique d'aimantation/ désaimantation est assuré par la rotation du disque en plastique et son passage devant un aimant. Ce dernier est composé d'un ensemble de secteurs dont l'arrangement a été optimisé pour atteindre 1 (Tesla) dans l'entrefer disponible qui mesure environ 1 cm. L'écart de température obtenu est de 1,6 et 5 K pour un champ de 0,3 (Tesla) et 0,95 (Tesla) respectivement. Cela correspond à 2,5 fois l'EMC du gadolinium [21].

3. COMPARAISON DES TECHNIQUES DE REFRIGERATION.

Chaque technique de refroidissement présente des avantages et des inconvénients selon l'application et les exigences en matière d'efficacité énergétique. La réfrigération par compression de vapeur reste la plus utilisée, mais d'autres technologies, comme la réfrigération magnétique et thermoélectrique, offrent des perspectives d'avenir plus écologiques et efficaces.

Tableau 2 : Comparaison des différentes techniques de réfrigération.

Technique	Avantages	Inconvénients
Compression de vapeur	Haute efficacité, large application	Consommation énergétique élevée, utilisation de gaz frigorigènes
Absorption	Peut fonctionner avec des énergies renouvelables	Moins efficace, temps de refroidissement plus long
Thermoélectrique	Pas de pièces mobiles, silencieux	Faible rendement, applications limitées
Magnétique	Écologique, pas de gaz frigorigènes	Technologie coûteuse, en développement

4. PRINCIPE THERMODYNAMIQUE DE LA REFRIGERATION

4.1. Cycle frigorifique diatherme :

Il n'est pas possible de réaliser un cycle frigorifique diatherme. Pour mettre en œuvre un cycle frigorifique, il est donc nécessaire de disposer d'au moins deux sources de chaleur. L'une sera appelée source froide (milieu à refroidir) et l'autre la source chaude (celle où l'on va rejeter la chaleur) [22]. L'expression du premier principe de la thermodynamique pour un cycle décrit entre deux sources de chaleur est comme suite :

$$Q_C + Q_F + W = 0 \quad (4)$$

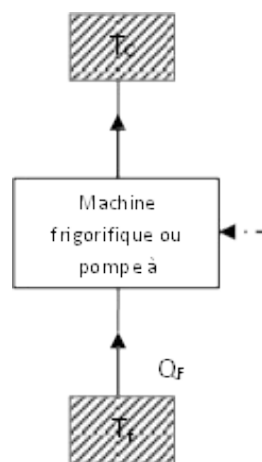


Figure 13. Cycle frigorifique diatherme. [22]

Q_F : chaleur reçue de la source froide.

Q_C : chaleur reçue de la source chaude.

W : Energie mécanique reçue.

Le second principe de la thermodynamique permet d'écrire, pour un cycle réversible et en supposant que les échanges de chaleur se font à la température des sources :

$$\frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} = 0 \quad (5)$$

4.2. Coefficients de Performance :

Pour caractériser l'efficacité d'une machine frigorifique ou d'une pompe à chaleur, on considère, respectivement :

- Coefficient de performance frigorifique :

$$COP = \frac{\text{froid produit à la source froide}}{\text{énergie apportée au système}} \quad (6)$$

Ce rapport adimensionnel a très souvent des valeurs supérieures à l'unité.

4.3. Diagramme de MOLLIER :

Le diagramme de *MOLLIER* est indispensable pour l'ingénieur de conception, il permet de tirer toutes les données nécessaires pour les calculs que ce soit pour un bilan énergétique ou bien pour le dimensionnement du circuit du parcours du fluide, on distingue trois zones différentes sur le diagramme, zone de la phase liquide et une autre zone pour la phase vapeur, et une troisième zone de mélange localisée dans la courbe de saturation. [23].

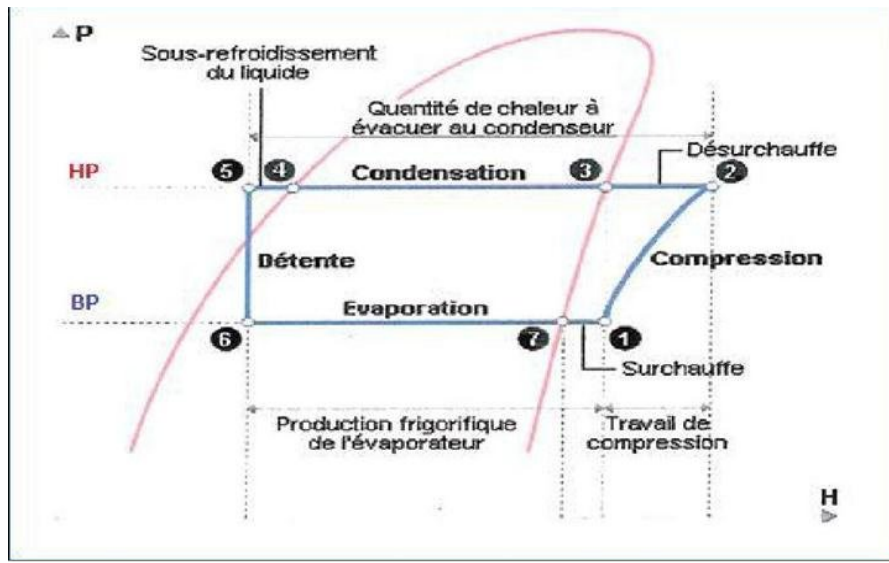


Figure 14. Diagramme de MOLLIER [23]

Transformations thermodynamiques subies par le fluide au cours du cycle : [25]

- | | |
|-----|-----------------------------------|
| 1→2 | Compression isentropique |
| 2→3 | Désurchauffe (isobare) |
| 3→4 | Condensation isotherme et isobare |
| 4→5 | Sous refroidissement |
| 5→6 | Détente Isenthalpique |
| 6→7 | Evaporation isotherme et isobare |
| 7→1 | Surchauffe dans l'évaporateur |

Le cycle frigorifique idéal comprend une évaporation à pression constante, une compression isentropique, une condensation à pression constante et une détente isenthalpique du fluide frigorigène, La figure (15) représente un tracé du cycle frigorifique idéal sur le diagramme p-h

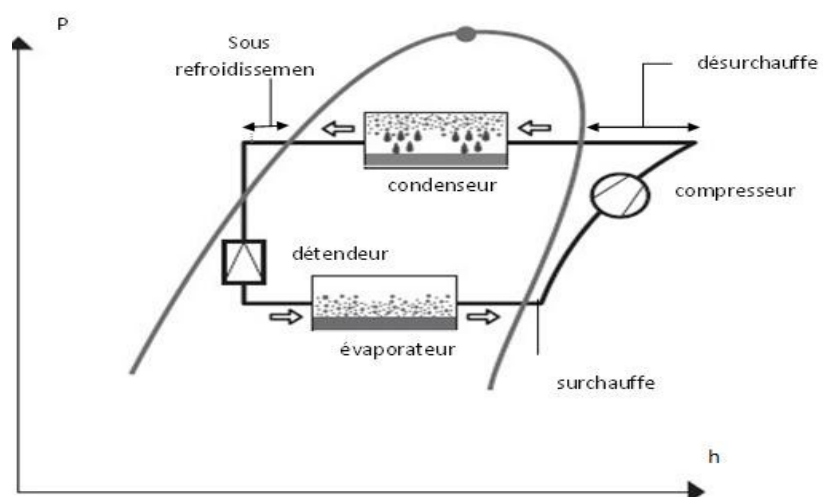


Figure 15. Représentation du cycle frigorifique à compression de vapeur sur le diagramme enthalpique. [23]

Chapitre 02

Energie Solaire et ses applications en réfrigération

Ce chapitre vise à fournir une image descriptive de l'énergie solaire, de ses principes fondamentaux et de son application dans les systèmes de réfrigération. Dans un premier temps, une introduction générale à l'énergie solaire sera présentée, mettant en avant ses caractéristiques, son importance et ses avantages en tant que source d'énergie renouvelable. Ensuite, les principes physiques sous-jacents à l'exploitation de l'énergie solaire seront expliqués, notamment les mécanismes de conversion thermique et photovoltaïque. Enfin, une attention particulière sera accordée aux technologies solaires utilisées pour la réfrigération, en détaillant les différentes approches, leurs performances, leurs avantages ainsi que les défis techniques et économiques associés à leur mise en œuvre.

1. INTRODUCTION A L'ENERGIE SOLAIRE.

La recherche dans le domaine des énergies renouvelables est considérée comme l'un des sujets les plus importants qui ont retenu l'attention des chercheurs de notre époque, en raison du doublement excessif de la demande mondiale depuis la révolution postindustrielle. [26]. Elle est également considérée comme une énergie gratuite et permanente et une solution alternative à l'énergie fossile polluante qui s'épuise. Après la hausse brutale des prix du pétrole en 1973, de nombreux pays ont pris conscience de l'importance de développer ces énergies, notamment l'énergie solaire, disponible dans nos pays arabes. L'Algérie possède un grand potentiel en matière d'énergie solaire en raison de sa superficie et de sa situation géographique importante. Elle reçoit de grandes quantités de lumière solaire, estimée à 5 kWh/m et atteint 7 kWh/m, ce qui signifie qu'elle couvre 5 000 fois la consommation nationale d'électricité, et l'énergie solaire représente donc l'une des solutions possibles dans notre pays.

Depuis le début de sa vie, l'homme a cherché à trouver le confort et à garantir les meilleures conditions de vie idéales. Il a exploité l'énergie solaire dans les systèmes de refroidissement et de climatisation afin de réduire la quantité excessive d'électricité consommée, d'autant plus qu'elles sont liées à ses besoins personnels à une époque où l'utilisation de circuits de refroidissement mécaniques est devenue une menace pour nos vies. [27]

Le domaine de la réfrigération et de la climatisation est considéré comme l'un des domaines de prospérité continue dans le monde, en particulier dans les pays en développement, car il n'existe souvent aucun domaine industriel ou scientifique qui ne dépende sous certains aspects de cette science. Certains estiment également que ce domaine présente une difficulté particulière car il combine en son sein les sciences mécaniques et les sciences électriques. En 2005, une augmentation évidente de la demande pour l'utilisation des technologies de refroidissement a été constatée, que 25 % de l'énergie consommée dans le monde était destinée aux systèmes de réfrigération et de climatisation. [28-29]

Les études de développement et d'analyse des machines de réfrigération fonctionnant à l'énergie solaire nous ont amenés à nous interroger sur plusieurs aspects :

- Comment peut-on utiliser et exploiter l'énergie solaire dans les systèmes de réfrigération et de climatisation ?
- Ces systèmes ont-ils connu une évolution et une amélioration au fil du temps ?

Afin de répondre à ces questions, nous présenterons une étude approfondie sur cette problématique.

2. DEFINITION DE L'ENERGIE SOLAIRE.

L'étude de la structure et de la nature du Soleil permet de déterminer la nature de l'énergie qu'il émet dans l'espace. Le Soleil est une sphère gazeuse enflammée où se produisent des réactions de fusion nucléaire thermonucléaire. Il est composé à 80 % d'hydrogène, à 19 % d'hélium et à 1 % d'autres éléments. Le diamètre de cette sphère est d'environ $1,39 \times 10^6$ km, et elle se situe à une distance de $1,5 \times 10^8$ km de la surface de la Terre. Sa densité est estimée entre 80 et 100 fois celle de l'eau. Sur cette base, le Soleil émet chaque seconde d'énormes quantités d'énergie, estimées à $3,8 \times 10^{26}$ joules. Le joule est une unité de mesure de l'énergie, équivalente à un watt-seconde. Cette énergie est déterminée selon la célèbre relation d'Einstein

$$E = m c^2 \quad (7)$$

E : Energie. (joule)

m : Masse. (kg)

c : Vitesse de la lumière. (m/s)

Cette quantité d'énergie représente une source immense qui dépasse tout ce que l'humanité a consommé au cours de son histoire. La Terre reçoit l'énergie solaire sous forme d'ondes électromagnétiques, qui comprennent :

- Des rayons visibles : ils se manifestent sous forme d'ondes lumineuses correspondant aux sept couleurs du spectre.
 - Des rayons invisibles : tels que les rayons ultraviolets et les rayons infrarouges, entre autres.
- Le constante solaire (ou l'irradiante solaire moyenne) est définie comme étant la puissance électrique produite par le rayonnement solaire incident sur une unité de surface. Son unité est le watt par mètre carré (W/m²).

Avant de pénétrer l'atmosphère terrestre, sa valeur est d'environ 1353 W/m². À la surface de la Terre, cette valeur varie entre 0 et 1000 W/m², en raison de plusieurs facteurs, notamment : Le rayonnement direct (ou perpendiculaire), et le rayonnement diffus (réfléchi ou dispersé) Ces variations sont principalement dues aux obstacles atmosphériques qui entravent le passage des rayons solaires avant d'atteindre la surface terrestre. [30]

La figure (16) montre la différence du rayonnement solaire total annuel moyen dans les pays africains Et le Moyen-Orient, où le monde arabe comprend 22 pays occupant une superficie

géographique estimée Sa superficie est de 13 700 000 km² et le rayonnement solaire incident total annuel moyen est de Il reçoit environ 5 kilowatts/m² par jour, ce qui signifie que les pays arabes reçoivent ensemble une énergie solaire équivalant à 685×10^{11} kilowattheures par jour, et cette énergie est des dizaines de fois supérieure à ce que les pays producteurs de pétrole produisent à partir de leurs cultures oléagineuses. [30]



Figure 16. Rayonnement solaire total annuel moyen dans les pays d'Afrique et du Moyen-Orient. [31]

3. IMPORTANCE DE L'ENERGIE SOLAIRE.

L'énergie solaire revêt une importance considérable qui se reflète dans tous les aspects de la vie humaine, qu'ils soient économiques, sociaux ou environnementaux. Voici quelques points qui soulignent l'importance de l'énergie solaire :

✓ Énergie colossale en termes de réserve et de quantité :

En ce qui concerne sa réserve, le soleil est une source inépuisable d'énergie. Quant à sa quantité, l'énergie solaire qui atteint la Terre est plusieurs fois supérieure aux besoins énergétiques de l'humanité.

✓ Energie pratique à utiliser :

L'énergie solaire est facilement transformable en d'autres formes d'énergie, telles que l'énergie thermique, mécanique ou électrique.

✓ Applications uniques :

Cette énergie est inégalable dans certaines utilisations spécifiques liées à la vie humaine et végétale, comme les grands projets reposant sur l'évaporation massive d'eau ou les processus de photosynthèse.

✓ Source d'énergie propre et sûre :

L'énergie solaire est une énergie propre, sans impact négatif sur l'environnement, et son utilisation est sans danger.

✓ Soleil, source de lumière et de chaleur sur Terre :

Le soleil est le principal fournisseur de lumière et de chaleur pour la planète, jouant un rôle essentiel dans le maintien de la vie.

L'importance de l'énergie solaire réside dans le fait qu'elle est considérée comme l'une des principales sources d'énergie renouvelable du siècle actuel, car l'énergie traditionnelle (fossile) est menacée d'épuisement. De plus, elle a laissé des impacts catastrophiques sur l'environnement terrestre, notamment la pollution et l'augmentation de la température de la Terre, provoquant ainsi des changements climatiques dans l'atmosphère terrestre. C'est pourquoi de nombreux pays se dirigent vers l'investissement dans l'énergie solaire et allouent les fonds nécessaires au développement des produits et des recherches concernant l'exploitation de l'énergie solaire comme l'une des principales sources d'énergie alternative au pétrole et au

gaz, la majeure partie des investissements a été consacrée à la recherche et aux applications liées à la conversion de l'énergie solaire en électricité. [32]

4. ASPECTS POSITIFS ET NEGATIFS DE L'UTILISATION DE ENERGIE SOLAIRE.

Le tableau ci-dessous représente certains avantages et inconvénients de l'énergie solaire. [33]

inconvenient	Avantages
-L'énergie solaire a une faible densité par toit par rapport aux sources d'énergie conventionnelles.	-L'énergie solaire est une alternative de terrain aux énergies fossiles.
-Le manque de continuité de l'énergie solaire pendant la journée, car elle n'est disponible qu'à certaines heures, ce qui entraîne des problèmes pratiques dans son utilisation.	-L'énergie solaire est distribuée sur la surface de la Terre et atteint tout le monde, il n'est donc pas nécessaire de la transmettre et de la distribuer.
-Le stockage est l'un des problèmes de l'exploitation de l'énergie solaire.	-Elle est considérée comme une source respectueuse de l'environnement, ce qui signifie qu'elle empêche la pollution (énergie propre).
-Les coûts d'installation et d'équipement des centrales solaires sont élevés.	-L'énergie solaire est gratuite, son utilisation ne dépend donc que du coût de démarrage.

Tableau 3 : avantages et inconvénients de l'énergie solaire.

5. FACTEURS AFFECTANT L'UTILISATION DE ES.

- Le taux de rayonnement solaire en un lieu donné dépend de nombreux facteurs, notamment la position géographique, l'heure de la journée, les saisons de l'année, le degré de transparence ou de pureté de l'air ainsi que sa masse. Il est également influencé par les variations de température et d'humidité, ainsi que par la vitesse du vent. Ces facteurs constituent les éléments essentiels affectant le taux de rayonnement solaire.
- L'intensité du rayonnement solaire avant d'atteindre la surface terrestre est influencée par deux principaux facteurs : l'atmosphère et l'angle d'incidence du rayonnement sur la

surface terrestre. La plupart des variables déterminantes prennent en compte Ces deux facteurs constituent des paramètres cohérents permettant de prévoir l'intensité du rayonnement solaire en un point donné de la Terre, en fonction de sa position sur le globe et du moment considéré.

- L'atmosphère est composée de plusieurs couches dont l'épaisseur atteint plusieurs kilomètres au-dessus de la surface terrestre. Lorsque les rayons solaires traversent ces couches, leur trajectoire et leur intensité varient en fonction des composants et de l'épaisseur de chaque couche, en raison des phénomènes d'absorption, de diffusion et de réflexion. Par exemple, l'ozone, présent à une altitude d'environ 48 km au-dessus de la surface terrestre, absorbe presque entièrement les rayons ultraviolets. C'est une bénédiction de Dieu pour ses créatures, car sans Sa puissance et la présence de ce gaz, la vie sur Terre serait impossible en raison des effets néfastes de ces rayons – bien qu'ils ne représentent que 8 % du rayonnement solaire – qui peuvent provoquer le cancer de la peau et contribuer au réchauffement climatique.
- En plus de l'ozone, d'autres composants de l'atmosphère tels que l'azote, l'oxygène, la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone et les particules de poussière jouent un rôle important dans la réduction du rayonnement solaire qui atteint la Terre, à travers l'absorption, la diffusion et la réflexion.
- La vapeur d'eau peut absorber une partie des rayons infrarouges et des rayons visibles, en fonction de sa quantité. Sa faible présence dans les couches supérieures de l'atmosphère lui permet d'absorber une quantité limitée de ces rayons, tandis que si sa quantité augmente et qu'elle se présente sous forme de petites particules, en plus d'absorber le rayonnement solaire, elle provoque également une diffusion importante de celui-ci.
- De même, les autres composants de l'atmosphère influencent – mais dans une moindre mesure – les phénomènes d'absorption, de diffusion et de réflexion, comme illustré dans la figure (17). Par exemple, le dioxyde de carbone et l'azote absorbent une petite quantité de rayonnement solaire, tandis que les molécules d'azote et les particules en suspension contribuent à la diffusion et à la réflexion d'une partie du rayonnement solaire.

- On ne peut ignorer le rôle de la masse d'air de l'atmosphère avec ses composants mentionnés précédemment dans ce qui atteint la Terre en termes de rayonnement, car l'absorption, la diffusion et la réflexion du rayonnement solaire dépendent de la longueur du trajet atmosphérique ou de l'épaisseur de l'atmosphère à travers laquelle le rayonnement passe. Ainsi, la diminution de la quantité de rayonnement dans certains endroits à la surface de la Terre ne dépend pas seulement des composants de l'atmosphère, mais aussi de l'altitude de cet endroit par rapport à la surface de la Terre et de l'angle sous lequel le rayonnement atteint cet endroit, car les rayons qui tombent sous un angle sont plus sujets à l'absorption et à la diffusion que les rayons verticaux. Le terme de masse d'air (Air Mass) est utilisé pour mesurer le trajet atmosphérique que les rayons solaires traversent. [34].

6. PRINCIPE DE BASE DE L'ÉNERGIE SOLAIRE.

L'énergie solaire repose sur la conversion du rayonnement solaire en énergie utile, qu'elle soit électrique ou thermique. Voici les principes fondamentaux qui sous-tendent cette technologie :

1. Rayonnement Solaire.
2. Conversion Thermique de l'Énergie Solaire.
3. Conversion Photovoltaïque de l'Énergie Solaire.
4. Stockage et Utilisation de l'Énergie Solaire.

6.1. Rayonnement solaire.

Le rayonnement solaire est l'énergie radiative émise par le soleil dans toutes les directions, une énergie énorme estimée par certains à 170 000 chevaux (soit environ 125 077,5 kilowatts) par mètre carré de surface solaire [35]. Cependant, l'intensité du rayonnement solaire atteignant la surface de la Terre est inférieure à 1367 watts par mètre carré, ce que l'on appelle la constante solaire. Cela s'explique par le fait que l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire (environ 15 %) et le diffuse dans toutes les directions sous forme de rayonnement diffus. L'atmosphère réfléchit également une autre partie du rayonnement solaire vers l'espace (environ 6 %). Par conséquent, le rayonnement total au niveau du sol est défini comme la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus. Le rayonnement solaire atteint son intensité maximale lorsqu'il est perpendiculaire à la surface sur laquelle il tombe. [36]

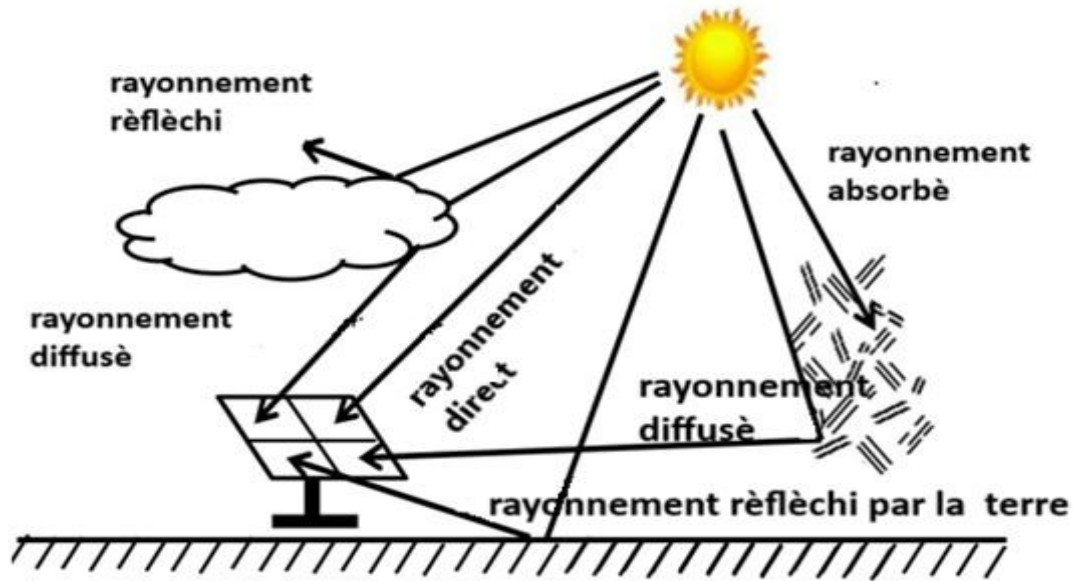


Figure17 . Les types de rayonnement solaire [30]

6.2. Mesure du rayonnement solaire.

Le phénomène de rayonnement solaire ou d'insolation est estimé par la durée du lever du soleil, car il est lié à la durée du jour ainsi qu'à la saison. Les météorologues surveillent les heures de lever et de coucher du soleil. Le décalage horaire entre ces deux instants permet d'estimer la durée du rayonnement ou de l'insolation. Les météorologues ont également recours à la mesure de la durée d'insolation à l'aide d'un dispositif de protection solaire, qui est une boule de verre à l'intérieur de laquelle est placé un papier spécial. La couleur de ce papier change en raison de la concentration de la lumière solaire sur cette boule, car elle devient marron après avoir changé de couleur. Cette partie qui a changé de couleur aide à déterminer la durée du rayonnement. Cet appareil doit être placé à l'écart de tout ce qui pourrait bloquer les rayons du soleil.

La somme des deux composantes du rayonnement solaire direct et diffus peut être mesurée avec un appareil appelé Pyranomètre et en utilisant un parapluie annulaire avec un Pyranomètre pour bloquer le rayonnement direct.

Pyranomètre : Cet appareil sert, comme nous l'avons mentionné plus haut, à mesurer le flux de rayonnement, qu'il soit direct ou diffusé. L'un des avantages de cet appareil est qu'il fonctionne en continu et enregistre sa lecture sur une bande. Ainsi, il est possible de connaître la quantité d'énergie solaire tombant au cours de la journée, du mois et de l'année.

Pyro Héliomètre : Il utilise la mesure solaire et l'énergie solaire incidente. Il se compose de deux surfaces complètement identiques de platine recouvertes de noir, et à l'extrémité de chaque surface se trouve un ensemble de thermocouples pour mesurer sa température.

6.3. Transformation de l'énergie solaire en électricité.

L'énergie solaire peut être exploitée pour produire de l'énergie électrique, qui a pris une grande place au service de l'humanité en raison de ses diverses caractéristiques qui sont entrées dans divers secteurs de production et de services et ont commencé à concurrencer les sources d'énergie fossiles et à les remplacer, [37] Elle est considérée comme une énergie propre qui ne laisse pas de déchets ni de polluants et ne représente pas de danger pour l'environnement. Elle est disponible dans la nature et ne nécessite pas de recherche, d'extraction ou d'explosion pour être obtenue. De plus, elle est capable de fournir une grande quantité d'énergie comparée à ce que les autres sources d'énergie peuvent offrir. [38] Malgré son importance, son bénéfice économique dans le domaine de la production d'énergie électrique est limité par la densité de puissance incidente du rayonnement solaire, qui est de $\sim 1000 \text{ W/m}^2$. Cela signifie qu'elle nécessite des grandes surfaces pour collecter l'énergie et obtenir une quantité économique suffisante pour répondre aux besoins industriels et de services en électricité. [39] De plus, l'absence de continuité dans la disponibilité de l'énergie solaire entraîne des variations dans la quantité de rayonnement solaire au cours d'une même journée, ainsi que d'une saison à une autre. La quantité d'énergie solaire augmente en raison du rayonnement solaire incident pendant la saison estivale et diminue pendant la saison hivernale. De plus, le rayonnement solaire augmente dans les jours clairs et diminue dans les jours nuageux. Par conséquent, lors de la conversion des rayons solaires en énergie électrique, il est nécessaire que le système solaire, qu'il soit fixe ou mobile, soit installé à un angle d'inclinaison spécifique par rapport au plan horizontal de la surface et orienté vers le sud. Parmi les techniques de conversion :

6.3.1. Conversion thermodynamique (méthode indirecte) :

Conversion thermique La technologie moderne repose sur un nombre limité de technologies de conversion d'énergie traditionnelles, dont la plupart sont des machines thermiques. Depuis le début de la révolution industrielle, les technologies énergétiques ont été basées sur l'énergie thermique (Combustibles Synthétiques). [40] La génération thermique est l'une des méthodes les plus utiles, car les centrales thermiques dans la plupart des pays du monde fonctionnent sur la base du cycle de Rankine. Dans ce cycle, un fluide (gaz ou liquide) est utilisé pour fournir de

l'énergie thermique aux cellules en brûlant un type de combustible, comme un dérivé pétrolier. [41] La production d'énergie électrique par conversion thermodynamique de l'énergie solaire ne diffère pas de la production par les méthodes traditionnelles, sauf que le rayonnement solaire est la source principale d'énergie. La différence entre les centrales fonctionnant avec des combustibles et celles fonctionnant à l'énergie solaire réside dans le fait que Le rayonnement solaire remplace le combustible, et des collecteurs solaires sont utilisés à la place des chaudières. [42] Ces technologies convertissent les rayons solaires directs en énergie thermique grâce à des collecteurs et concentrateurs solaires thermiques, en rassemblant et en concentrant l'énergie solaire incidente sur un ensemble de réflecteurs plats. Ces réflecteurs renvoient les rayons solaires vers des tubes longs ou des tours pour collecter la chaleur. Ces réflecteurs ou miroirs, appelés « héliostats », sont alignés les uns par rapport aux autres et concentrent les rayons solaires sur l'échangeur thermique et le récepteur situé au sommet de la tour. Ce récepteur occupe le point focal d'un grand nombre de réflecteurs, produisant ainsi une chaleur élevée qui actionne une turbine à vapeur via un générateur électrique, convertissant l'énergie solaire en énergie électrique plus facilement utilisable et stockable, [43] comme illustré dans la figure (18). Il est possible d'appliquer la technologie des systèmes solaires thermiques dans la zone d'étude en raison de la disponibilité d'un rayonnement solaire suffisant et d'une chaleur adéquate pour chauffer les fluides à l'intérieur des concentrateurs solaires.

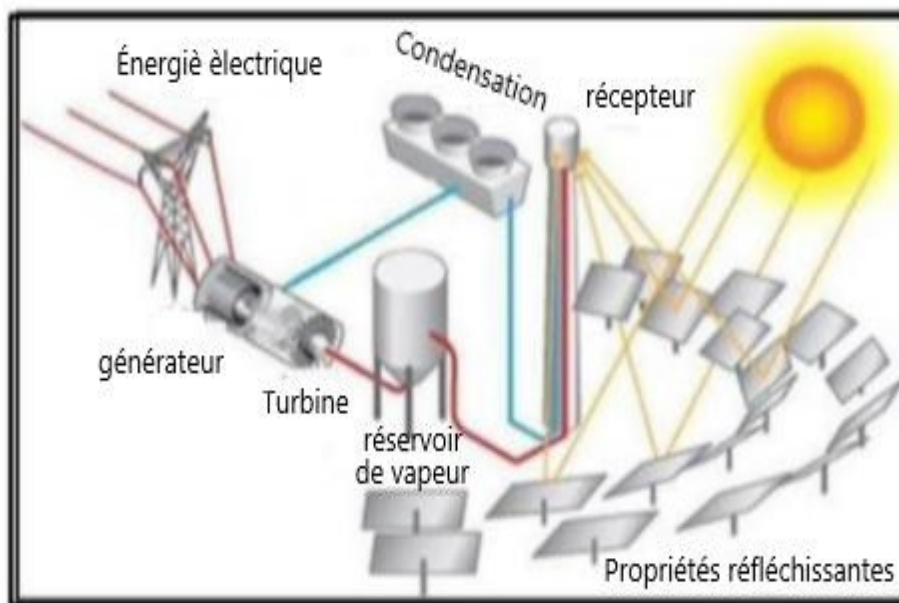


Figure 18. Mécanisme de production d'énergie électrique à l'aide de miroirs solaires (héliostats). [43]

6.3.2. Méthode directe (cellules solaires) :

La technologie des cellules solaires est utilisée pour convertir le rayonnement solaire directement en énergie électrique photovoltaïque. Ce mécanisme de conversion est connu sous le nom de conversion photovoltaïque ou conversion photovoltaïque, [44] et il est considéré comme l'une des meilleures applications d'énergie renouvelable dans le domaine de la production d'électricité, car il se caractérise par des coûts de maintenance et d'exploitations limités et une durée de vie allant jusqu'à (20) (25) ans. [45] Ce sont des impulsions semi-conductrices et optiquement sensibles entourées de deux couverts avant et arrière sont électriquement conducteurs et de nombreux traitements chimiques, physiques et électriques ont été effectués de manière intense et autonome. [46] Les cellules solaires sont constituées de convertisseurs photovoltaïques en silicium traité chimiquement. Elles captent la lumière du soleil tombant sur leur surface, en libérant un électron, et ces électrons libérés circulent dans les fils. Connectées à la cellule, elles produisent de l'énergie électrique. Les cellules solaires sont constituées de panneaux thermiques en verre placés à un angle incliné sur des surfaces pour obtenir la plus grande quantité d'énergie. Elles sont connectées à des fils électriques et à des connecteurs avec des spécifications spéciales pour transmettre le courant [47]. Les cellules solaires sont connectées de deux manières, soit indépendantes, appelées (of-grid), car le système fonctionne jour et nuit en utilisant un certain nombre de dispositifs tels que des dispositifs de régulation de charge qui fonctionnent pour augmenter ou diminuer le courant électrique, à partir duquel le courant va aux batteries qui conservent et stockent l'énergie électrique. Il est ensuite transféré vers des transformateurs spéciaux pour convertir le courant continu en courant alternatif avec lequel fonctionnent la plupart des appareils électriques, comme le montre la figure (19). Quant à la deuxième méthode, elle est appelée (on-grid), la méthode de connexion directe dans laquelle les panneaux solaires produisent de l'énergie électrique pendant la journée uniquement, car les batteries de stockage ne sont pas utilisées pour économiser l'énergie. Et utilisez-le en cas de besoin ou de mauvaises conditions météorologiques. Comme le montre dans la figure (20).

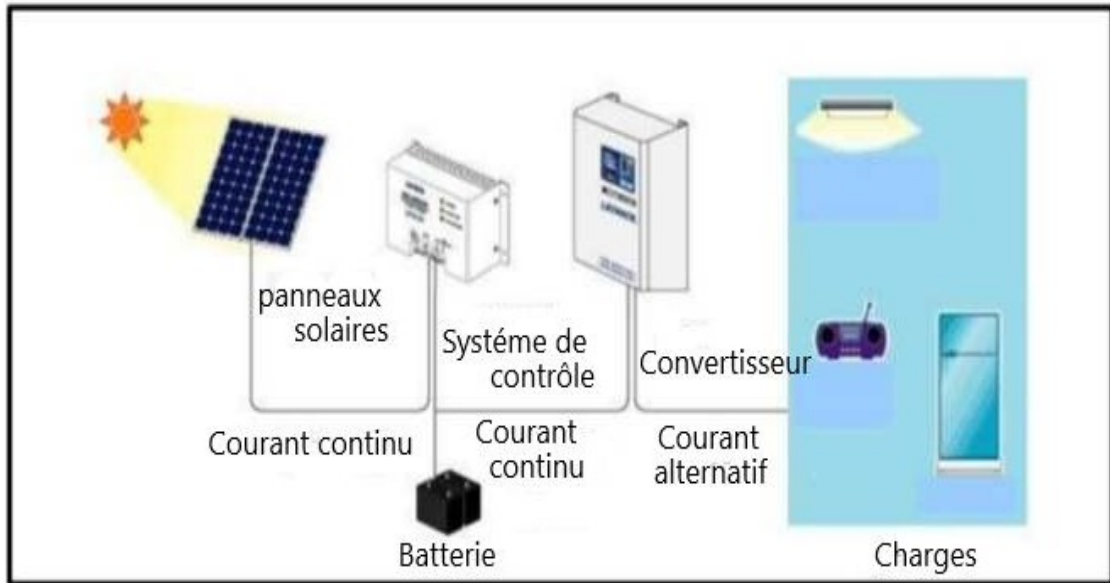


Figure 19. Mécanisme de fonctionnement des cellules solaires (grid-of). [46]

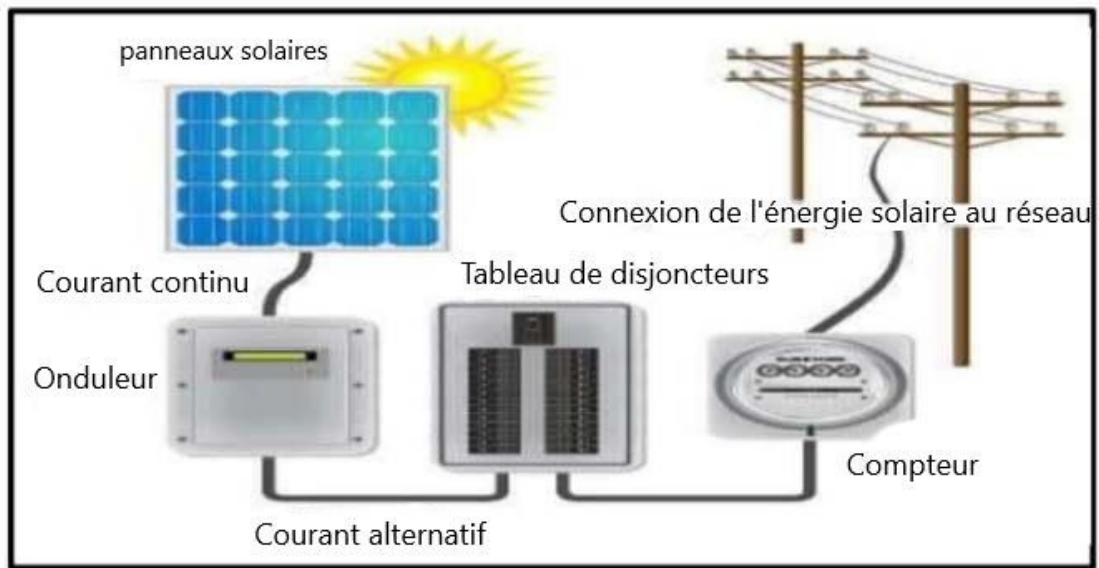


Figure 20. Connexion des cellules solaires en mode de raccordement direct (grid-on). [47]

6.3.3. Types de cellules solaires :

Une cellule photovoltaïque peut être réalisée avec de nombreux semi-conducteurs. En réalité, il existe aujourd'hui trois principales filières technologiques : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques :

a. Silicium.

La filière silicium représente aujourd'hui l'essentiel de la production mondiale des panneaux photovoltaïques. Il s'agit d'un matériau extrêmement abondant, stable et non toxique. Cette filière est elle-même subdivisée en plusieurs technologies distinguant d'une part la nature du silicium employé et/ou sa méthode de fabrication. Le silicium a deux technologies : le silicium monocristallin et le silicium multi cristallin. [48]. [49]

a.1. Silicium monocristallin.

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme (fig. 20), intense et brillant. Elles sont utilisées, mais ne sont pas majoritaires sur le marché de l'énergie photovoltaïque solaire.

Le rendement du silicium monocristallin est le plus élevé, il est compris entre 12 et 20% pour les cellules industrielles. Son coût élevé est aujourd'hui un handicap et le silicium monocristallin perd du terrain devant le silicium multi cristallin.

✓ Avantage :

-Très bon rendement (12 à 20%).

✓ Inconvénients :

-Coût élevé.

-Rendement faible sous un faible éclairement.

a.2. Silicium multi cristallin (Poly cristallin).

Le silicium multi cristallin (Poly cristallin) est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée (fig. 21). À elle seule elle représente près de 50% du marché. Ces cellules sont obtenues par coulage de cristaux de silicium, ce qui rend sa structure hétérogène. Son rendement est légèrement inférieur au silicium monocristallin, il est compris entre 10 et 14% selon les fabricants. En revanche sa fabrication est beaucoup plus simple, les coûts de production sont donc plus faibles

✓ Avantages :

-Bon rendement (11 à 15%), mais cependant moins bon que pour le monocristallin.

-Moins cher que le monocristallin.

✓ Inconvénient :

-Les mêmes que le monocristallin.

b. Cellules solaires amorphes : (Cellules solaires fines)

Ces cellules se caractérisent par leur facilité de fabrication, car le matériau silicone est déposé sous forme de fines couches solides ou de cellules légères sur des surfaces en verre ou en plastique. Elles se caractérisent par leur flexibilité, leur légèreté et leur pliability. Leur efficacité varie de (7 %) à (9 %) et elles produisent une puissance allant jusqu'à (40 watts). Elles sont plus efficaces et coûtent moins cher que les types précédents. [50]



Figure 21. Types de cellules solaires. [50]

7. SYSTEMES UTILISES POUR COLLECTER ET STOCKER L'E S.

L'énergie solaire est l'une des principales sources d'énergie renouvelable, et diverses technologies sont utilisées pour collecter et stocker notamment les collecteurs solaires et les cellules photovoltaïques :

7.1. Collecteur solaire.

Le capteur solaire est connu comme un échangeur de chaleur qui convertit le rayonnement solaire tombant sur sa surface en énergie thermique et le transfère ensuite à l'aide d'un liquide chaud afin de générer des forces mécaniques pour produire de l'énergie électrique.

Des capteurs solaires de différents types sont utilisés, les plus complexes sont utilisés pour générer de l'énergie électrique en grande quantité grâce à la chaleur qui chauffe l'eau afin de générer de la vapeur. Quant aux capteurs solaires les moins complexes, ils sont utilisés pour

produire de l'énergie pour les secteurs résidentiels et commerciaux et pour le chauffage et le refroidissement [51], et peuvent être connectés. Le capteur solaire est directement connecté au système de réseau électrique public (sans réseau) sans nécessiter de stockage d'énergie, ou le complexe est séparé du réseau et est connecté par la méthode hors réseau, qui nécessite des dispositifs de contrôle et des batteries de stockage d'énergie [52].

7.2. Types de capteurs solaires :

7.2.1. Capteurs plans non vitrés à revêtement sélectif.

Ce sont des capteurs simples adaptés aux basses températures et peu sensibles à l'angle d'incidence du rayonnement, ils peuvent être utilisés pour le chauffage des piscines et le chauffage de l'eau chaude sanitaire Cf. figure (22).



Figure 22. Capteurs solaires non vitrés à revêtement sélectif. [53]

7.2.2. Capteurs plans vitrés.

Ce type de capteurs (figure 23) peut être intégré dans l'architecture des bâtiments, ses températures de fonctionnement correspondent aux températures de production de chauffage et d'eau chaude sanitaire lorsque les besoins sont plus importants (hôtellerie par exemple).

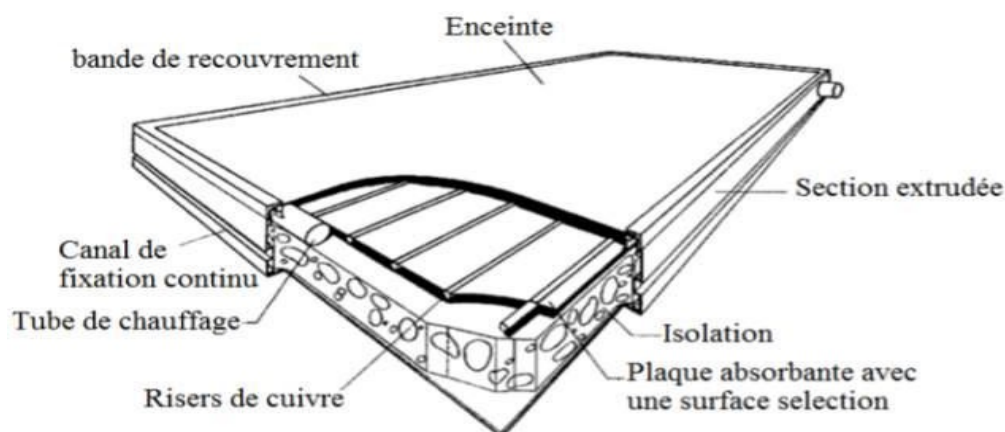


Figure 23. Capteurs plans vitrés. [54]

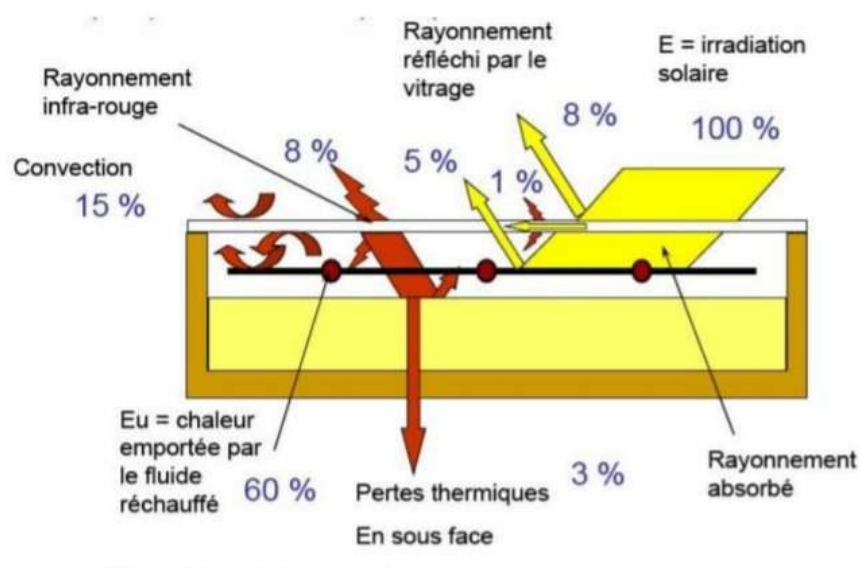


Figure 24. Principe de fonctionnement des capteurs plans vitrés.[53]

7.2.3. Capteurs à tubes sous vide.

Le capteur à tubes sous vide présenté dans la figure (25) et son principe de fonctionnement dans la figure (26), permet de satisfaire aux applications nécessitant des niveaux de températures plus importants. Il est rencontré dans des applications industrielles, mais aussi dans le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire et dans l'habitat individuel et collectif.

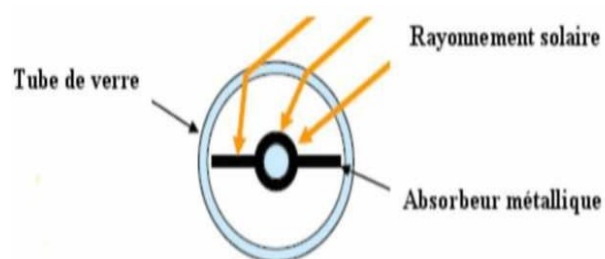


Figure 25. Capteurs à tube sous vide. [53]

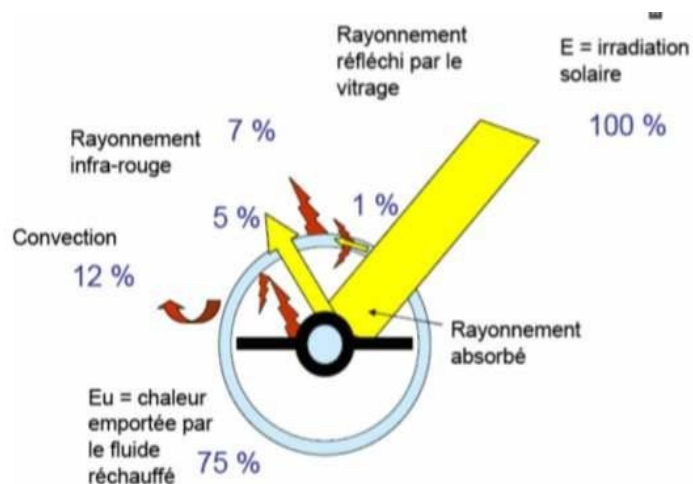


Figure 26. Principe de fonctionnement des capteurs à tubes sous vide. [53]



Figure 27. Capteur solaire à tube thermique.

7.2.4. Capteurs solaires concentrés.

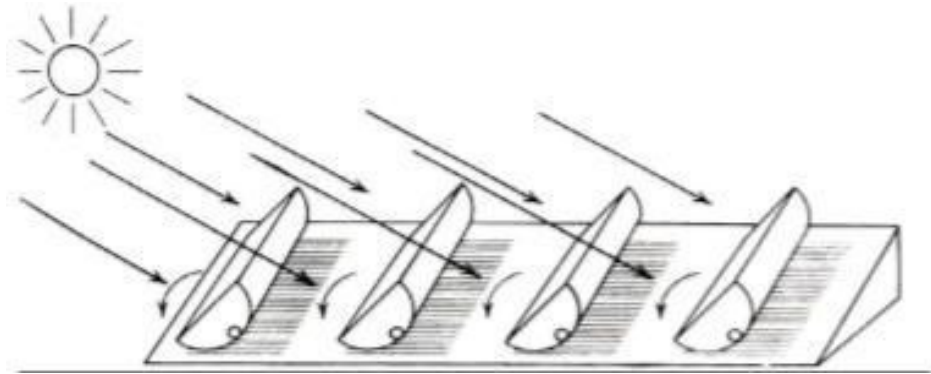


Figure 28. Ensemble de concentrateurs solaires paraboliques.

8. TECHNOLOGIE SOLAIRE POUR LA REFRIGERATION.

La réfrigération est un processus dans lequel la chaleur est transférée d'un espace froid, à basse température, vers un espace relativement chaud, à une température plus élevée. Comme le flux naturel de chaleur se fait toujours d'une région à température élevée vers une région à température plus basse, cela signifie que, dans le processus de réfrigération, une énergie externe doit être fournie, de manière à forcer la chaleur à circuler dans le sens opposé de son flux naturel. Les applications générales de la réfrigération sont la conservation des aliments et la climatisation.

Chapitre 03

Conception d'un réfrigérateur

Statique solaire

Ce chapitre est consacré à l'étude méthodique de la conception d'un réfrigérateur fonctionnant à l'énergie solaire. Il comprend l'identification des besoins et des exigences techniques, le choix des composants essentiels, ainsi que l'analyse thermique et le dimensionnement du système. L'étude se termine par un cas pratique illustrant l'application concrète de cette solution de réfrigération. L'objectif principal de cette conception est de proposer un système de réfrigération écologique, économe en énergie et adapté aux zones isolées ou rurales, où l'accès à l'électricité conventionnelle est limité.

1. TRANSFERT DE CHALEUR.

On appelle un transfert de chaleur, un échange thermique entre deux corps (solide ou fluide). Par exemple : Deux corps ayant la même température sont dits en (équilibre thermique). Si leur température est différente, le corps le plus chaud cède de l'énergie au corps le plus froid : il y a un transfert thermique. [57]

1.1. Modes de transfert de chaleur :

Il y a trois modes de transfert thermique principaux :

- Conduction.
- Convection.
- Rayonnement (radiation).

1.1.1. Conduction :

C'est un processus physique de transmission de la chaleur qui s'appuie sur un milieu matériel (solide, liquide, gaz), sans mouvement de matière, et qui fait passer la chaleur des zones chaudes aux zones froides à l'aide de mécanismes à l'échelle microscopique (vibration atomique ou moléculaire). La conduction est le seul mécanisme qui permet à la chaleur d'être transmise au sein d'un solide.

1.1.2. Convection

C'est un processus physique de transmission de la chaleur qui s'appuie sur un milieu matériel avec mouvement de matière on ne peut donc avoir de convection que dans les liquides et les gaz.

2. ISOLATION THERMIQUE ET SES CARACTERISTIQUES

✓ Isolation thermique :

L'isolation thermique joue un rôle essentiel dans l'amélioration des performances du réfrigérateur solaire en réduisant les pertes de froid et en maintenant une température intérieure stable, même dans des conditions climatiques extrêmes. À cet effet, des matériaux isolants performants tels que le polyuréthane rigide (PUR) ou le polystyrène expansé (EPS) sont utilisés en raison de leurs excellentes propriétés thermiques.

- **Polystyrène expansé (EPS) :** Il est léger, peu coûteux et facile à mettre en œuvre. Sa conductivité thermique est d'environ $0,035 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, ce qui le rend adapté aux applications

à basse température. Cependant, il est sensible à l'humidité et aux températures élevées, ce qui peut limiter son efficacité en milieu extérieur ou en cas de protection insuffisante.

- **Polyuréthane rigide (PUR) :** Il offre une conductivité thermique faible pouvant atteindre $0,022 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, assurant ainsi une isolation thermique de haute performance. Il présente également une bonne résistance à l'humidité et une densité relativement faible. Toutefois, son coût est plus élevé que celui de l'EPS.

L'isolation thermique est une « barrière pour le transfert de chaleur ». Elle vise à conserver la température (le froid) à l'intérieur des chambres (freezer ou bien le réfrigérateur) d'autre part elle empêche la pénétration de la chaleur externe. Une bonne isolation diminue donc les apports dus à la transmission de chaleur et l'ensoleillement, pour réaliser cette bonne isolation il faut tenir compte des caractéristiques thermique et physique de l'isolant suivant :

- Conductivité thermique très faible.
- Masse volumique faible.
- Bonne résistance mécanique et chimique.
- Non Toxique.
- Ininflammable.
- Inodore.
- Volume constant.
- Léger.
- Etanche à la vapeur d'eau.
- Disponible en Algérie.
- Moins chère.

Compte tenu de la nature du fonctionnement du réfrigérateur solaire, basé sur l'utilisation de cellules photovoltaïques, et de la nécessité de réduire au maximum la consommation d'énergie, il est impératif d'utiliser un matériau présentant une faible conductivité thermique et une haute résistance aux conditions climatiques. Ainsi, le polyuréthane rigide (PUR) a été choisi

comme l'isolant le plus adapté à cette application, en raison de ses performances thermiques élevées et de sa fiabilité dans différents environnements climatiques, contribuant ainsi à améliorer le rendement énergétique du réfrigérateur solaire et à garantir son bon fonctionnement. [62]

3. SPECIFICATIONS DE REFRIGERATEUR SOLAIRE

3.1. Données de Base.

3.1.1. Données Géométriques.

Ces données concernent les dimensions prévues pour un réfrigérateur statique solaire à concevoir :

a. Volume utile : V (litre).

Freezer	Refrigerateur
80	220

Tableau 3. Volume utile de chaque compartiment.

b. Dimensions internes :

Le réfrigérateur est constitué de deux compartiments :

- Un compartiment positif pour la réfrigération (conservation).
- Un compartiment négatif pour la congélation (freezer).

Compartiment	Hauteur (mm)	Largeur (mm)	Profondeur (mm)
Réfrigérateur	1050	540	580
Congélateur	450	540	580

Tableau 4. Dimensions du réfrigérateur

c. Circuit fluide d'un réfrigérateur statique :

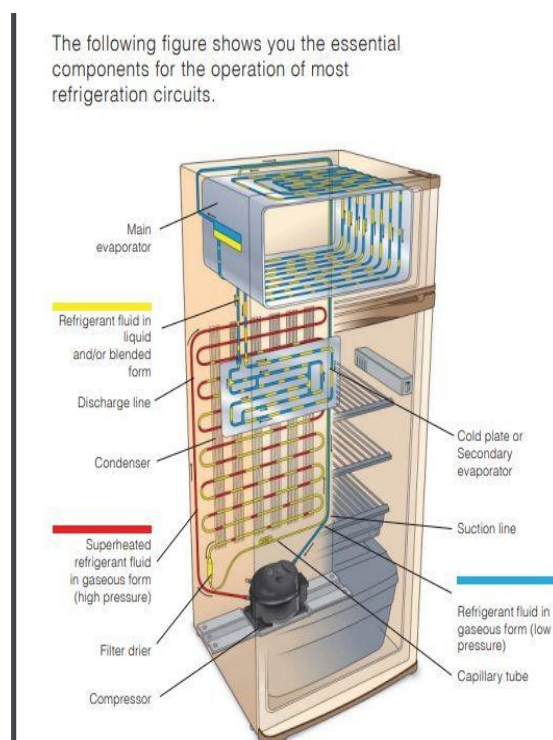


Figure 29. Composants principaux du réfrigérateur et le mécanisme de fonctionnement.

3.1.2. Données thermique :

a. Conditions intérieures d'entreposage :

Ces conditions sont tirées à partir de la **Norme EN 62552** européenne, et sont nécessaires pour le calcul du bilan thermique d'un réfrigérateur

Conditions intérieures d'entreposage [56]	
Compartiment	Température (°C)
Réfrigérateur	4
freezer	-18

Tableau 5. Températures de stockage.

b. Conditions extérieures d'entreposage : Conditions d'essai.

Ce sont des conditions d'essai imposées par la norme européenne EN 62552 et subdivisées en trois catégories

- Température extérieure $T_{ext} = 43^{\circ}\text{C}$: pour déterminer le cycle de réfrigération
- Température extérieure $T_{ext} = 32^{\circ}\text{C}$: pour déterminer les caractéristiques du compresseur
- Température extérieure $T_{ext} = 25^{\circ}\text{C}$: pour déterminer la classe Énergétique

4. CHOIX DES DIFFÉRENTES PAROIS**4.1. Portes (Ref ou Frz).**

N°	Matériaux	Épaisseur (m)	Conductivité thermique λ (W/m ⁰ K)	Résistance thermique (m ² .K/W)
01	Acier	0.0005	50	0.0001
02	Plastique	0.001	0.2256	0.00443

Tableau 6. Caractéristiques thermiques des matériaux dans les portes

4.2. Murs extérieures (Latérale et Arrière).

N°	Matériaux	Épaisseur (m)	Conductivité thermique λ (W/m ⁰ K)	Résistance thermique (m ² .K/W)
01	Acier	0.0005	50	0.0001
02	Plastique	0.001	0.2256	0.00443
03	Serpentin	0.0008	386	2.072×10^{-6}

Tableau 7. Caractéristiques thermiques des matériaux (Mur extérieur et plafond).

5. ÉLÉMENTS ET COMPOSANTS D'UN RÉFRIGÉRATEUR SOLAIRE :**5.1. Composants principaux du réfrigérateur solaire :**

Le réfrigérateur solaire est constitué de plusieurs éléments fondamentaux qui coopèrent pour produire et maintenir le froid à partir de l'énergie solaire. Ces composants sont décrits comme suit :

✓ Capteur solaire (photovoltaïque):

Dans un système utilisant l'énergie solaire photovoltaïque, un panneau photovoltaïque est utilisé pour convertir l'énergie solaire en électricité. Cette électricité alimente un compresseur électrique fonctionnant dans un cycle de compression pour assurer le refroidissement [59].

✓ Système de stockage d'énergie:

Pour garantir la continuité de fonctionnement durant la nuit ou lors des jours nuageux, un système de stockage d'énergie électrique est intégré. Il repose généralement sur des batteries rechargeables [60].

✓ Circuit frigorifique:

Le circuit frigorifique comprend un évaporateur, un condenseur et un compresseur (alimenté par l'électricité produite par les panneaux photovoltaïques). Ce circuit permet le transfert de chaleur nécessaire à la génération du froid [61].

6. BILAN THERMIQUE ET DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME :

Le bilan thermique est nécessaire aux calculs d'une installation frigorifique. Cette installation doit être prévue pour conserver des denrées ou autres produits dans de bonnes conditions de stockage, température, hygrométrie, ventilation.

Le bilan thermique permet de déterminer les apports thermiques journaliers. Il faut, afin d'effectuer les calculs, obtenir les éléments nécessaires.

Les charges thermiques d'une chambre froide se répartissent en deux catégories :

- ✓ Les charges thermiques externes.
- ✓ Les charges thermiques internes.

6.1. Données de base de calcul :

- ✓ La température maximale à l'extérieur.
- ✓ Les températures intérieures réfrigérateur.
- ✓ Les dimensions d'un réfrigérateur.
- ✓ L'épaisseur de l'isolation.

6.2. Charges thermiques externes :

Les charges thermiques externes comprennent :

6.2.1. Charges thermiques par transmission à travers les parois (Q_{tr}) :

Le calcul s'effectue paroi par paroi à savoir les quatre parois verticales puis le plancher haut (toiture) et enfin le plancher bas.

La charge thermique par transmission a pour valeur :

$$Q_{tr} = K * S * \Delta T \quad (8)$$

Q_{tr} : charge thermique par transmission à travers les parois

(W). S : surface de la paroi considérée (m²).

ΔT : différence de température entre les deux côtés de la paroi considérée (°C).

K : coefficient de transmission thermique global de la paroi considérée (w/m².k).

Avec :

$$K = 1 / (Re + Ri + \sum_{i=1}^n (e/\lambda) + (eis/iso)) \quad (9)$$

- Ri : Résistance thermique superficielle interne en (m² °C/w). Sa valeur varie en fonction de l'intensité de mouvements d'air à l'intérieur du compartiment.
- Re : Résistance thermique superficielle externe en (m² °C/w)
- $\sum_{i=1}^n 1 / (e/\lambda)$: Somme des résistances thermique des différentes couches de matériaux constituant la paroi en (W/m.°c). Chaque couche de matériaux est caractérisée par son épaisseur ©. (m) et par son coefficient de conduction thermique (λ). (W/m.°c).
- (eis/iso) résistance thermique de la couche d'isolation

6.2.2. Charge thermique à travers les joints.

C'est la quantité de chaleur qui entre dans le réfrigérateur à travers les joints d'étanchéité du ou des portes. Ce phénomène est dû à l'imperfection de l'isolation, aux pertes thermiques par conduction, ou à des joints usés ou mal ajustés. Cette charge thermique contribue à l'augmentation de la consommation énergétique de l'appareil.

$$Q_{T \text{ joint}} = Q_{tr \text{ joint}} (\text{comp Frz}) + Q_{tr \text{ joint}} (\text{comp Ref}) \quad (10)$$

6.3. Charges thermiques internes :

Ce sont les quantités de chaleur générées ou présentes à l'intérieur du réfrigérateur dues à des sources internes, telles que :

- La chaleur produite par les composants électriques (comme l'ampoule).
- La chaleur des aliments ou des liquides placés à l'intérieur lors de leur introduction.
- Toute chaleur résultant du mouvement de l'air à l'intérieur ou de l'ouverture de la porte.

6.4. Charge totale de l'application.

C'est la somme de toutes les charges thermiques que le système de réfrigération doit compenser pour maintenir la température intérieure souhaitée.

$$Q_{tr} = Q_{pr} + Q_{\text{joint}} \quad (11)$$

6.5. Caractéristique du compresseur.

6.5.1. Calcul de débit du fluide.

C'est la quantité de fluide frigorigène (gaz de refroidissement) qui circule dans le circuit de réfrigération pendant un certain temps. Il est généralement exprimé en litres par seconde (L/s) ou en grammes par seconde (g/s). Ce débit permet d'assurer un bon transfert de froid et une performance optimale de la réfrigération. Et donné par la formule suivante :

$$m = \frac{Q_T}{\Delta h_{ev}} \quad (12)$$

6.5.2. Calcul le volume aspiré. (V_{asp})

C'est le volume d'air que le système de ventilation ou de refroidissement du réfrigérateur fait circuler ou aspire à l'intérieur de l'appareil pour assurer une répartition uniforme du froid. Ce volume contribue à l'efficacité du refroidissement et au maintien d'une température homogène dans tous les compartiments. Et se calcule selon la relation suivante :

$$V_{asp} = m * V'_1 \quad (13)$$

V'_1 : Volume spécifique de réfrigération.

6.5.3. Calcul de rendement volumique du compresseur. (η_v)

C'est le rapport entre le volume réel de gaz réfrigérant aspiré par le compresseur et le volume théorique qu'il devrait aspirer. Un bon rendement volumique signifie que le compresseur fonctionne efficacement et assure une bonne circulation du fluide frigorigène, ce qui améliore les performances de refroidissement.

Calculé selon la relation suivante :

$$\eta_v = 1 - (0,05 * \tau_{Cp}) \quad (14)$$

τ_{Cp} : taux de compression.

$$\tau_{Cp} = H_p / B_p \quad (15)$$

BP : basse pression absolue.

HP : haute pression absolue.

6.5.4. Calcul de volume balayé. (V_b)

C'est le volume total de gaz que le piston du compresseur déplace à chaque cycle de compression. Il dépend de la taille du cylindre et de la course du piston. Ce volume donne une idée de la capacité du compresseur à déplacer le fluide frigorigène et à assurer un bon refroidissement. Calculé selon la relation suivante :

$$V_b = V_{asp} / \eta_v \quad (16)$$

6.5.5. Calcul du cylindré de compresseur.

$$C = V_b / (60 * N * 10^{-6}) \quad (17)$$

N : Nombre de tours du piston de compresseur

7. CLASSE ENERGETIQUE :

Il s'agit d'une mesure utilisée pour évaluer l'efficacité énergétique d'un réfrigérateur domestique. Elle est généralement exprimée par une lettre ou un symbole (comme A, B, C...), où la classe A ou A++ indique une très haute efficacité énergétique (faible consommation d'électricité), tandis que les classes inférieures comme E ou F indiquent une efficacité moindre (consommation plus élevée). Ce classement vise à aider le consommateur à choisir des appareils économes en énergie et respectueux de l'environnement.

« Par exemple, si vous regardez le corps extérieur du réfrigérateur ou l'emballage, vous trouverez une image similaire à celle-ci.

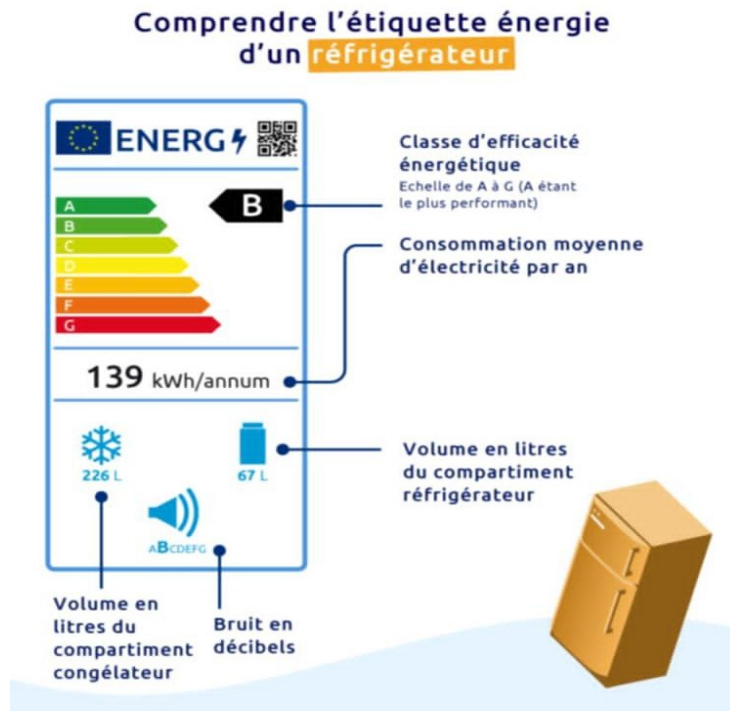


Figure 30. Étiquette énergétique d'un réfrigérateur et ses indications principales

7.1. Volume équivalent.

C'est un volume théorique utilisé pour représenter l'effet thermique ou dynamique d'un certain espace ou d'un composant du système (comme le compresseur, l'évaporateur ou le circuit). Il permet de simplifier les calculs en traitant des volumes complexes comme s'ils étaient des volumes simples mais équivalents. Par exemple, on peut utiliser un volume équivalent pour modéliser les effets d'un flux d'air ou d'un échange thermique dans un compartiment.

Il se calcul selon la formule suivante :

$$V_{eq} = (\sum V_c * ((25 - T_c) / 20) * FF) * CC * BI \quad (18)$$

V_c : le volume utile (REF).

$(25-T_c)/20$: F. thermodynamique

FF : Facteur de forme.

Cc : Pouvoir de réfrigérateur.

BI : Bonus d'isolation.

7.2. Consommation annuelle d'énergie standard (CES) :

Il s'agit d'une estimation de la quantité d'énergie électrique consommée par le réfrigérateur pendant une année complète de fonctionnement, basée sur des tests effectués dans des conditions standard de température et de fréquence d'ouverture de la porte. Cet indicateur permet de comparer l'efficacité énergétique entre différents modèles est donnée par la relation suivante :

$$CES = V_{eq} * M + N + CH \quad (19)$$

Où :

CES : Consommation annuelle d'énergie standard (CES) en kWh/an

V_{eq} : Volume équivalent.

M : Valeurs de M, elles dépendent de la catégorie du réfrigérateur.

N : Nombre de jours ou facteur d'utilisation.

CH : Dépend du volume de la chambre de congélation (Schiller).

7.3. Consommation annuelle d'énergie réelle (CEA) en kWh/an :

C'est la quantité réelle d'électricité consommée par un réfrigérateur sur une année entière, mesurée en kilowattheures (kWh). Ce chiffre dépend de :

- ✓ **L'utilisation réelle** (nombre d'ouvertures, température ambiante, quantité d'aliments stockés).

- ✓ **L'efficacité de l'appareil** (présence d'une étiquette énergétique comme A++(classe énergétique) ou des technologies de refroidissement modernes).
- ✓ **Les conditions d'utilisation** (comme l'accumulation de glace, l'âge de l'appareil, son entretien).

Calculée selon la relation suivante :

$$CEa = P_{cp} * 24 * 365 / 1000 \quad (20)$$

Où :

CEa : Consommation annuelle d'énergie réelle en (kWh/an).

P_{cp} : Puissance du compresseur de l'installation (Watt).

$$P_{cp} = Q_t / COP \quad (21)$$

Où :

Q_t : charge totale de l'application(W).

COP : Coefficient de performance de l'installation.

7.4. Indice d'efficacité énergétique (α_i) :

C'est une mesure qui indique la consommation électrique d'un appareil (comme un réfrigérateur ou un climatiseur) par rapport à ses performances. Plus l'indice est élevé, plus l'appareil est efficace et moins il consomme d'énergie, ce qui signifie des économies sur la facture d'électricité. Exemple illustratif : Les appareils classés (A++) selon « l'indice d'efficacité énergétique » consomment 50 % d'énergie en moins que les appareils classés B.

L'équation suivante nous a permis de calculer l'indice d'efficacité :

$$\alpha_i = CEA / CES * 100 \quad (22)$$

α_i : indice d'efficacité énergétique (%).

8. DIMENSIONNEMENT DU CIRCUIT FLUIDIQUE.

Pour le bon fonctionnement du système de réfrigération il faut que le parcours du fréon à l'intérieur du chaque compartiment du réfrigérateur, notamment, les longueurs d'évaporateur

et du condenseur doivent être bien dimensionnées, à cet effet la démarche du calcul qui nous a permis de dimensionner le cycle frigorigène passe par ces étapes :

- 1- Tirer toutes les données thermo-physiques du fréon utilisé (R600a) nécessaire pour le calcul
- 2- Déterminer les températures de deux cotés (Fréon – Air)
- 3- Calcul de la somme de toutes résistances
- 4- Calcul de la Surface d'échange traversée par le flux de chaleur absorbé
- 5- Calcul les longueurs de chaque échangeur

Application du calcul:

1- Données thermo-physiques:

Selon les tableaux thermodynamiques du Gaz utilisé –R600a. Nous avons:

Grandeur	valeur	47aten
Viscosité du R600a - état vapeur	6,188E-06	kg/m s
Viscosité du R600a - état liquide	0,00027914	kg/m s
Densité du R600a – état vapeur	19,9	kg/m ³
Densité du R600a – état liquide	611,5	kg/m ³
Chaleur spécifique état vapeur	1,4548	kJ/kg °C
Chaleur spécifique état liquide	2,1458	Kj/kg °C
Conductivité thermique état vapeur	0,011746	w/m°C
Conductivité thermique état liquide	0,10996	w/m°C
Chaleur latente	300	kJ/kg
Gravité	9,81	m ² /s
Diamètre extérieur	0,0065	m
Diamètre intérieur	0,005	m

Tableau 8 : tableau thermodynamiques du Gaz R600a

2- Températures de deux cotés (Fréon – Air)

- La température coté Air représente la température intérieure du compartiment de Freezer $T_{int} = -18^{\circ}\text{C}$.
- La température coté fluide c'est la température d'évaporation du fréon $T_{ev} = -24^{\circ}\text{C}$.

3- *Calcul de la somme de toutes résistances.*

$$R_T = 1 / [(r_1 * h_{air}) + (\ln(r_2/r_1) / \lambda) + (1/(r_2 * h_{fréon}))]. \quad (23)$$

r_1, r_2 : Rayons extérieur et intérieur de tube respectivement.

$$h_{air} = 1,24(\Delta T / D_{int})^{1/3} \text{ (formule Expérimentale d'après la société KINT)} \quad (24)$$

h_{air} : Coefficient superficiel intérieure de l'air.

D_{int} : Diamètre intérieure du tube.

ΔT : Ecart de temperature. (°C)

$h_{fréon}$: Coefficient superficiel coté fréon est donné par le formule suivante.

$$H_{fréon} = 0.555 * [g * \rho_l * (\rho_l - \rho_g) * \lambda_l^3 * (\frac{1}{\mu_l}) * \Delta T_{int} * D_{int}]^{1/4} \quad (25)$$

ρ_l, ρ_g : Densité du fréon phase liquide et gaz.

g : Gravité.

μ_l : Viscosité du fréon phase liquid.

λ_l : Conductivité thermique du fréon phase liquid.

4- *Surface d'échange traversée par le flux de chaleur absorbé.*

$$S = Q / (U * \Delta T_{int}) \quad (26)$$

5- *Longueurs de chaque échangeur.*

$$S = \pi * (\frac{D}{2}) * L \quad (27)$$

Chapitre 04

Etude et analyse d'un réfrigérateur statique solaire

Ce chapitre a pour objectif de présenter une étude analytique approfondie des performances du réfrigérateur solaire à travers l'exploitation des différentes valeurs et données techniques liées à son fonctionnement. Cette étape s'inscrit dans la continuité des parties théoriques précédentes, en passant de l'aspect conceptuel à une approche plus pratique axée sur l'évaluation de l'efficacité du système étudié.

L'étude comprend l'analyse des paramètres de fonctionnement tels que les températures, les pressions, les énergies consommées et récupérées, ainsi que le rendement des différents composants. Des outils de calcul et d'ingénierie seront utilisés pour estimer les performances du système dans diverses conditions de fonctionnement, permettant ainsi une compréhension plus approfondie de son comportement et l'identification de ses points forts et faibles.

Cette analyse permettra de formuler des recommandations pratiques visant à améliorer la conception, optimiser l'efficacité du refroidissement et assurer la durabilité du fonctionnement en s'appuyant sur l'énergie solaire comme source propre et renouvelable.

1.DIMENSIONS DU CYCLE DE LA REFRIGERATION :**➤ Données générales :**

Conductivité thermique de la mousse polyuréthane (λ w/m°C)	0.022
Résistance superficielle extérieure de l'air R_e ($m^2 \text{ } ^\circ\text{C} / w$)	0.12
Résistance superficielle intérieure de l'air R_i ($m^2 \text{ } ^\circ\text{C}/w$)	0.03
Conductivité thermique du polystyrenne $\lambda/m^\circ\text{C}$)	0.029

Tableau 9 : Propriétés thermiques et résistances superficielles des matériaux.

Matériaux	Epaisseur(m)	Conductivité thermique (w/m°C)
Acier	0.0005	50
Aluminium	0.00015	237
Plastique	0.001	0.2256
Serpentin	0.0008	386

Tableau 10 : Caractéristiques des matériaux utilisés dans le réfrigérateur.

➤ Calcul réalisé à température extérieure $T = 43 \text{ } ^\circ\text{C}$ **1.1. Charges thermiques externes :****1.1.1. Charge thermique par transmission à travers les parois :**

$$Q_{tr} = K * S * \Delta T$$

a .Calcul du coefficient d'échange global K pour la paroi :

$$K = 1 / (1/h_i + \Sigma (e/\lambda) + 1/h_e)$$

a.1. Calcul de la résistance totale :

$$R_T = \Sigma R_I$$

R_I : Résistance thermique d'une couche de la paroi, exprimée par : Epaisseur /la conductivité thermique $\rightarrow e/\lambda$

Matériaux	R_I
Acier	0.00001
Aluminium	6.329×10^{-7}
Plastique	0.0044326
Serpentin	2.073×10^{-6}

Tableau 11 : Résistance thermique de chaque couche de la paroi

$$R_T = \text{Acier} + \text{Aluminium} + \text{Plastique} + \text{Serpentin} = 0,00444326$$

$$R_T = 0.00001 + 6.329 \times 10^{-7} + 0.0044326 + 2.073 \times 10^{-6} \quad \longrightarrow \quad R_T = 0,00444326 \text{ (m}^2 \text{ }^\circ\text{C/w)}$$

Après le calcul de R_T , nous pouvons maintenant calculer la valeur de k , que nous avons le résumé dans le tableau suivant :

Compartiment de la Congélation	$1/(0.12+0.03+0.0044+(70*0,001/0.022))$	$K=0.281$
Compartiment de la Réfrigération	$1/(0.12+0.03+0.0044+(45*0,001/0.022))$	$K= 0.507$
Entre- parties	$1/(0.12+0.03+0.0044+(81*0,001/0.022))$	$K= 0.255$
Porte Freezer	$1/(0.12+0.03+0.0044+(70*0,001/0.022))$	$K= 0.281$
Porte Refrigeration	$1/(0.12+0.03+0.0044 +(45*0,001/0.022))$	$K= 0.507$

Tableau 12 : Coefficient de la performance

b . Calcul des surfaces d'échange.

$$S = \sum S_i$$

Surface des parois. (Freezer)	$(((((540-(2*70)))*(450-70))+2*((580-100)-(2*70)))*(450-70))+(540-(2*70))*((580-100)-(2*70)))/1000000$	$S=0,546$
Surface de la porte. (Freezer)	$((((450-2*90)-(2*10))*((540-(2*90))-(2*10)))/1000000$	$S=0,085$
Surface des parois latérales. (Réfrigérateur)	$2*((((580-(45*2))*((960-204.7)-(2*45)))+((204.7-45)*(242-45))+(((208.1-160-45)*(204.7-45))))/1000000$	$S=0,716$
Surface de parois arrière	$((540-2*45)*(1500-(450+81+45+242)))/1000000$	$S=0,368$
Surface de plancher. / Str1	$((540-(2*45))*(580-(208.1+(2*45)))/1000000)$	$S=0,126$
Surface du réfrigérateur. Str2 / Compresseur	$((580-(2*45)) * (160+204.7))/1000000$	$S=0,178$
Surface de la porte du réfrigérateur.	$((960-2*10)*(540-2*10))/1000000$	$S=0,4888$
Surface entre partie	$((540-(2*70))*(580-(2*70)))/1000000$	$S=0,176$

Surface Freezer		Surface réfrigérateur				entre partie	
Surf/ Comp-Frz	Surf/ port Frz	Sur/ ref Laterale	Sur/ ref Arriere	Surface Terre	Surface (partie de compresseur)	Surface Porte Ref	surface Ent / partie
0.546	0.085	0.716	0.307	0.127	0.179	0.489	0.176

Tableau13 : Surfaces d'échange.

c. Calcul des écarts de température.

		$\Delta T (^{\circ}C)$
Text- Tint Frz	43 – (-18)	61
Text –T int Ref	(43-4)+15	54
Text - Tint Ref	43-4	39
Tint Ref – Tint Frz	4-(-18)	22
T ext – T int Frz	43-(-18)	61
T ext – Tint Ref	43-4	39
T Cp –Tint Frz	90-4	86

Tableau 14 : Ecart de la température.

d. Calcul des apports thermiques.

Apport thermique à travers les parois de Freezer Qtr1	$(0,281) \times (0,546 \times (43 + 18))$	8,727
Apport thermique à travers les parois latérales de Ref Qtr2	$(0,665) \times (0,409) \times ((43-4) + 15)$	14,582
Apport thermique à travers la paroi arrière de Ref Qtr2	$(0,289) \times (0,409) \times (43-4)$	4,607
Apport thermique à travers les parois d'entre partie Qtr3	$(0,159) \times (0,339) \times (4-(-18))$	1,192
Apport thermique à travers la porte Frz	$(0,085) \times (0,305) \times (43-(-18))$	1,581
Apport thermique à travers la porte Ref	$(0,488) \times (0,409) \times (43-4)$	7,793
Apport T01	$(0,1126) \times (0,409) \times (43-4)$	1,795
Apport T02	$(0,172) \times (0,409) \times (90-4)$	6,026
Apports totale Qat	$Q_{tr} = \Sigma Q_{tri}$	46,303

Tableau 15 : Apports thermiques totale.

1.1.2. Charge thermique à travers les joints. (Q_T joint)

$$Q_T \text{ joint} = Q_{tr \text{ Joint Compartment Freezer}} + Q_{tr \text{ Joint Compartment Réfrigérateur}}$$

1.1.2.1. Calcul Charge thermique à travers les joints. (Compartment Freezer)

$$Q_{tr \text{ Joint Compartment Freezer}} = K * S * \Delta T$$

a. Calcul du coefficient K.

$$K = 1 / (\text{Résistance superficielle extérieure de l'air (Re)} + \text{Résistance superficielle intérieure de l'air (Ri)} + \text{Résistance de joint})$$

a.1. Calcul de la Résistance de joint.

Résistance de joint = Epaisseur / lambda

Résistance de joint = 0,0004 / 0,07

Résistance = 0,006 (w/m²k)

AN:

$$K = 1 / (0.12 + 0.03 + 0,006)$$

$$K = 6,422 \text{ (m}^2\text{k/w)}.$$

b. Calcul de la surface Totale.

$$\text{Surface Totale} = (\text{Hauteur} * \text{Profondeur}) * 2 + (\text{largeur} * \text{Profondeur}) * 2$$

$$\text{Surface Totale} = (0.38 * 0.0115) * 2 + (0.52 * 0.0115) * 2$$

$$\text{Surface Totale} = 0,0207$$

c. Calcul du ΔT.

$$\Delta T = T_{\text{ext}} - T_{\text{int FZ}}$$

$$\Delta T = 43 - (-18)$$

$$\Delta T = 61 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

AN:

$$Q_{\text{tr Joint Compartment Freezer}} = 6,422 * 0,0207 * 61$$

$$Q_{\text{tr Joint Compartment Freezer}} = 8,109 \text{ (w)}$$

1.1.2.2. Calcul Charge thermique à travers les joints. (Compartment Réfrigérateur)

$$Q_{\text{tr Joint Compartment Réfrigérateur}} = K * S * \Delta T$$

a. Calcul du coefficient K

$$K = 1 / (\text{Résistance superficielle extérieure de l'air (Re)} + \text{Résistance superficielle intérieure de l'air (Ri)} + \text{Résistance de joint})$$

a.1. Calcul de la Résistance de joint.

$$\text{Résistance} = \text{Epaisseur de joint} / \lambda$$

$$\text{Résistance de joint} = 0,0004 / 0,07$$

$$\text{Résistance de joint} = 0,0057 \text{ (m}^2\cdot\text{k/w)}.$$

AN:

$$K = 1 / (0,12 + 0,03 + 0,0057)$$

$$K = 6,422 \text{ (w/m}^2\text{k)}.$$

b. Calcul de la surface Totale.

$$\text{Surface Totale} = (\text{Hauteur} * \text{profondeur}) * 2 + (\text{largeur} * \text{profondeur}) * 2$$

$$\text{Surface Totale} = (0,94 * 0,0115) * 2 + (0,52 * 0,0115) * 2$$

$$\text{Surface Totale} = 0,03358 \text{ m}^2$$

c. Calcul du ΔT .

$$\Delta T = T_{\text{ext}} - T_{\text{int Ref}}$$

$$\Delta T = 43 - 4$$

$$\Delta T = 39$$

AN:

$$Q_{\text{tr Joint / Compartiment REF}}$$

$$Q_{\text{tr Joint / Compartiment REF}} = 6,422 * 0,0336 * 39$$

$$Q_{\text{tr Joint / Compartiment REF}} = 8,410 \text{ (w)}$$

AN:

$$Q_{T_{\text{joint}}} = 8,109 + 8,410$$

$$Q_{T_{\text{joint}}} = 16,519 \text{ (w)}$$

1.2. Charges thermiques internes : Ces charges sont négligeables

1.3. Charge totale de l'application. (QT)

$$Q_T = (Q_{tr} + Q_{joint})$$

$$Q_T = (Q_{tr} + Q_{joint}) * 1,2$$

$$Q_T = (48,135 + 16,303) * 1,2$$

$$Q_T = 77,327 \text{ (w)}$$

2. CARACTERISTIQUES DU COMPRESSEUR.

➤ Calcul réalise à température extérieure $T_{ext} = 32^\circ\text{C}$

2.1. Calcul de débit du fluide (m)

$$m = \frac{Q_T}{\Delta h_{ev}}$$

➤ Traçage du cycle fluidique

Données nécessaire pour tracer le cycle frigorigène sur le diagramme enthalpique

- ✓ Température d'évaporation : $T_{ev} = T_{int} - \Delta T = -18 - 6$; $T_{ev} = -24^\circ\text{C}$
- ✓ Température de condensation: $T_{cd} = T_{ext} + \Delta T = 32 + 7$; $T_{cd} = 39^\circ\text{C}$
- ✓ Ecart de la surchauffe : $\Delta T_{sch} = T_1 - T_7 = -15 - (-21)$; $\Delta T_{sch} = 6^\circ\text{C}$
- ✓ Température de la vapeur surchauffée à l'aspiration de compresseur $T_{1'} = 20^\circ\text{C}$ (Mesure expérimentale)
- ✓ Ecart de sous-refroidissement : $\Delta T_{srf} = T_4 - T_5 = 39 - 32 = 7$; $\Delta T_{srf} = 7^\circ\text{C}$

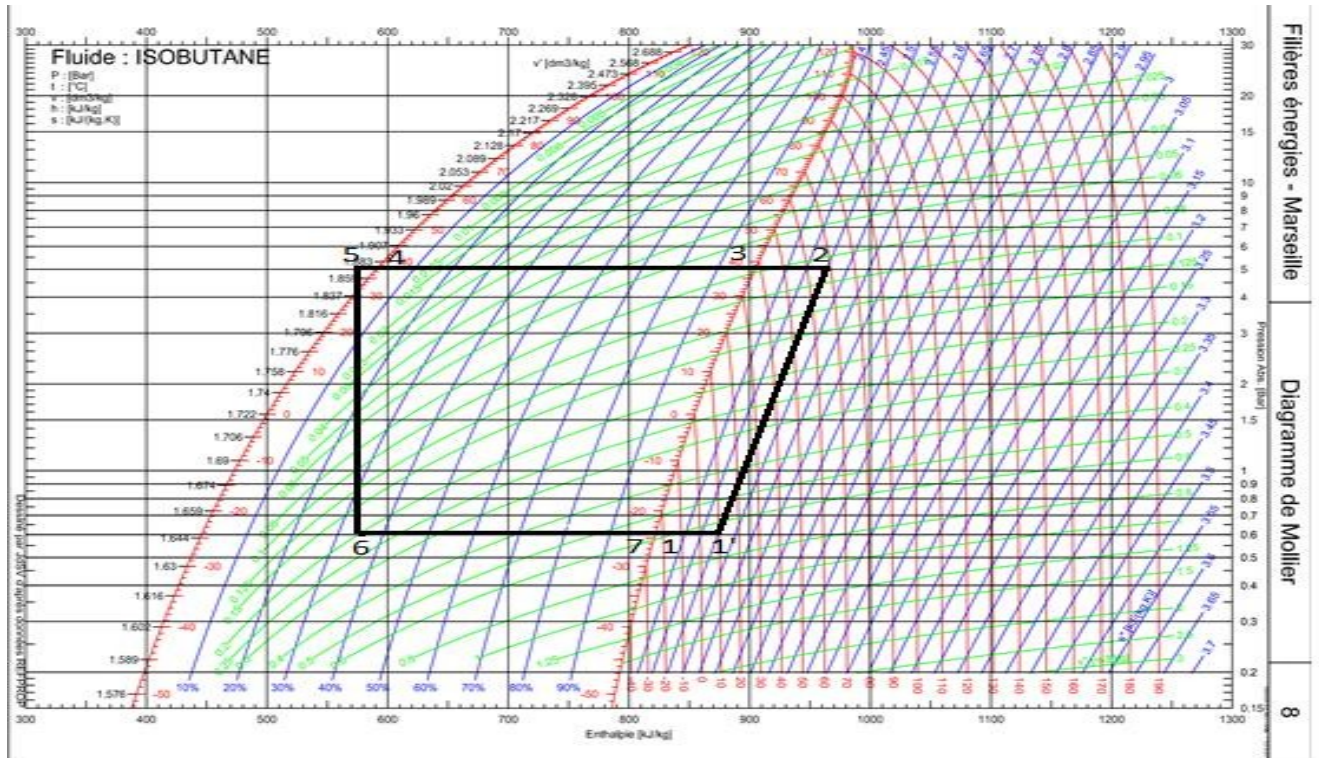


Figure 31. Diagramme frigorifique d'un fluide R600a.

- Chaleur absorbée par l'évaporateur Δh_{ev} .

Les valeurs d'enthalpies sont tirées à partir du diagramme de R600a

$$Q_{ev} = m \cdot \Delta h_{ev}$$

$$\Delta h_{ev} = h_1 - h_6 = 880 - 580$$

$$\Delta h_{ev} = 300 \text{ (Kj /Kg)}$$

- Débit massique circulant dans l'installation

$$m = 3600 \cdot (55,727 / 300)$$

$$m = 668,727 \text{ (kg/h)}$$

Δh (kJ/Kg)	QT (w)	m (kg/h)
300	55,727	668,727

Tableau 16 : Calcul de débit du fluide

2.2. Calcul le volume aspiré. (V_{asp})

$$V_{asp} = m \cdot V'_1$$

$$V'_1 = 1.8 \cdot 10^{-3} \text{ (m}^3/\text{kg)} \text{ (Volume spécifique de R600a), (Diagramme Enthalpique)}$$

$$V_{asp} = 668,727 * 0.0018$$

$$V_{asp} = 1,204 \text{ (m}^3\text{/h)}$$

V'1 (m ³ /kg)	m (kg/h)	V _{asp} (m ³)
0.0018	668,727	1,204

Tableau 17 : volume aspiré par le compresseur.

2.2. Calcul le rendement volumique du compresseur. (η_v)

$$\eta_v = 1 - (0,05 * \tau_{Cp})$$

➤ Calcul le taux de compression.

Bp et Hp : Tirés à partir du cycle frigorifique.

$$T_{Cp} = \frac{P_{HP}}{P_{BP}} = \frac{5.2}{0.6} = 8.666$$

AN:

$$\eta_v = 1 - (0,05 * \tau_{Cp})$$

$$\eta_v = 1 - (0,05 * 8.66) = 0,567 = 57\%$$

Température [°C]	Pression [bar]	Enthalpie [kJ/kg]	τ_{Cp}	η_v %
-24	0,610	146,60	8.666	57
39	5.2	293.74		

Tableau 18 : Rendement volumique du compresseur.

2.4. Calcul le volume balayé. (V_b)

$$V_b = V_{asp} / \eta_v$$

$$V_b = 1,204 / 0,567$$

$$V_b = 2,124 \text{ (m}^3\text{/h)}$$

V _{asp} (m ³)	η_v	V _b (m ³)
1,204	0,567	2,124

Tableau 19. Volume balayé.

2.5. Calcul du cylindré de compresseur C

$$C = V_b / 60 * N * 10^{-6}$$

N : nombre de tour de piston du compresseur N= 3000 (tr/min)

$$C = 2,124 / 60 * 3000 * 10^{-6}$$

$$C = 11,801 \text{ (cm}^3\text{)}$$

N (tr/min)	V _b (m ³)	C (cm ³)
3000	2,124	11.801

Tableau 20 : Cylindré de compresseur.

➤ Choix de compresseur (d'après le catalogue de *WAMBOA ACC ITALIA*)

HTH11AJ	ZEL
COP	1,6
C	12
CC	182

Tableau 21 : model de compresseur

3. CLASSE ENERGETIQUE.

➤ Le calcul realise a temperature exterieure $T = 25^{\circ}\text{C}$

3.1. Calcul du volume équivalent. (Veq)

$$V_{eq} = (\sum V_c * ((25 - T_c) / 20) * FF) * CC * BI$$

$$V_{eq} = (\sum V_c * ((25 - T_c) / 20) * 1) * 1.2 * 1 = 408.6 \text{ (litre)}$$

Facteurs de correction.				
F-Thermody	F	C	B	
1	1	1,2	1	228
1.35	1	1,2	1	0
2.15	1	1,2	1	180.6
Veq : Volume total ajusté. (litre)				408.6

Tableau 22. Volume équivalent.

3.2. Calcul de la consommation annuelle d'énergie standard. (CEs)

$$CEs = V_{eq} * M + N + CH$$

$$CEs = 408.6 * 0.777 + 303 + 50 = 670,482 \text{ (Kwh/an)}$$

Catégorie	6	Réfrigérateur- congélateur	CEs
M	0,777	Valeurs de M et N dépendent de la catégorie de	670,48
N	303	réfrigérateur	
CH	50	depend du volume de schiller	

Tableau 23. Consommation annuelle d'énergie standard.

3.3. Calcul de la consommation annuelle d'énergie réelle. (CEa)

$$CEa = P_{cp} * 24 * 365 / 1000$$

3.3.1. Calcul de la puissance du compresseur. (P_{cp})

$$P_{cp} = QT / COP$$

$$P_{cp} = 42,766 / 1,6$$

$$P_{cp} = 26,729 \text{ (w)}$$

AN:

$$CEa = 26,729 * 24 * 365 / 1000$$

$$CEa = 234,144 \text{ (Kwh/an)}$$

1.4.4. Indice d'efficacité énergétique. (Iα%)

$$I\alpha = (CEa / CEs) * 100$$

$$I\alpha = (234,144 / 670,482) * 100 = 33,606 \text{ (%)}$$

$$A+ = 34,922$$

Classe énergétique	A+
--------------------	----

Classe Energétique

A++	A+	A	B	C	D
27.....33	33...42	42...55	55...75	75...95	95...110

Tableau 24 : Classification énergétique d'un réfrigérateur

4. CAPTEUR.

Après avoir terminé l'étude et l'analyse de l'ensemble des calculs relatifs au réfrigérateur, et déterminé la puissance électrique fournie par le compresseur, nous sommes orientés vers la recherche des différents types de panneaux solaires disponibles, afin de choisir finalement le type le plus adapté, capable d'alimenter et de faire fonctionner le réfrigérateur avec efficacité et fiabilité, et Nous avons choisi un modèle de panneau solaire portant le nom de **Sunmodule Plus SW 245 Mono.**"

Le Sunmodule Plus SW 245 Mono est un panneau solaire de type monocristallin, conçu par l'entreprise allemande SolarWorld Industries GmbH. Il se distingue par une qualité de fabrication élevée et une excellente performance aussi bien en conditions de faible qu'en forte irradiation solaire, ce qui en fait un choix fiable pour les applications solaires résidentielles et commerciales.

4.1. Caractéristiques techniques de base :

D'après la norme EN 50380

Caractéristiques	Valeur
Type	Monocristallin
Puissance maximale Pmax (W)	245,168
Rendement	14.6%
Courant du point de puissance maximum- Impp(A)	7,96
Tension du circuit ouvert-Vco(V)	37,7
Courant du court- circuit – Isc(A)	8,25
Poids (kg)	21,2
Dimension (mm)	31×1001×1675
Type de verre	Verre trempé à haute transmission lumineuse
Type de cadre	Cadre en Aluminium anodisé
Garantie de fabrication	10 ans
Garantie de performance	25 ans (avec une dégradation annuelle $\leq 0,7\%$)
Nombre de cellules	60 cellules monocristallines (156 × 156 (mm))

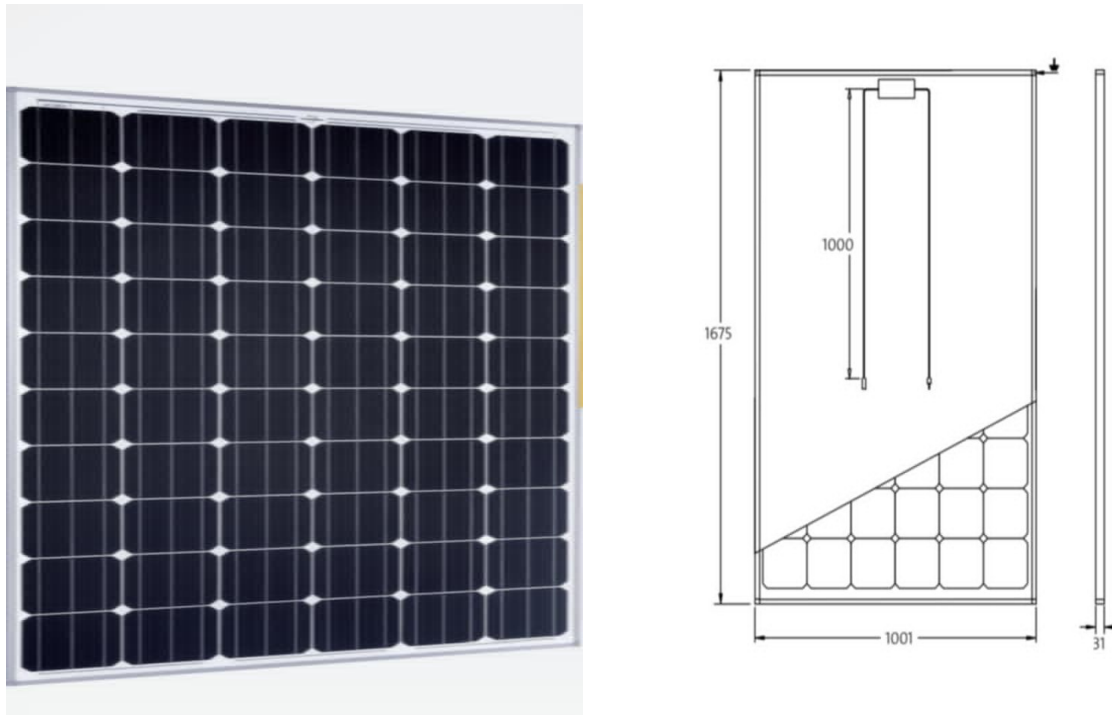


Figure 32. Plan de conception d'un panneau solaire avec les détails des dimensions.

Le Sunmodule Plus SW 245 Mono constitue un choix fiable et efficace pour les projets d'énergie solaire, car il combine des performances élevées et une fiabilité à long terme, ce qui le rend adapté à l'alimentation des réfrigérateurs et à divers appareils électriques dans les zones isolées ou les réseaux solaires domestiques.

Conclusion Générale

Conclusion Générale :

Ce mémoire a porté sur l'étude et la conception d'un réfrigérateur statique fonctionnant à l'énergie solaire, en réponse aux besoins croissants de solutions de réfrigération écologiques, économiques et adaptées aux zones isolées. À travers une analyse approfondie des principes de base de la réfrigération, des technologies solaires disponibles, et de la conception d'un prototype, nous avons démontré la faisabilité d'une telle solution et mis en lumière ses avantages potentiels.

Les performances du prototype conçu ont été évaluées en laboratoire, en tenant compte de divers paramètres techniques. Les résultats obtenus confirment que l'intégration de l'énergie solaire dans les systèmes de réfrigération est non seulement possible, mais prometteuse sur les plans économique, énergétique et environnemental.

Cependant, malgré leurs nombreux avantages, les réfrigérateurs solaires doivent surmonter plusieurs défis afin de garantir leur efficacité et leur durabilité. Parmi ces défis figurent :

L'efficacité de conversion de l'énergie solaire : les performances des réfrigérateurs solaires dépendent directement du rendement des panneaux photovoltaïques, lequel peut être affecté par divers facteurs, tels que l'accumulation de poussière, l'angle d'incidence du rayonnement solaire et les températures élevées.

Le stockage de l'énergie : l'intermittence du rayonnement solaire nécessite l'utilisation de systèmes de stockage efficaces, notamment des batteries solaires, dont le coût et la durée de vie restent des enjeux majeurs.

Le coût initial élevé : bien que les réfrigérateurs solaires permettent des économies d'énergie à long terme, le prix d'acquisition et d'installation des panneaux solaires et des batteries constitue un frein à leur adoption généralisée.

Les conditions climatiques : les performances des panneaux photovoltaïques peuvent être altérées par des phénomènes météorologiques défavorables, tels que les journées nuageuses ou les tempêtes de sable.

La durabilité des composants : les panneaux solaires et les batteries nécessitent un entretien régulier et ont une durée de vie limitée par rapport aux équipements électriques traditionnels.

Afin de relever ces défis et d'optimiser les performances des réfrigérateurs solaires, plusieurs pistes d'amélioration peuvent être envisagées :

L'optimisation des technologies de stockage d'énergie, notamment à travers le développement de batteries à plus grande capacité et à durée de vie prolongée, comme les batteries au lithium de dernière génération.

L'intégration de systèmes de stockage thermique avancés, utilisant des matériaux à haute capacité calorifique pour prolonger l'autonomie des réfrigérateurs en l'absence de rayonnement solaire.

L'amélioration des performances des panneaux photovoltaïques, en exploitant de nouvelles générations de cellules solaires plus efficaces et plus résistantes aux variations climatiques.

Le développement de matériaux isolants innovants, afin de réduire les pertes thermiques et d'optimiser la consommation énergétique des réfrigérateurs.

En somme, cette étude ouvre la voie à des recherches plus poussées sur l'amélioration des technologies solaires appliquées à la réfrigération. Elle constitue une base solide pour le développement de systèmes autonomes, durables et adaptés aux réalités énergétiques des régions en développement. Les perspectives futures devraient se concentrer sur l'accessibilité économique, la robustesse des composants, et la démocratisation de ces technologies auprès des populations les plus vulnérables.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

- [1] K S M Sahari, M F Abdul Jalal, R Z Homod and Y K Eng, (2013) “Dynamic indoor thermal comfort model identification based on neural computing PMV index” conference series: earth and environmental science, IOP, 16 (2013) 012113.
- [2] Faye C. McQuiston, Jerald D. Parker, Heating, Ventilating and Air conditioning. analysis and design-2nd édition-John Wiley and Sons, (1982).
- [4] Vighetti Stéphane, Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion, Thèse de doctorat, Université Grenoble, Institut polytechnique de Grenoble, 2010.
- [5] Loïc Bailly, Cellules photovoltaïques organiques souples à grande surface, Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 2010.
- [6]-Sarbu I, Sebarchievici C, Revue des systèmes de réfrigération et de climatisation solaires. Energy and Buildings, 67 (2013), 286-297.
- [7] Ullah K. R, Saidur R, Ping H. W, Akikur R. K, N. H. Shuvo, Une revue des méthodes de réfrigération et de refroidissement solaire thermique. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 24 (2013), 499-513.
- [8] Hassan H, Mohamad A. A, Une revue sur la production de froid solaire par la technologie d’absorption. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16 (2012), 5331-5348
- [9] Aphornratana S, Étude théorique et expérimentale d’un réfrigérateur combiné à éjecteur-absorption. Département de génie mécanique et des procédés, Université de Sheffield, 1994.
- [10] M. Lawson, R. Lithgow, G. Vliet, Analyse du cycle de refroidissement à absorption à double effet eau-bromure de lithium. ASHRAE Transactions, 88 (1982), 811-823.
- [11] Srihirin P, Aphornratana S, Chungpaibulpatana S, Une revue des technologies de réfrigération par absorption. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 5 (2001), 343-372.
- [12] Manuel ASHRAE, Systèmes CVC et équipements, Société américaine des ingénieurs en chauffage, réfrigération et climatisation, Atlanta, 2012.
- [13] Zohar A., Jelinek M., Levy A., Borde I., L’influence de la configuration du cycle de réfrigération à absorption-diffusion sur la performance. Applied Thermal Engineering 27 (2007) 2213-9
- [14] g. Uril .scish, Thermoelectric Effect peltier and Thomson, vol. 2, 2020, pp. 1-60.

- [15] C.Ngo, H. Ngo, Introduction à la physique des semi-conducteurs, 2ième cycle école d'ingénieurs , Dunod .
- [16] J. mid, Introduction Thermoelectricity, 1-12 ed., vol. 1, Berline, 2009.
- [17] J. m. George.Nolas, Thermoelectric basic principles and new materials development, 1, Ed., USE: Springer, 2001 .
- [18] D. Enesa, Thermoelectric Energy Harvesting basic principles and applicationes, 2, Ed., intech open, 2018, pp. 1-19.
- [19] Julien Roudaut. Modélisation et conception de systèmes de réfrigération magnétique autour de la température ambiante. Autre. Université de Grenoble, 2011.
- [20] Mohamed Balli, Cyril Mahmed, David Duc, Petri Nikkola, Osmann Sari Haute Ecole Spécialisée de Suisse Occidentale (HES-SO) Avenue des sports 20, Yverdon-Les-Bains, Suisse.
- [21]A bdelkader BENRABAH, Etude Energétique d'un Réfrigérateur Magnétique, Ecole Nationale Polytechnique, (Septembre 2007).
- [22] D. LEDUCQ, Froid et Environnement, Cemagref , 2009.
- [23] G. VRINAT, production de froid , exemples de calcul de machines ,techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique ,2010.
- [24] Dick Wirz, « Commercial Refrigeration for Air Conditioning Technicians »,2eme Edition,2010
- [25] W. Maake, H.-J. Eckert, J-L. Cauchepin, « Le Pohlmann - Manuel technique du froid », PYC Livres.
- [27]- STEPHAN. K, KRAUSS.R, Regulated CFCs and theiralternatives, In-Meunier F, editor. Proceedings-Solid Refrigeration Symposium. Ministe're de la Rechercheet de L'Espace, Paris, (1992), 32–43.
- [28] PRIDASAWAS, W. " Solar-Driven Refrigeration Systems with Focus on the Ejector Cycle, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, KTH, Denmark, 2006.
- [29] LI. M, SUN, C.J., WANG, R.Z., CAI, W.D. Development of no valve solar ice maker, Thermal Engineering 24, China, 2004, 865–872.
- [30] Abed Al-Aziz City For Science And Technology, "Solar Energy", Science and Technology, Vol. 24,(9/1995) P. 5.
- [31] Cherif Omar, Utilisations des énergies renouvelables et leur rôle dans le développement local durable - Étude de cas de l'énergie solaire en Algérie, Thèse de doctorat, Faculté des

sciences économiques et de gestion, Département des sciences économiques, Université Hadj Lakhdar Batna, Algérie, 2007.

[32] Hamoudi Ali Naji, « Étude, mise en œuvre et amélioration des performances d'une station de pompage d'eau alimentée à l'énergie solaire », mémoire de maîtrise en génie mécanique, Université de Tishreen, Syrie, 2009.

[33] Al-Ati Mukhtar, Contribution à l'amélioration d'un séchoir solaire pour les cultures agricoles, Mémoire de Master, Université de Ouargla, 2011.

[34] Mohamed Raafat Ismail Ramadan Ali Jomaat Al-Shekel, « Les énergies renouvelables », 1^{re} édition, Beyrouth, Faculté des sciences, Dar Al-Shorouk, 1986, p.3

[35] Saoud Youssef Ayach, « Technologie des énergies alternatives », Conseil national de la culture et des sciences, Koweït, 1990.

[36] Adel Rashid Hassan Al-Dulaimi, Electrical Energy in Anbar Governorate, mémoire de maîtrise (non publié), College of Arts, University of Baghdad 1997, p. 47.

[37] Ali Ahmed Haroun, Géographie et ressources énergétiques, première édition, Dar Al Fikr Al Arabi, Égypte, 2007.

[38] Meisel et Butler, Solar Energy, traduit par Asim Abdul Karim, Azouz, Dar Al-Kutub pour l'impression et la publication, Université de Mossoul, 1982, p. 259.

[39] Edward S. Cassidy et Peters Gosman, traduit par Sabah Al-Damlaji, Introduction aux ressources énergétiques, à la technologie et à la société, première édition, Organisation arabe pour la traduction, Beyrouth, 2011, p. 73.

[40] Mikhail Abdul Ahad L'énergie solaire, l'arme du futur, Al-Alam Wal-Hayat Magazine, numéro 30, Bagdad, 1973, p. 29.

[41] Saad Ibrahim Al-Jawrani, Technologie de l'énergie solaire, Direction générale des affaires culturelles, Bagdad, 1995, p. 33.

[42] Muhammad Raafat Ismail, Ramadan Ali Jumaan Al-Shakil, Énergies renouvelables, première édition, Dar Al-Shorouk, Le Caire 1986, p. 62.

[43] Ali Mohammed Abdullah, Énergies renouvelables (Énergie thermique - Énergie éolienne - Énergie solaire), Agence Foundation Presse arabe, Égypte, 2018, p. 41.

[44]- Agence centrale pour la mobilisation publique et les statistiques, Étude sur l'avenir de l'énergie en Égypte, référence n° 1(3341-80), 2015, p. 14.

[45] Ali Abdul Abbas Al-Bakri Walid Khalid Al-Jubouri, Moyens de soutenir le réseau électrique national en améliorant l'efficacité des cellules solaires et en trouvant des débouchés

pratiques pour leur application en Irak, Karbala University Scientific Journal, numéro trois, volume huit, p. 166.

[46] Sayed Ashour Ahmed, Énergies renouvelables et alternatives et perspectives de leur utilisation dans le monde arabe, source précédente, p. 107 ; 108.

[47] Vighetti Stéphane, Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion, Thèse de doctorat, Université Grenoble, Institut polytechnique de Grenoble, 2010.

[48] Loïc Bailly, Cellules photovoltaïques organiques souples à grande surface, Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 2010.

[50] Omar Muhammad Ahmed, Abdullah Jamal Abdullah, système de chauffage solaire de l'eau à usage industriel, tous travaux d'ingénierie Université soudanaise des sciences et technologies, 2015, page,11.

[51] Kamelia Yusuf Muhammad, Technology of Solar Concentrator Plants, publié par le Comité des énergies renouvelables et de la protection de l'environnement. (Jcee), Égypte, 2018, page,72.

[52] ABABSA D. Optimisation du rendement d'un capteur solaire par minimisation des pertes convectives. Mémoire de magistère en Physique Energétique, Université de Batna, Algérie, 2010.

[53] KALOGIROU S. A. Solar thermal collectors and applications. Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 30, N° 3, pp. 231-295, 2004

[54] Faye C. McQuiston, Jerald D. Parker, Chauffage, ventilation et climatisation, analyse et conception - 2e édition - John Wiley and Sons, (1982).

[55] Document Technique Métrologique , Période estival, Zone de Médéa 2012/2013.

[56] Transfert Thermique, Y Jannot (2002).

[57] Technique de l'ingénieur (génie climatique-j.coran).

[58] Ben Salah, M. (2019). Applications des énergies renouvelables dans la réfrigération. Revue des Energies Renouvelables, 22(3), 357–364.

[59] Zahraoui, M., et al. (2020). Stockage d'énergie pour les systèmes photovoltaïques autonomes. Journal of Energy Storage, 28, 101235.

[60] Chekirou, W. (2018). Cycle frigorifique et intégration solaire. Mémoire de Master, Université de Constantine.

- [61] P. Hollmuller, A. Lachal, "Techniques d'isolation thermique : matériaux et performances", Revue de l'énergie, n° 572, 2005.
- [62] M. LALLEMAND, Froid industriel, INSA Lyon, 1980.513.
- [63] Mohamed H.B. Abdul Jalil, "Simulation of Performance of Air Conditioning System", Faculty of Mechanical Engineering University Malaysia Pahang, 2012.
- [64] Otanicar T, Taylor R.A, Phelan P.E, " Prospects for solar cooling-an economic and environmental assessment ", Solar Energy 86 (2012) 1287-1299.
- [65] Ullah K. R, Saidur R, Ping H. W, Akikur R. K, N. H. Shuvo, A review of solar thermal refrigeration and cooling methods. Renewable and Sustainable Energy Reviews 24 (2013) 499-

