

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département de Génie mécanique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Génie mécanique

Spécialité : Energétique

Par

➤ **TOUAMA Oussama**

➤ **MAADADI Hichem**

Intitulé

Technique d'installation d'un système de climatisation dans un site isolé utilisant l'énergie photovoltaïque

Soutenu le : 17/12/2025

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>Mr. Rouabeh Zahir</i>	<i>Pr</i>	<i>Président</i>	<i>Université Mohamed El bachir El Ibrahimi B.B.A</i>
<i>Mr. Saidani Lyamine</i>	<i>MCB</i>	<i>Encadrent</i>	<i>Université Mohamed El bachir El Ibrahimi B.B.A</i>
<i>Mr. Zaidie Lyazide</i>	<i>MCB</i>	<i>Encadrent</i>	<i>Université Mohamed El bachir El Ibrahimi B.B.A</i>
<i>Mr. Belfagass Bilal</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Université Mohamed El bachir El Ibrahimi B.B.A</i>

Année Universitaire 2024/2025

Remerciements

Tout d'abord nous remercions le Dieu, notre créateur de nous avoir donné le courage et la volonté pour terminer ce travail.

*Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude à notre encadreur Monsieur **Dr: Saidani Lyamine** et **Dr: Zaidi Lyazid**, pour son aide précieuse, sa confiance, ses encouragements, sa patience et son soutien favorable pour l'aboutissement de ce travail.*

Nous sommes très heureux d'avoir pu travailler avec ces messieurs, pour leurs nombreux conseils liés à la climatisation, à la bonne approche du travail et à la mise en œuvre précise des données.

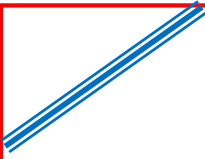
*Nous remercions également beaucoup Mr : **Kouadria Samir** et **Dr : zitouni kamel**, qui nous a aidés dans les calculs et qui n'a pas manqué du tout.*

Nous remercions nos honorables professeurs qui nous ont accompagnés tout au long de l'année et ne nous ont pas lésinés

Nous remercions les enseignants qui se sont intéressés à la révision du travail présenté dans ce mémoire.

Nous remercions également tous les membres du jury pour passer en revue notre travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à ceux qui ont contribué à la Préparation de ce mémoire



Dédicaces

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et ma reconnaissance. Sans votre amour inconditionnel, votre soutien indéfectible et vos encouragements constants, je n'aurais pas pu accomplir mes études universitaires avec autant de succès.

Cher père, tu as été mon modèle, mon guide et ma source d'inspiration. Tu as travaillé dur pour subvenir à nos besoins et tu as toujours cru en moi. Je suis si reconnaissant pour tous les sacrifices que tu as faits pour moi. Merci d'avoir toujours été là pour moi.

Chère mère, ta tendresse, ta bienveillance et ton amour infini m'ont donné la force et la confiance nécessaires pour poursuivre mes rêves. Tu as été ma meilleure amie et ma confidente, et je ne saurais jamais assez te remercier pour tout ce que tu as fait pour moi.

Chères sœurs, vos encouragements constants et votre soutien inébranlable ont été essentiels pour mon parcours universitaire. Vous avez toujours cru en moi et m'avez poussé à donner le meilleur de moi-même. Je vous suis extrêmement reconnaissant pour cela.

Et à toute ma famille, merci pour votre soutien constant tout au long de mon parcours universitaire. Vos encouragements, vos prières et votre amour m'ont donné la force de persévérer dans les moments difficiles. Je suis extrêmement reconnaissant d'avoir une famille aussi merveilleuse.



Nomenclature

Nomenclature

Symbole	Signification	Unité
Q	Puissance de chauffage fournie par une chaufferie	W
K	Coefficient de transmission surfacique	W/m ² .°C
K_{vn}	Coeff. de transmission surfacique du vitrage nu	W/m ² .°C
h_i	Coeff. intérieur d'échanges superficiels	W/m ² .°C
h_e	Coeff. extérieur d'échanges superficiels	W/m ² .°C
t_{bi}	Température intérieure de base	°C
t_{be}	Température extérieure de base	°C
R	Résistance thermique – cas général	m ² .°C/W
r, r'	Résistance thermique d'une couche d'isolant	m ² .°C/W
r_s	Résistance additionnelle – pertes aux liaisons	m ² .°C/W
λ	Conductivité thermique	W/m.°C
λ_e	Conductivité thermique équivalente	W/m.°C
c	Capacité thermique massique	J/kg.°C
kl	Coeff. linéique – pertes aux liaisons	W/m.°C
ks	Coeff. linéique – pertes au niveau du sol	W/m.°C
z	Différence de niveau – pertes au sol	m
Tau	Coefficient de réduction de température	–
N	Taux horaire de renouvellement d'air	h ⁻¹
V_h	Volume habitable du local ou hors œuvre	m ³
Q_v	Débit spécifique de ventilation	m ³ /h
Q_s	Débit supplémentaire dû au vent	m ³ /h
Q_{vréf}	Débit de ventilation extrait de référence	m ³ /h
Q_{vmin}	Débit de ventilation extrait minimal	m ³ /h
Q_{vmax}	Débit de ventilation extrait maximal	m ³ /h
P_p	Perméabilité à l'air d'une paroi sous 1 Pa	m ³ /h
P_o	Perméabilité à l'air d'un ouvrant sous 1 Pa	m ³ /h.m ²
P_V	Perméabilité à l'air d'un volume sous 1 Pa	m ³ /h
P_L	Perméabilité à l'air d'un logement sous 1 Pa	m ³ /h
ev	Coefficient d'exposition au vent	–
H	Hauteur moyenne des ouvrants au-dessus du sol	m
ΔP	Différence de pression (effet du vent)	Pa

2. Majuscules latines

Symbole	Signification	Unité
A	Apports calorifiques	W
AE	Apports calorifiques effectifs	W

Nomenclature

AI	Apports calorifiques internes	W
APO	Apports par paroi opaque	W
AREN	Apports dus au renouvellement d'air	W
AINF	Apports dus aux infiltrations d'air extérieur	W
AT	Apports calorifiques totaux	W
AV	Apports à travers parois vitrées	W
AVE	Apports par rayonnement à travers vitrages	W
AVT	Apports par transmission à travers vitrages	W
BF	Facteur de by-pass	—
C	Coefficient de correction	(selon les cas)
CS	Coefficient de simultanéité	—
D	Diamètre	m
E	Écart diurne	°C
DH	Degré hygrométrique	—
FS	Facteur solaire	—
HR	Humidité relative	%
HS	Humidité spécifique d'air	g_vap./kg_as
I	Rayonnement	W/m ²
K	Coefficient de transmission calorifique	W/m ² .°C
L	Latitude	degré
M	Masse rapportée à la surface du plancher	kg/m ²
N	Coefficient d'amortissement	—
PA	Pression atmosphérique	Pa
PC	Pouvoir calorifique	J/m ³
R	Résistance thermique d'un matériau	m ² .°C/W
S	Surface d'une paroi opaque	m ²
SV	Surface vitrée	m ²
TH	Température humide	°C
TO	Temps officiel	h
TR	Température de rosée	°C
TS	Température sèche	°C
TSV	Temps solaire vrai	h
V	Volume	m ³
VS	Volume spécifique	m ³ /kg_as
W	Puissance	W

Nomenclature

3. Minuscules latines

Symbole	Signification	Unité
a	Coefficient réglementaire	W/m ² .°C
alt	Altitude	m
c	Coefficient réglementaire	W/m ² .°C
e	Épaisseur	m
e'	Coefficient réglementaire	W/m ² .°C
h	Coefficient d'échange superficiel	W/m ² .°C
k	Coefficient linéique d'émission calorifique	W/m.°C
m	Masse	kg
qm	Débit massique	kg/s
qv	Débit volumique	m ³ /s
qve	Débit volumique d'air extrait	m ³ /s
qvo	Débit d'infiltration par ouvrant	m ³ /h.m ²
r	Résistance thermique d'échange	m ² .°C/W
z	Différence de niveau (sol)	m

4. Majuscules grecques

Symbole	Signification	Unité
ΔTS	Différence de températures sèches	°C
Δte	Différence de température équivalente	°C
Δtes	Différence équivalente non corrigée (paroi à l'ombre)	°C
Δtem	Différence équivalente non corrigée (paroi ensoleillée)	°C
Δtlnc	Écart de température entre local non climatisé et climatisé	°C

5. Minuscules grecques

Symbole	Signification	Unité
α	Facteur d'absorption	—
β	Hauteur du soleil	degré
λ	Conductivité thermique	W/m.°C
η	Rendement	—
θ	Température	°C
ω	Angle horaire	degré

Nomenclature

6. Indices

Indice	Signification
PH	Paroi horizontale
PV	Paroi verticale
PVI	Paroi vitrée
a	absorbé
as	air sec
an	air neuf
b	base
d	diffus
e	extérieur
eff	effectif
f	fluide
h	habitable
i	intérieur
inf	air d'infiltration
l	latent
lim	limite
lnc	local non climatisé
m	moyen
max	maximal
min	minimal
n	nominal
réf	référence
s	sensible
sf	soufflage
sup	supérieur
t	total
vap	vapeur

Liste des figures

Figure 1.1 Le premier système moderne de climatisation.....	03
Figure 3.1 Cycle de Carnot.....	10
Figure 3.2 Types de climatiseur..	11
Figure 3.3 Construction de climatiseur.....	12
Figure 3.4 Climatiseur de fenêtre.	12
Figure 3.5 Climatiseur portable.....	13
Figure 3.6 Un compresseur.....	15
Figure 3.7 Construction de compresseur.	16
Figure 3.8 Un compresseur DC..	18
Figure 3.9 Construction de compresseur DC.....	18
Figure 3.10 Un condenseur.....	21
Figure 3.11 Un détendeur.....	23
Figure 3.12 Un évaporateur.	25
Figure 3.13 Les composantes de l'évaporateur.....	25
Figure 4.1 Cellules solaires de Silicium monocristallin..	32
Figure 4.2 Cellules solaires de Silicium polycristallin	32
Figure 4.3 Cellule solaire à couches minces.....	33
Figure 4.4 les composantes de cellules photovoltaïques.	34
Figure 4.5 Cellules solaires thermiques.....	36
Figure 4.6 Plants de Cellules solaires thermiques.	37
Figure 5.1 Plans de bâtiment.	49
Figure 6.1 Panneaux solaires.....	72
Figure 6.2 MPPT..	74
Figure 6.3 Une batterie solaire..	75
Figure 6.4 Compresseur DC.....	76
Figure 6.5 Carte de contrôle de climatiseur.....	77

Listes des tableaux

Tableau 3.1 Comparaison entre compresseur DC et AC.	19
Tableau 5.1 Les pièces.....	49
Tableau 5.2 Les surfaces des parois extérieures	50
Tableau 5.3 Les surfaces des volumes	50
Tableau.5.4 Charges thermiques par pièce – Administration (Appareils + Occupants).....	52
Tableau 5.5 Les périmètres des volumes	51
Tableau 5.6 Les apports thermiques dus à l'éclairage.....	54
Tableau 5.7 Des valeurs constantes	55
Tableau 5.8 Résultats de apportes calorifiques de volume 1.....	60
Tableau 5.9 Résultats de apportes calorifiques de volume 2.....	62
Tableau 5.10 Résultats des apportes calorifiques de volume 3.....	64
Tableau 5.11 Résultats de apportes calorifiques de volume 4.....	65
Tableau 5.12 Résultats de apportes calorifiques de volume 5.....	67
Tableau 5.13 Résultats de apportes calorifiques de volume 6.....	68
Tableau 5.14 Résultats de apportes calorifiques de volume 7	73
Tableau 6.1 Comparaison d'un MPPT et PWM	73

Sommaire

Chapitre 01 : Généralité sur climatisation

1.1. La climatisation.....	3
1.2. Histoire de la climatisation.....	3

Chapitre 02 : L'énergie thermique

2.1. La notion d'énergie.....	5
2.1.1 Formes d'énergie	5
2.1.2 Loi de conservation de l'énergie	5
2.2. Énergie thermique	5
2.2.1. Définition de la chaleur.....	5
2.2.2. Différence entre chaleur et température	5
2.3. Propriétés de la chaleur.....	5
2.4. Modes de transfert de la chaleur	6
2.5. Équations thermiques	6
2.5.1. Variation de température (capacité thermique)	6
2.5.2 Changement d'état (chaleur latente)	6
2.5.3 Conduction thermique (loi de Fourier)	6
2.6 Applications pratiques de la chaleur	7
2.7 La condensation de masse.....	7
2.7.1. Définition	7
2.7.2. Caractéristiques principales	7
2.7.3 Types de condensation de masse	7
2.7.4. Importance de la condensation de masse	8

Chapitre 03 : Le système de climatisation

3.1.1 Éléments supplémentaires du système	9
3.2. Le climatiseur	10
3.2.1 Définition du climatiseur.....	10
3.2.2 Types de climatiseurs.....	11
3.2.2.1. Climatiseur de fenêtre (Window AC)	12

Sommaire

3.2.2.2 Climatiseur split (Split AC)	13
3.2.2.3 Système de climatisation centralisée (Central AC).....	13
3.2.2.4. Climatiseur portable (Portable AC)	13
3.2.2.5 Système multi-split (Multi-Split AC).....	13
3.2.2.6 Systèmes à débit de réfrigérant variable (VRF/VRV).....	14
3.3. Les composantes du climatiseur	14
3.3.1 Le compresseur	15
3.3.1.1. Définition du compresseur	15
3.3.1.2 Fonctionnement du compresseur.....	16
3.3.1.3 Caractéristiques générales.....	16
3.3.1.4. Types de compresseurs et leurs caractéristiques	17
3.3.1.5. Critères de choix du compresseur	17
3.3.2 Compresseur à courant continu (DC) pour climatiseur.....	18
3.3.2.1. Définition du compresseur et sa fonction.....	18
3.3.2.2 Principe de fonctionnement.....	19
3.3.2.3 Types de compresseurs DC.....	19
3.3.2.4 Avantages du compresseur DC	19
3.3.2.5 Comparaison entre compresseur DC et AC	19
3.3.2.6 Applications courantes.....	20
3.3.2.7 Connexion avec les panneaux solaires.....	20
3.3.2.8. Conseils techniques.....	20
3.4. Le condenseur	21
3.4.1. Définition du condenseur	21
3.4.2. Principe de fonctionnement.....	21
3.4.3 Importance dans le cycle thermodynamique	22
3.4.5. Caractéristiques générales du condenseur.....	22
3.4.6. Types de condenseurs selon le milieu de refroidissement.....	22
3.4.7 Facteurs influençant les performances du condenseur	23
3.5. Le détendeur (Soupape de détente).....	23
3.5.1 Définition du détendeur	23
3.5.2 Principe de fonctionnement de la soupape de détente.....	23
3.5.3 Types de soupapes de détente	24

Sommaire

3.5.4 Caractéristiques essentielles d'une bonne soupape de détente	24
3.6. L'évaporateur	24
3.6.1 Définition de l'évaporateur et sa fonction	24
3.6.2 Fonctionnement de l'évaporateur	25
3.6.3 Caractéristiques de l'évaporateur	26
3.6.4 Types d'évaporateurs et leurs caractéristiques	26

Chapitre 04 ; L'énergie solaire

4.1 Définition de l'énergie solaire	29
4.2 Types d'énergie solaire	29
4.2.1 Énergie solaire photovoltaïque	29
4.2.2 Énergie solaire thermique	29
4.2.3 Énergie solaire concentrée (CSP)	29
4.3 Avantages de l'énergie solaire	29
4.4 Défis et limitations	30
4.5 Applications de l'énergie solaire	30
4.6 L'avenir de l'énergie solaire	30
4.7 Importance de l'énergie solaire	30
4.8. La cellule solaire	30
4.8.1 Définition de la cellule solaire	30
4.8.2 Types de cellules solaires	30
4.8.2.1 La cellule photovoltaïque	31
4.8.2.1.1 Définition de la cellule photovoltaïque	31
4.8.2.1.2. Structure détaillée d'une cellule photovoltaïque	31
4.8.2.1.3 Types principaux de cellules photovoltaïques	31
4.8.2.1.3 Fonctionnement détaillé des cellules photovoltaïques	34
4.8.2.2 Cellules solaires thermiques (Concentrated Solar Power – CSP)	35

Chapitre 05 Calculs des apports thermiques

5.1 Le Travail	38
5.2 Documents Techniques Réglementaires (DTR)	38
5.3 Classification des DTR selon leurs domaines d'application	38
5.4 Documents techniques de la famille C3 relatifs à la performance énergétique et acoustique ...	40
5.5 Contenu du DTR C3.4 – Apports thermiques (l'important dans notre travail)	41

Sommaire

5.6 Importance du DTR C3.4 dans notre travail	42
5.7 Notion d'apports thermiques (charges thermiques)	42
5.8 La création des calculs.....	43
5.8.1 Les lois principales.....	43
5.8.2 Données de base du bâtiment.....	49
5.8.2.1 Mesures du bâtiment.....	49
5.8.2.2 Coefficients de transfert thermique K.....	51
5.8.2.2.1 Formule générale	51
5.8.2.2.2 Calcul des résistances et du K.....	51
5.8.2.3 Charges thermiques interne par pièce	52
5.8.2.3.2 Apports thermiques dus à l'éclairage.....	53
5.8.3 des valeurs préliminaires.....	54
5.8.3.1 des valeurs constantes : (la source est DTR 3 4).....	54
5.8.3.2 Des calculs préliminaires	56
5.8.4 Remarques essentielles – Point de départ de l'étude.....	59
5.8.5. Les calculs des apports calorifiques des tous les volumes.....	60
5.8.5.1.1 Volume	60
5.8.5.1.2 Exemple de La Vérification	61
5.8.5.2 Volume 2	62
5.8.5.3 Volume 3	63
5.8.5.4 Volume 4.....	65
5.8.5.5 Volume 5	66
5.8.5.6 Volume 6	67
5.8.5.7 Volume 7	69
5.8.5.8 La valeur totale des charges thermiques	70

Chapitre 06 : L'aspect innovant.

6.1 Description du système proposé	71
6.2 Composants du système.....	71
6.2.1 Panneaux solaires.....	71
6.2.2 Régulateur de charge(MPPT).....	72
6.2.3 Batteries solaires	74
6.2.4. Le Compresseur DC.....	76
6.2.5 La Carte de contrôle de climatiseur.....	77
6.3 La connexion du système.....	77

Sommaire

6.4 Calculs de dimensionnement	77
6.5 Application à notre exemple	78
6.6 Avantages du compresseur DC solaire	81
6.7 Contraintes du compresseur DC solaire.....	81
6.8 Schéma simplifié.....	81
Conclusion.....	82
Références... ..	83

I

ntroduction

La nécessité de climatiser les espaces dans les régions chaudes et éloignées des centres urbains constitue l'un des défis majeurs auxquels sont confrontés les habitants, les infrastructures de services ainsi que les installations industrielles. Dans les zones désertiques isolées, où les températures atteignent des niveaux extrêmes et où les réseaux électriques sont souvent inexistantes ou peu fiables, la mise en place d'un système de refroidissement efficace et durable devient indispensable pour assurer le confort thermique, protéger les équipements industriels et améliorer les conditions de vie et de travail. Cependant, le recours aux systèmes de climatisation conventionnels demeure limité en raison de leur forte consommation énergétique et de leur dépendance à une alimentation électrique stable.

Dans ce contexte, la climatisation alimentée par l'énergie solaire apparaît comme une solution innovante et particulièrement adaptée, tirant parti de l'abondance du rayonnement solaire dans les régions désertiques. Ce type de système permet de faire fonctionner les climatiseurs sans dépendre du réseau électrique, ce qui en fait une option idéale pour les zones résidentielles isolées, les installations de services, les sites industriels ainsi que les structures temporaires telles que les camps ou les exploitations agricoles en milieu désertique.

Parmi les technologies les plus performantes et les mieux adaptées à ces environnements, on retrouve le climatiseur équipé d'un compresseur fonctionnant en courant continu (DC), parfaitement compatible avec les panneaux photovoltaïques. Grâce à son fonctionnement en courant continu, ce type de climatiseur peut être alimenté directement par l'énergie solaire, sans nécessiter de convertisseurs complexes, ce qui réduit les pertes électriques et améliore l'efficacité globale du système. Il se distingue également par une faible consommation énergétique et une meilleure tolérance aux variations de tension, des caractéristiques essentielles pour les zones éloignées.

L'intégration de l'énergie solaire avec les climatiseurs à compresseur DC offre ainsi une solution complète permettant d'assurer l'autonomie énergétique, de réduire les coûts d'exploitation

Introduction

et de limiter les émissions de carbone, tout en garantissant un refroidissement fiable et performant. D'où l'importance de cette étude, qui vise à analyser en profondeur ce système, son principe de fonctionnement, ses composants, sa viabilité économique, son adéquation aux environnements désertiques, ainsi que les défis liés à son déploiement dans les zones résidentielles, industrielles et isolées.

Chapitre 01

Généralités sur climatisation

1.1. La climatisation

La climatisation est un procédé industriel destiné à réguler les conditions de l'air dans un espace fermé en contrôlant plusieurs paramètres physiques essentiels :

- La température : augmentation ou diminution selon les besoins.
- L'humidité relative : ajout ou suppression d'humidité pour atteindre un niveau optimal.
- La pureté de l'air : élimination des poussières, odeurs, polluants et micro-particules.
- La distribution de l'air : assurer une circulation et une diffusion homogènes dans l'espace.

La climatisation vise à garantir un environnement confortable pour l'être humain, mais aussi à fournir des conditions spécifiques nécessaires dans divers domaines industriels, médicaux ou technologiques.

Selon l'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), la climatisation est définie comme : « Un ensemble d'équipements de traitement de l'air visant à contrôler simultanément sa température, son humidité, sa pureté et sa distribution afin de répondre aux exigences de l'espace climatisé. »

1.2. Histoire de la climatisation

L'idée de contrôler la température de l'air remonte à l'Antiquité. Les Romains utilisaient des canaux d'eau froide pour rafraîchir les murs de leurs habitations. Au Moyen Âge, en Iran, des systèmes ingénieux tels que les jarres d'eau et les tours à vent (badguirs) permettaient de refroidir naturellement les bâtiments.

En Chine, au II^e siècle, l'inventeur Ding Huan développa un ventilateur rotatif manuel destiné à rafraîchir l'air. Plus tard, sous la dynastie Tang, des ventilateurs actionnés par l'énergie hydraulique furent introduits, marquant une avancée notable dans le contrôle du confort thermique.



Figure 1.1 : Le premier système moderne de climatisation.

Au XIX^e siècle, Michael Faraday découvrit que la compression et la liquéfaction de l'ammoniac refroidissaient l'air. En 1842, John Gorrie tenta d'utiliser une technologie de fabrication de glace pour rafraîchir l'air d'un hôpital en Floride, mais sans succès commercial.

Le grand tournant eut lieu le 17 juillet 1902, lorsque Willis Haviland Carrier inventa le premier système moderne de climatisation électrique capable de contrôler la température et l'humidité, lançant ainsi l'industrie moderne de la climatisation. Les climatiseurs commencèrent à être utilisés commercialement dans les années 1940, surtout dans les cinémas et les grands magasins, offrant un environnement confortable à l'abri de la chaleur.

En résumé, la climatisation a évolué des techniques rudimentaires de refroidissement de l'Antiquité à l'invention de Carrier au début du XX^e siècle, qui a fondé les systèmes modernes utilisés aujourd'hui

Chapitre 02

L'énergie thermique

2.1. La notion d'énergie

L'énergie est la capacité d'effectuer un travail. Elle est indispensable à tous les phénomènes naturels et aux activités humaines : déplacement d'un véhicule, fonctionnement des appareils électriques, croissance des plantes, etc. Toutes ces actions nécessitent une forme d'énergie [1].

2.1.1 Formes d'énergie

- Énergie cinétique : énergie d'un objet en mouvement (ex. : une balle qui roule).
- Énergie potentielle : énergie stockée en raison de la position d'un objet (ex. : un livre placé en hauteur).
- Énergie thermique : produite par l'agitation des particules de la matière.
- Énergie électrique : générée par le déplacement des électrons.
- Énergie chimique : stockée dans les aliments ou les carburants.
- Énergie nucléaire : issue des réactions dans le noyau des atomes.

2.1.2 Loi de conservation de l'énergie

L'énergie ne peut ni être créée ni détruite, mais seulement transformée d'une forme à une autre. Exemple : l'énergie chimique de l'essence devient énergie cinétique qui fait avancer la voiture [1].

2.2. Énergie thermique**2.2.1. Définition de la chaleur**

La chaleur est une forme d'énergie transférée d'un corps à un autre en raison d'une différence de température [2]. Elle est notée **Q** et mesurée en **joules (J)**. La chaleur circule toujours du corps chaud vers le corps froid.

2.2.2. Différence entre chaleur et température

- Chaleur : énergie transférée entre deux corps.
- Température (T) : mesure de l'énergie cinétique moyenne des particules.

Deux liquides à la même température peuvent contenir des quantités de chaleur différentes selon leur masse.

2.3. Propriétés de la chaleur

1. Chaud vers le froid.
2. Dépendance à la masse et au matériau.
3. Effets physiques : variation de température ou changement d'état.
4. Effets observables : dilatation, fusion, vaporisation, etc.

2.4. Modes de transfert de la chaleur

Conduction thermique

Transfert de chaleur dans les solides ou liquides immobiles par contact direct entre molécules.

Convection thermique

Transfert de chaleur dans les fluides par déplacement réel de la matière.

- Convection naturelle
- Convection forcée (ventilateur, pompe)

Rayonnement thermique

Transfert d'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques (infrarouges). Il peut se propager dans le vide (ex. : chaleur solaire).

2.5. Équations thermiques

2.5.1. Variation de température (capacité thermique)

$$Q = m \times c \times \Delta T$$

Signification des symboles :

- **Q** : quantité de chaleur (J)
- **m** : masse (kg)
- **c** : capacité thermique spécifique (J/kg·°C)
- **ΔT** : variation de température (°C ou K)

2.5.2 Changement d'état (chaleur latente)

$$Q = mL$$

Signification des symboles :

- **Q** : chaleur échangée (J)
- **m** : masse (kg)
- **L** : chaleur latente spécifique (J/kg)

2.5.3 Conduction thermique (loi de Fourier)

$$\frac{Q}{t} = kA \frac{\Delta T}{d}$$

Signification des symboles :

- Q/t : puissance thermique transférée (W)
- k : conductivité thermique (W/m·K)
- A : surface de contact (m²)
- ΔT : différence de température (°C ou K)
- d : épaisseur du matériau (m)

2.6 Applications pratiques de la chaleur

- Chauffage domestique
- Réfrigération et climatisation
- Moteurs thermiques
- Panneaux solaires thermiques
- Traitement des métaux (fusion, forge, trempe)

2.7 La condensation de masse**2.7.1. Définition**

La condensation de masse est un processus physique où la vapeur d'eau contenue dans l'air se transforme en gouttelettes d'eau ou en cristaux de glace lorsque l'air se refroidit en dessous du point de rosée.

2.7.2. Caractéristiques principales

- Zones spécifiques : montagnes, plaines froides.
- Dépendance à l'humidité : plus l'air est humide, plus la condensation est probable.
- Impact météorologique : brouillard, pluie, neige.
- Lien avec la température : survient lorsque l'air atteint le point de rosée.

2.7.3 Types de condensation de masse**➤ Condensation de surface**

Près du sol, tôt le matin. Exemples : rosée, brouillard [4].

➤ Condensation en altitude

Dans les couches froides de l'atmosphère. Formation de nuages, pluie, neige.

➤ Condensation dans les nuages

Résulte de l'interaction entre masses d'air chaud et froid.

➤ **Condensation orographique**

Lorsque l'air humide monte le long d'une montagne et se refroidit. Cause fréquente de précipitations en zones montagneuses.

2.7.4. Importance de la condensation de masse

- Influence majeure sur les conditions météorologiques.
- Essentielle à la formation des précipitations.
- Fournit l'humidité nécessaire aux écosystèmes.

Chapitre 03

Le système de climatisation

3.1. Fonctionnement du système de climatisation

Les systèmes de climatisation fonctionnent selon le principe du transfert de chaleur : ils extraient la chaleur de l'air intérieur pour la rejeter à l'extérieur, assurant ainsi un confort thermique optimal dans les espaces fermés. La majorité des climatiseurs modernes utilisent le cycle de compression de vapeur, qui se compose de quatre étapes principales [5]

a. Le compresseur (Compressor)

Il aspire le fluide frigorigène sous forme de vapeur basse pression et le comprime, ce qui augmente fortement sa pression et sa température.

b. Le condenseur (Condenser)

Le gaz chaud et sous haute pression traverse le condenseur, où il libère sa chaleur vers l'environnement extérieur. Il se condense alors en un liquide à haute pression.

c. Le détendeur (Expansion Valve)

Le détendeur provoque une chute brutale de pression du liquide frigorigène, entraînant une baisse de température. Le fluide devient un mélange froid de liquide et de vapeur.

d. L'évaporateur (Evaporator)

Le fluide frigorigène froid absorbe la chaleur de l'air intérieur, ce qui provoque le refroidissement de la pièce. Le fluide s'évapore alors et retourne vers le compresseur pour recommencer le cycle.

Ce cycle se répète en continu afin de maintenir la température souhaitée dans l'espace.

3.1.1 Éléments supplémentaires du système

- Filtre à air (Air Filter) : élimine la poussière et les particules pour améliorer la qualité de l'air.
- Ventilateur (Fan) : fait circuler l'air à travers l'évaporateur et le redistribue dans la pièce.
- Thermostat : régule automatiquement la température intérieure selon les préférences de l'utilisateur.

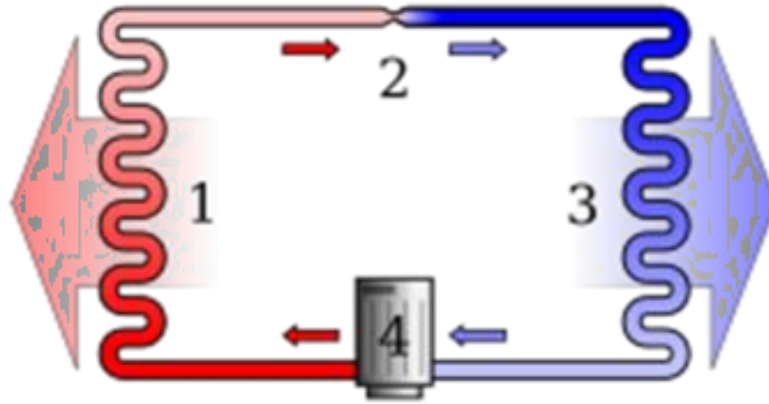


Figure 3.1 Cycle de Carnot.

A simple stylized diagram of the refrigeration cycle: 1) condensing coil, 2) expansion valve, 3) evaporator coil, 4) compressor

Ce cycle se répète sans cesse pour réguler efficacement la température et l'humidité de l'espace, avec l'ajout d'une petite quantité d'huile pour lubrifier le compresseur et assurer son bon fonctionnement.

3.2. Le climatiseur

3.2.1 Définition du climatiseur

Un climatiseur est un appareil mécanique destiné à réguler la température de l'air dans les espaces fermés. Il peut assurer :

- Le refroidissement,
- Le chauffage (dans les modèles réversibles),
- La déshumidification,
- La purification de l'air.

Son objectif principal est de garantir un environnement intérieur confortable, sain et stable, quelles que soient les conditions climatiques extérieures.

3.2.2 Types de climatiseurs



Figure 3.2 Types de climatiseur.

Il existe différents types de climatiseurs. Parmi les plus courants, citons : le climatiseur de fenêtre (Chine, 2023) ; le climatiseur cassette plafonnier (Chine, 2023) ; le climatiseur mural (Japon, 2020) ; le climatiseur console plafonnier (également appelé climatiseur suspendu au plafond) (Chine, 2023) ; et le climatiseur portable (Cité du Vatican, 2018).

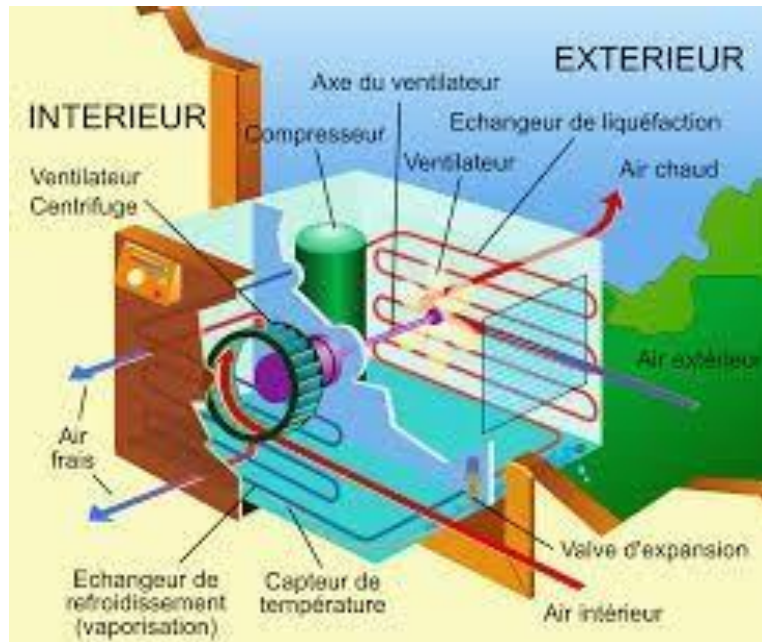


Figure 3.3 Construction de climatiseur.

3.2.2.1. Climatiseur de fenêtre (Window AC)

Le climatiseur de fenêtre est une unité autonome qui regroupe l'ensemble des composants essentiels du cycle frigorifique dans un seul boîtier compact. Il est généralement installé dans une fenêtre ou intégré dans une ouverture murale. Ce type d'appareil est conçu pour refroidir une seule pièce ou un petit espace, ce qui en fait une solution simple, économique et facile à installer pour les environnements de petite superficie.



Figure 3.4 Climatiseur de fenêtre

3.2.2.2 Climatiseur split (Split AC)

Ce type de climatiseur est composé d'une unité intérieure et d'une unité extérieure, reliées entre elles par des conduites contenant le fluide frigorigène. Il est apprécié pour son faible niveau sonore, sa haute efficacité énergétique et sa capacité à assurer un confort thermique stable dans les espaces résidentiels et professionnels.

3.2.2.3 Système de climatisation centralisée (Central AC)

Ce système utilise une unité centrale chargée de refroidir l'air avant de le distribuer dans l'ensemble du bâtiment à travers un réseau de conduits. Il convient particulièrement aux grandes maisons, immeubles et bâtiments comportant plusieurs pièces, offrant une climatisation uniforme et un contrôle centralisé.

3.2.2.4. Climatiseur portable (Portable AC)

Il s'agit d'une unité mobile autonome pouvant être déplacée facilement d'une pièce à une autre. L'appareil évacue l'air chaud vers l'extérieur à l'aide d'un tuyau flexible. Ce type de climatiseur est idéal pour les espaces où l'installation permanente d'un système fixe est difficile ou impossible.



Figure 3.5 Climatiseur portable.

3.2.2.5 Système multi-split (Multi-Split AC)

Le système multi-split fonctionne sur le même principe que le système split classique, mais il permet de connecter plusieurs unités intérieures à une seule unité extérieure. Ce type d'installation offre une flexibilité accrue, une meilleure gestion des zones à climatiser et une efficacité énergétique améliorée, notamment dans les habitations ou bureaux comportant plusieurs pièces.

3.22.6 Systèmes à débit de réfrigérant variable (VRF/VRV)

Les systèmes VRF/VRV représentent une technologie avancée permettant un contrôle précis du débit de fluide frigorigène envoyé à chaque unité intérieure. Cette modulation optimise la consommation d'énergie et assure un confort thermique adapté aux besoins de chaque zone, ce qui en fait une solution idéale pour les grands bâtiments, hôtels et complexes commerciaux.

3.3. Les composantes du climatiseur

Le climatiseur est constitué d'un ensemble de composants assurant le fonctionnement complet du cycle frigorifique. Parmi les éléments principaux, on retrouve :

- Le compresseur,
- Le condenseur,
- L'évaporateur,
- Le détendeur ou capillaire,
- Les conduites de réfrigérant,
- Le fluide frigorigène,
- Le ventilateur du condenseur,
- Le ventilateur de l'évaporateur,
- Les filtres,
- Les cartes électroniques (interne et externe),
- Les capteurs de température (interne et externe),
- Le capteur de pression,
- Le relais,
- Le condensateur électrique,
- Le moteur du ventilateur,
- Le volet de distribution d'air et son moteur,
- Le bac de drainage et son tuyau,
- Le carter extérieur,
- La grille de protection,
- La vanne de service,
- Les câbles électriques,
- Les fusibles,
- Le disjoncteur,
- Les câbles de commande,

- Le module de communication,
- Ainsi que les isolants thermiques des conduites.

Dans les climatiseurs fonctionnant en courant continu (DC), s'ajoutent des composants spécifiques tels que :

- Le compresseur DC,
- Les ventilateurs DC,
- La carte de commande DC,
- Le régulateur de tension.

Pour les systèmes alimentés par énergie solaire, on ajoute également :

- Les panneaux photovoltaïques,
- Le régulateur de charge,
- Les batteries,
- Les câbles solaires,
- Les disjoncteurs DC,
- Les connecteurs MC4,
- Les structures de fixation des panneaux.

Dans ce chapitre, nous nous concentrerons uniquement sur les éléments essentiels.

3.3.1 Le compresseur

3.3.1.1. Définition du compresseur

Le compresseur est un dispositif mécanique chargé d'augmenter la pression du gaz réfrigérant (souvent du fréon ou ses équivalents) dans le cycle frigorifique. Sa fonction principale consiste à aspirer le gaz basse pression provenant de l'évaporateur, à le comprimer pour en élever la pression et la température, puis à l'envoyer vers le condenseur où il pourra libérer sa chaleur [6].



Figure 3.6 Un compresseur.

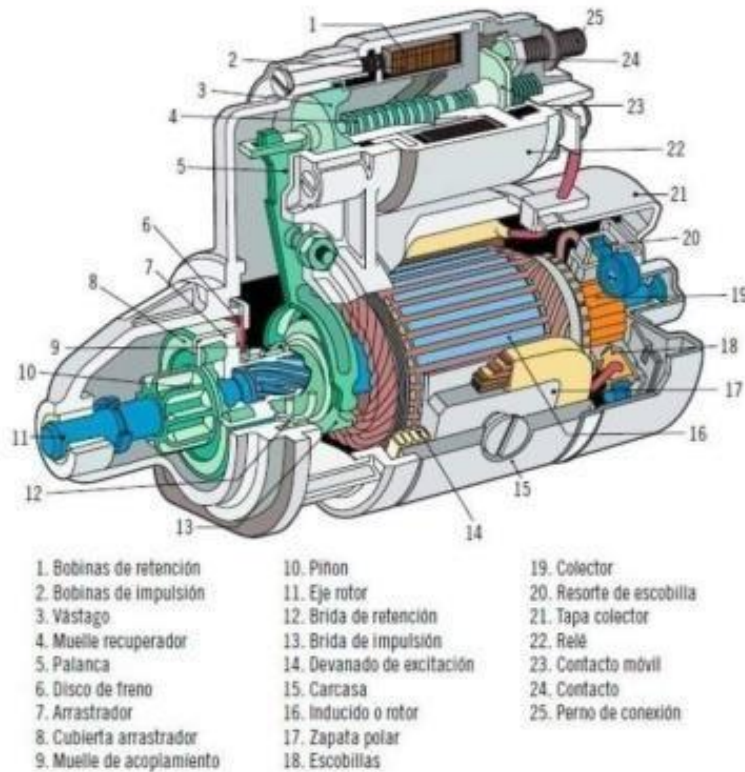


Figure 3.7 Construction de compresseur.

3.3.1.2 Fonctionnement du compresseur

Le compresseur aspire le fluide frigorigène à travers l'orifice d'aspiration sous forme de vapeur basse pression. À l'aide d'un mécanisme mécanique — piston, rotor, spirale ou autre — il réduit le volume du gaz, ce qui entraîne une augmentation de sa pression et de sa température. Une fois comprimé, le gaz chaud est expulsé vers le condenseur, où il poursuivra le cycle de refroidissement.

3.3.1.3 Caractéristiques générales

Le compresseur est conçu pour :

- Résister à des températures élevées,
- Maintenir une efficacité énergétique optimale,
- Réduire le bruit et les vibrations selon le type de mécanisme,
- Assurer une isolation électrique adéquate pour garantir la sécurité et la fiabilité du système

3.3.1.4. Types de compresseurs et leurs caractéristiques**A. Compresseur alternatif (à piston)**

Fonctionne grâce à un piston effectuant un mouvement de va-et-vient.

Avantages : économique, facile à entretenir.

Inconvénients : niveau sonore modéré, efficacité moyenne.

B. Compresseur rotatif

Utilise un rotor tournant dans une chambre circulaire.

Avantages : compact, silencieux, bon rendement.

Inconvénients : sensible aux impuretés.

C. Compresseur scroll (à spirale)

Composé de deux spirales, l'une fixe et l'autre mobile.

Avantages : très silencieux, haut rendement, très peu de vibrations.

Inconvénients : coût relativement élevé.

D. Compresseur centrifuge

Augmente la pression du gaz grâce à la force centrifuge.

Avantages : adapté aux grandes installations, débit élevé.

Inconvénients : encombrant, coûteux, moins performant à faible charge.

E. Compresseur à vis

Utilise deux vis tournant en sens opposé pour comprimer le gaz. Avantages :

débit constant, haute efficacité, idéal pour les usages industriels. Inconvénients : grande taille, prix élevé.

3.3.1.5. Critères de choix du compresseur

Le choix d'un compresseur dépend de plusieurs paramètres :

- La capacité de refroidissement recherchée,
- Le niveau sonore acceptable,
- L'efficacité énergétique (EER/SEER),
- Le type d'environnement (domestique, commercial, industriel),
- Le type de fluide frigorigène utilisé.

3.3.2 Compresseur à courant continu (DC) pour climatiseur



Figure 3.8 Un compresseur DC.



Figure 3.9 Construction de compresseur DC

3.3.2.1. Définition du compresseur et sa fonction

Le compresseur à courant continu (DC) est un élément fondamental dans les climatiseurs modernes, notamment ceux équipés de la technologie Inverter. Il se distingue par un rendement énergétique supérieur à celui des compresseurs à courant alternatif (AC), grâce à sa capacité à moduler la vitesse du moteur en fonction des besoins réels en refroidissement. Cette modulation permet de réduire la consommation d'énergie tout en améliorant la performance globale du système [7].

3.3.2.2 Principe de fonctionnement

Le compresseur DC fonctionne à l'aide d'un moteur alimenté en courant continu. Un circuit électronique appelé onduleur convertit d'abord le courant alternatif en courant continu, puis le reconvertit en courant alternatif à fréquence variable. Cette variation de fréquence permet d'ajuster précisément la puissance frigorifique délivrée, ce qui améliore l'efficacité énergétique, réduit l'usure mécanique et prolonge la durée de vie de l'appareil.

3.3.2.3 Types de compresseurs DC

Les principaux types de compresseurs à courant continu sont :

- Compresseur scroll (spiral)
- Compresseur rotatif (le plus courant dans les climatiseurs résidentiels)
- Compresseur alternatif (à piston)

Le choix du type dépend des besoins thermiques, du niveau de performance recherché et de la conception du système.

3.3.2.4 Avantages du compresseur DC

Les Économie d'énergie : réduction de 30 à 50 % par rapport aux compresseurs AC.

- Fonctionnement silencieux : grâce à la variation progressive de la vitesse.
- Température stable : régulation précise de la température ambiante.
- Durée de vie prolongée : diminution des cycles marche/arrêt.
- Compatibilité solaire : possibilité d'alimentation directe en 12 V, 24 V ou 48 V

sans onduleur.

3.3.2.5 Comparaison entre compresseur DC et AC

Tableau 3.1 Comparaison entre compresseur DC et AC.

Caractéristique	Compresseur DC	Compresseur AC
Consommation d'énergie	Faible	Élevée
Contrôle de la vitesse	Variable	Fixe (marche/arrêt)
Niveau sonore	Faible	Plus élevé
Stabilité thermique	Élevée	Moins stable
Compatibilité avec l'énergie solaire	Excellente	Faible (nécessite un onduleur)

3.3.2.6 Applications courantes

Les compresseurs et systèmes de refroidissement à courant continu (DC) sont utilisés dans plusieurs applications modernes, notamment :

- Les climatiseurs résidentiels de type Inverter,
- Les systèmes de climatisation pour véhicules, caravanes et camping-cars (RV),
- Les réfrigérateurs solaires et unités mobiles,
- Les systèmes de refroidissement autonomes destinés aux zones isolées (off-grid).

3.3.2.7 Connexion avec les panneaux solaires

Dans une configuration alimentée par énergie solaire, le fonctionnement suit généralement les étapes suivantes :

1. Les panneaux solaires produisent un courant continu (DC).
2. Un régulateur MPPT stabilise la tension et assure une charge optimale des batteries.
3. Les batteries fournissent une alimentation continue stable au système.
4. Le contrôleur du climatiseur pilote le compresseur en fonction des besoins thermiques.

Cette architecture permet un fonctionnement autonome, particulièrement utile dans les régions éloignées ou non raccordées au réseau électrique.

3.3.2.8. Conseils techniques

Pour garantir un fonctionnement optimal d'un système de climatisation alimenté en énergie solaire, il est recommandé de :

- Vérifier la compa
- Tribalité de tension (12 V ou 24 V),
- Utiliser des batteries à décharge profonde,
- Prévoir une ventilation suffisante pour éviter la surchauffe des composants,
- S'assurer de la compatibilité entre le contrôleur et le compresseur.

3.3.2.9 Importance du compresseur DC

Le compresseur à courant continu (DC) constitue une avancée majeure dans le domaine du refroidissement, notamment grâce à son efficacité énergétique et sa capacité à fonctionner avec des sources renouvelables. Avec l'essor des systèmes solaires, il représente une solution idéale pour :

- Les habitations isolées,
- les installations mobiles,
- les systèmes autonomes à faible consommation.

Sa capacité à moduler la vitesse améliore le rendement global et réduit la consommation électrique.

3.4. Le condenseur

3.4.1. Définition du condenseur

Le condenseur est un échangeur de chaleur dont la fonction principale est de transformer le fluide frigorigène gazeux en liquide en libérant sa chaleur vers un milieu externe (air ou eau). Il constitue un élément essentiel du cycle frigorifique et se situe immédiatement après le compresseur. Son rôle est indispensable pour permettre la poursuite du cycle thermodynamique et assurer un refroidissement efficace.



Figure 3.10 Un condenseur.

3.4.2. Principe de fonctionnement

Lorsque le fluide frigorigène sort du compresseur, il se trouve à haute pression et haute température, sous forme de vapeur surchauffée. En entrant dans le condenseur, il transfère sa chaleur au milieu environnant (air ou eau), ce qui provoque sa condensation en liquide, tout en

maintenant une pression pratiquement constante. Cette étape est indispensable pour préparer le fluide à la détente et à l'évaporation dans les étapes suivantes du cycle frigorifique.

3.4.3 Importance dans le cycle thermodynamique

Le condenseur joue un rôle crucial dans le cycle de compression de vapeur, car il assure la rejection de la chaleur absorbée dans l'évaporateur et celle générée par le compresseur. Sans une condensation complète du fluide frigorigène, le détendeur et l'évaporateur ne pourraient pas fonctionner correctement, ce qui compromettrait l'efficacité globale du système.

3.4.5. Caractéristiques générales du condenseur

Les principales caractéristiques d'un condenseur sont les suivantes :

- Fonctionnement à haute pression.
- Présence d'une grande surface d'échange thermique pour faciliter la dissipation de chaleur.
- Souvent équipé de ventilateurs (pour les condenseurs à air) ou de pompes (pour les condenseurs à eau) afin d'améliorer le transfert thermique.
- Son efficacité dépend fortement de la température ambiante, qui influence la capacité de refroidissement.

3.4.6. Types de condenseurs selon le milieu de refroidissement

On distingue trois types principaux de condenseurs :

A. Condenseur à air (Air-Cooled Condenser)

C'est le type le plus courant dans les climatiseurs résidentiels. Il est constitué de tubes munis d'ailettes métalliques, avec un ventilateur qui force la circulation de l'air sur les surfaces d'échange. Il est simple à installer et ne nécessite pas d'eau, mais ses performances diminuent dans les climats très chauds.

B. Condenseur à eau (Water-Cooled Condenser)

Ce type utilise de l'eau pour absorber la chaleur du fluide frigorigène. Il offre une excellente efficacité thermique et est utilisé dans les installations industrielles ou commerciales de grande capacité. Cependant, il nécessite un entretien important, notamment en raison du dépôt de calcaire et de la consommation d'eau.

C. Condenseur évaporatif (Evaporative Condenser)

Il combine l'action de l'air et de l'eau : de l'eau est pulvérisée sur les serpentins tandis qu'un ventilateur assure la circulation de l'air. Ce système offre une efficacité élevée,

particulièrement dans les climats secs et chauds, tout en consommant moins d'eau qu'un condenseur à eau classique.

3.4.7 Facteurs influençant les performances du condenseur

Les performances d'un condenseur dépendent de plusieurs paramètres :

- La température du fluide frigorigène et du milieu de refroidissement (air ou eau).
- Le débit du fluide et du milieu de refroidissement.
- La propreté des surfaces d'échange thermique.
- Le design du condenseur (longueur des tubes, nombre d'ailettes, disposition).

Un entretien régulier est indispensable pour maintenir une performance optimale et éviter les pertes d'efficacité.

3.5. Le détendeur (Soupape de détente)

3.5.1. Définition du détendeur

Le détendeur, ou soupape de détente, est un élément fondamental du cycle de réfrigération. Sa fonction principale consiste à réduire la pression du fluide frigorigène liquide provenant du condenseur. Cette chute de pression permet au fluide de se vaporiser dans l'évaporateur à une température plus basse, facilitant ainsi l'absorption de la chaleur présente dans l'air ambiant [8]. Ce processus est indispensable pour assurer le refroidissement efficace dans les systèmes de climatisation et de réfrigération

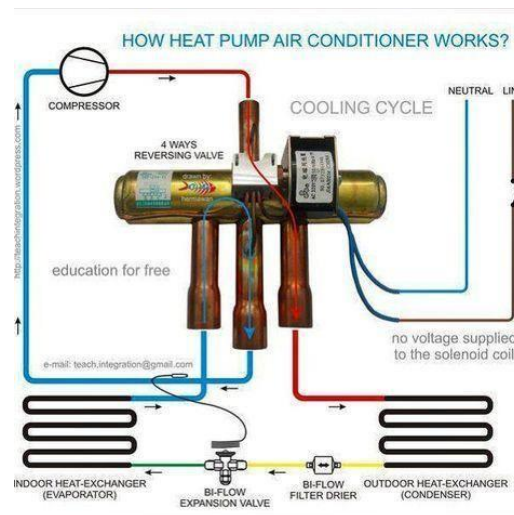


Figure 3.11 Un détendeur.

3.5.2 Principe de fonctionnement de la soupape de détente

La soupape de détente joue un rôle essentiel dans le cycle frigorifique. En abaissant la pression du fluide frigorigène, elle permet à celui-ci de passer partiellement à l'état gazeux. Ce

mélange liquide-gaz absorbe alors la chaleur présente à l'intérieur du bâtiment ou de l'appareil, ce qui provoque un effet de refroidissement. Ce processus prépare le fluide à entrer dans l'évaporateur pour poursuivre le cycle thermodynamique.

3.5.3 Types de soupapes de détente

A. Soupape de détente thermique (TXV)

Le débit du fluide frigorigène en fonction de la température du gaz en sortie de l'évaporateur, grâce à un bulbe capteur. Elle offre une régulation précise et est largement utilisée dans les systèmes de climatisation résidentiels.

B. Tube capillaire

Il s'agit d'un simple tube étroit utilisé dans les petits systèmes frigorifiques. Il crée une chute de pression constante sans régulation active, ce qui le rend économique mais peu flexible.

C. Soupape de détente électronique (EEV)

Contrôlée par un microprocesseur, elle ajuste avec grande précision le débit du fluide en temps réel, en fonction des capteurs de pression et de température. Elle est utilisée dans les systèmes modernes de réfrigération et de climatisation à haute performance.

D. Soupape de détente automatique (AXV)

Elle maintient une pression constante dans l'évaporateur, indépendamment de la charge thermique. Bien qu'elle soit simple d'utilisation, elle reste moins efficace dans les applications où la charge varie fréquemment.

3.5.4 Caractéristiques essentielles d'une bonne soupape de détente

Pour garantir un fonctionnement optimal du système frigorifique, une soupape de détente doit :

- Offrir une réponse rapide aux variations thermiques,
- Résister à l'usure et aux impuretés,
- Être compatible avec différents types de réfrigérants,
- Nécessiter un entretien minimal.

3.6. L'évaporateur

3.6.1 Définition de l'évaporateur et sa fonction

L'évaporateur est l'un des composants essentiels des systèmes de climatisation et de réfrigération. Sa fonction principale consiste à **absorber la chaleur de l'air intérieur** afin de permettre le refroidissement de l'espace. Lorsque le fluide frigorigène traverse l'évaporateur, il se

transforme en gaz grâce à l'absorption de chaleur, ce qui contribue directement au processus de rafraîchissement de l'air ambiant.

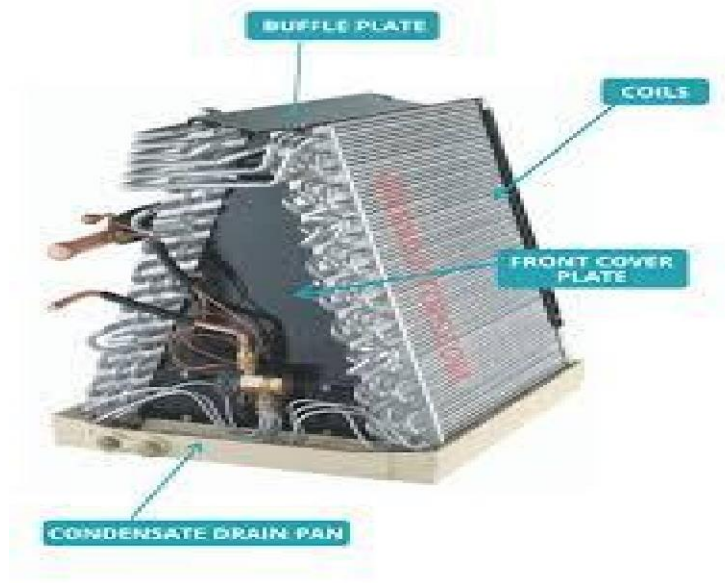


Figure 3.12 Un évaporateur.

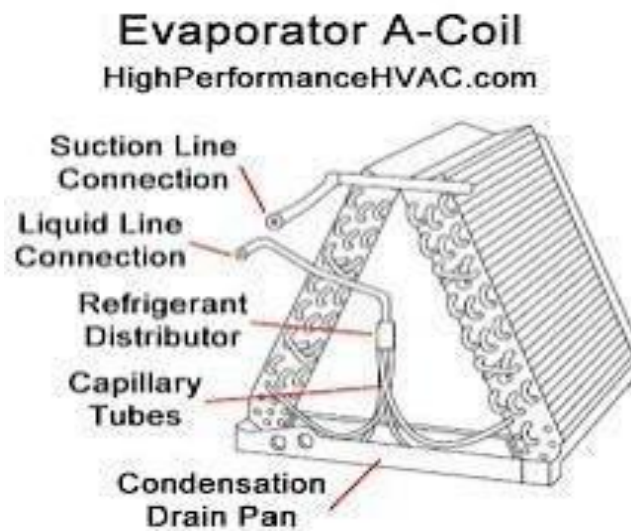


Figure 3.13 Les composantes de l'évaporateur.

3.6.2. Fonctionnement de l'évaporateur

Le fonctionnement de l'évaporateur repose sur plusieurs étapes essentielles du cycle frigorifique :

- Le fluide frigorigène pénètre dans l'évaporateur après être passé par la vanne de détente, où sa pression chute [9].

- À ce stade, il se trouve à basse pression et basse température, ce qui le rend apte à absorber la chaleur.
- L'air chaud de la pièce est aspiré par un ventilateur et circule sur les serpentins de l'évaporateur.
- Le fluide frigorigène absorbe la chaleur de l'air et s'évapore : c'est le principe même de l'évaporation.
- Le gaz frigorigène ainsi formé est ensuite dirigé vers le compresseur pour poursuivre le cycle thermodynamique.

3.6.3 Caractéristiques de l'évaporateur

L'évaporateur présente plusieurs caractéristiques techniques importantes :

- Il est généralement fabriqué en cuivre ou en aluminium, matériaux reconnus pour leur excellente conductivité thermique.
- Il est conçu sous forme de tubes en serpentins munis d'ailettes (fins) afin d'augmenter la surface d'échange thermique.
- Son efficacité dépend de plusieurs paramètres :
 - ✓ La propreté des ailettes,
 - ✓ La vitesse de ventilation,
 - ✓ La pression et la température du fluide frigorigène entrant.
- Un entretien régulier est indispensable, car la poussière ou le givre peut réduire considérablement ses performances.

3.6.4. Types d'évaporateurs et leurs caractéristiques

A. Évaporateurs à air (Air-cooled Evaporators)

Ces évaporateurs refroidissent l'air directement grâce au contact entre le fluide frigorigène circulant dans les serpentins et l'air ambiant. Ils sont largement utilisés dans les climatiseurs résidentiels et les petites installations frigorifiques.

B. Évaporateurs immergés (Flooded Evaporators)

Dans ce type d'évaporateur, les serpentins sont entièrement immergés dans le fluide frigorigène. Ce système est utilisé dans les applications industrielles nécessitant un rendement thermique élevé, notamment dans les grandes installations de réfrigération

3.6.5 Les composantes du climatiseur

Le climatiseur est constitué d'un ensemble de composants assurant le fonctionnement complet du cycle frigorifique. Parmi les éléments principaux, on retrouve :

- Le compresseur,
- Le condenseur,
- L'évaporateur,
- Le détendeur ou capillaire,
- Les conduites de réfrigérant,
- Le fluide frigorigène,
- Le ventilateur du condenseur,
- Le ventilateur de l'évaporateur,
- Les filtres,
- Les cartes électroniques (interne et externe),
- Les capteurs de température (interne et externe),
- Le capteur de pression,
- Le relais,
- Le condensateur électrique,
- Le moteur du ventilateur,
- Le volet de distribution d'air et son moteur,
- Le bac de drainage et son tuyau,
- Le carter extérieur,
- La grille de protection,
- La vanne de service,
- Les câbles électriques,
- Les fusibles,
- Le disjoncteur,
- Les câbles de commande,
- Le module de communication,
- Ainsi que les isolants thermiques des conduites.

Dans les climatiseurs fonctionnant en courant continu (DC), s'ajoutent des composants spécifiques tels que :

- Le compresseur DC,
- Les ventilateurs DC,
- La carte de commande DC,
- Le régulateur de tension.

Pour les systèmes alimentés par énergie solaire, on ajoute également :

- Les panneaux photovoltaïques,
- Le régulateur de charge,
- Les batteries,
- Les câbles solaires,
- Les disjoncteurs DC,
- Les connecteurs MC4,
- Les structures de fixation des panneaux.

Dans ce chapitre, nous nous concentrerons uniquement sur les éléments essentiels.

Chapitre 04

L'énergie solaire

4.1 Définition de l'énergie solaire

L'énergie solaire est l'une des principales sources d'énergie renouvelable, issue du rayonnement solaire atteignant la surface terrestre en quantités considérables. Face à la demande énergétique croissante et aux enjeux environnementaux, elle représente une solution durable et propre.

Elle est produite par le rayonnement électromagnétique du soleil, transmis sous forme de lumière et de chaleur, et peut être convertie en énergie utile grâce aux technologies thermiques ou photovoltaïques. Historiquement, l'humanité utilise l'énergie solaire depuis des millénaires pour chauffer l'eau, sécher les récoltes ou éclairer les habitations. Aujourd'hui, grâce aux avancées technologiques, elle est exploitée efficacement pour produire de l'électricité dans les secteurs résidentiel, industriel et agricole.

4.2 Types d'énergie solaire

4.2.1 Énergie solaire photovoltaïque

Elle convertit directement la lumière du soleil en électricité grâce à des cellules photovoltaïques en matériaux semi-conducteurs comme le silicium. Lorsque la lumière frappe la cellule, elle libère des électrons produisant un courant continu. Les panneaux photovoltaïques sont utilisés dans les habitations, les centrales solaires, les satellites et les véhicules solaires [10].

4.2.2 Énergie solaire thermique

Cette technologie transforme le rayonnement solaire en chaleur à l'aide de capteurs thermiques contenant un fluide caloporteur. La chaleur produite est utilisée pour chauffer l'eau, l'air ou pour des applications industrielles. Le chauffe-eau solaire est l'application la plus courante.

4.2.3 Énergie solaire concentrée (CSP)

Cette technologie utilise des miroirs pour concentrer les rayons solaires sur un point focal, chauffant un fluide à haute température. La chaleur obtenue permet de produire de la vapeur qui actionne des turbines génératrices d'électricité. Elle est principalement utilisée dans les grandes installations industrielles.

4. 3 Avantages de l'énergie solaire

- Source renouvelable, propre et disponible presque partout.
- Ne produit pas de gaz à effet de serre.
- Réduit les factures d'électricité à long terme.
- Convient aux zones isolées.

- Faible entretien et longue durée de vie.

4.4 Défis et limitations

- Coût initial d'installation relativement élevé.
- Dépendance à l'ensoleillement et aux conditions climatiques.
- Besoin de grandes surfaces pour les installations de forte puissance.

4.5 Applications de l'énergie solaire

- Habitations : éclairage, chauffage de l'eau, alimentation électrique.
- Agriculture : pompage d'eau, serres solaires.
- Industrie : chauffage ou production d'énergie.
- Transport : véhicules solaires.
- Dessalement de l'eau : osmose inverse ou évaporation solaire.

4.6 L'avenir de l'énergie solaire

L'énergie solaire jouera un rôle essentiel dans la transition énergétique mondiale. Les progrès dans les technologies photovoltaïques et de stockage améliorent continuellement les performances tout en réduisant les coûts. De nombreux pays augmentent leur part d'énergie solaire pour réduire leur dépendance aux combustibles fossiles et atteindre les objectifs climatiques d'ici 2050.

4.7 Importance de l'énergie solaire

L'énergie solaire constitue une alternative propre, économique et stratégique. Son développement contribue à renforcer l'indépendance énergétique, améliorer la qualité de vie et préserver l'environnement pour les générations futures.

4.8. La cellule solaire

4.8.1 Définition de la cellule solaire

La cellule solaire est un dispositif semi-conducteur capable de convertir directement l'énergie lumineuse du soleil en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Elle constitue l'unité élémentaire des panneaux solaires et peut être fabriquée à partir de divers matériaux tels que le silicium, les couches minces ou les pérovskites.

Les cellules solaires sont assemblées pour former des modules capables de produire une énergie propre et renouvelable, utilisée dans les habitations, les centrales électriques, les satellites ou encore les véhicules solaires [11].

4.8.2 Types de cellules solaires

On distingue principalement deux grandes catégories de cellules solaires :

- Les cellules photovoltaïques,
- Les cellules solaires thermiques.

4.8.2.1 La cellule photovoltaïque

4.8.2.1.1 Définition de la cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est un composant électronique qui convertit directement la lumière solaire en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Lorsque les photons frappent la surface de la cellule, ils excitent les électrons du matériau semi-conducteur (généralement du silicium), ce qui génère un courant électrique continu (DC). Ces cellules sont largement utilisées dans les panneaux solaires destinés aux habitations, aux bâtiments, aux installations industrielles et même aux satellites [12].

4.8.2.1.2. Structure détaillée d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches essentielles :

A-Verre de protection (Glass Cover) Protège la cellule contre les intempéries, la poussière et les chocs mécaniques.

B-Couche antireflet (Anti-Reflective Coating) Réduit la réflexion de la lumière afin d'augmenter l'absorption des photons.

C-Silicium de type N (N-Type Silicon) Matériau contenant un excès d'électrons (porteurs négatifs).

D-Silicium de type P (P-Type Silicon) Matériau présentant un déficit d'électrons (trous, porteurs positifs).

E-Jonction PN (PN Junction) Interface entre les couches N et P, où se produit la séparation des charges électriques.

F-Contacts métalliques (Front & Back Contacts) Permettent la collecte et la circulation du courant électrique vers l'extérieur.

4.8.2.1.3 Types principaux de cellules photovoltaïques

a. Silicium monocristallin (Monocrystalline Silicon – Mono-Si)

- Fabriquées à partir d'un seul cristal de silicium.
- Rendement élevé, généralement compris entre 18 % et 22 %.
- Couleur noire uniforme.
- Très bonnes performances même en conditions de faible ensoleillement.
- Coût de fabrication plus élevé que les autres technologies.



Figure 4.1 Cellules solaires de Silicium monocristallin.

b. Silicium polycristallin (Polycrystalline Silicon – Poly-Si)

Les cellules photovoltaïques en silicium polycristallin sont fabriquées à partir de plusieurs cristaux de silicium fondus puis solidifiés ensemble. Cette structure multi-cristalline leur confère un aspect bleu caractéristique, souvent accompagné d'une texture granuleuse.

Elles présentent un rendement moyen compris entre 15 % et 18 %, ce qui les place en dessous des cellules monocristallines en termes d'efficacité. Toutefois, leur principal avantage réside dans leur coût de production plus faible, ce qui en fait une solution économiquement attractive pour de nombreuses installations photovoltaïques [13].



Figure 4.2 Cellules solaires de Silicium polycristallin.

c. Cellules à couches minces (Thin-Film Solar Cells)

Les cellules photovoltaïques à couches minces constituent une technologie alternative aux cellules classiques en silicium cristallin. Elles sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs tels que le tellure de cadmium (CdTe) ou les composés CIGS (Cuivre–Indium–Gallium–Sélénium).

Ces cellules se distinguent par plusieurs caractéristiques :

- Légèreté et flexibilité : leur structure très fine permet de les intégrer sur des supports variés, y compris des surfaces courbes ou irrégulières.
- Rendement modéré : leur efficacité est généralement comprise entre 10 et 12 %, ce qui reste inférieur à celle des cellules en silicium cristallin.
- Grande adaptabilité : elles sont particulièrement adaptées aux applications spécifiques, telles que les objets portables, les façades de bâtiments ou les dispositifs nécessitant une intégration esthétique ou mécanique particulière.



Figure 4.3 Cellule solaire à couches minces.

d. Cellules photovoltaïques à haute performance

Les cellules photovoltaïques à haute performance reposent sur des technologies avancées visant à dépasser les limites de rendement des cellules classiques au silicium. Parmi ces technologies, on retrouve notamment :

- Les cellules à hétérojonction,
- Les cellules tandem,
- Les cellules à base de pérovskites, etc.

Ces technologies innovantes permettent d'atteindre des rendements très élevés, certaines dépassant 25 % en laboratoire, ce qui représente un progrès significatif par rapport aux cellules photovoltaïques traditionnelles.

4.8.2.1.3 Fonctionnement détaillé des cellules photovoltaïques

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque repose sur plusieurs étapes fondamentales :

- **Absorption des photons**

Les photons issus du rayonnement solaire frappent la surface de la cellule photovoltaïque. Leur énergie permet d'arracher des électrons au matériau semi-conducteur.

- **Génération de tension**

Au niveau de la jonction PN, les électrons libérés sont séparés de leurs trous. Cette séparation crée un champ électrique interne, responsable de la mise en tension de la cellule.

- **Circulation du courant**

Les électrons se déplacent ensuite à travers un circuit externe, générant un courant continu (DC) exploitable pour alimenter des charges électriques.

- **Conversion en courant alternatif**

Comme la plupart des équipements domestiques fonctionnent en courant alternatif (AC), un onduleur (inverter) est utilisé pour convertir le courant continu produit par les panneaux en courant alternatif compatible avec les installations électriques des habitations [14].

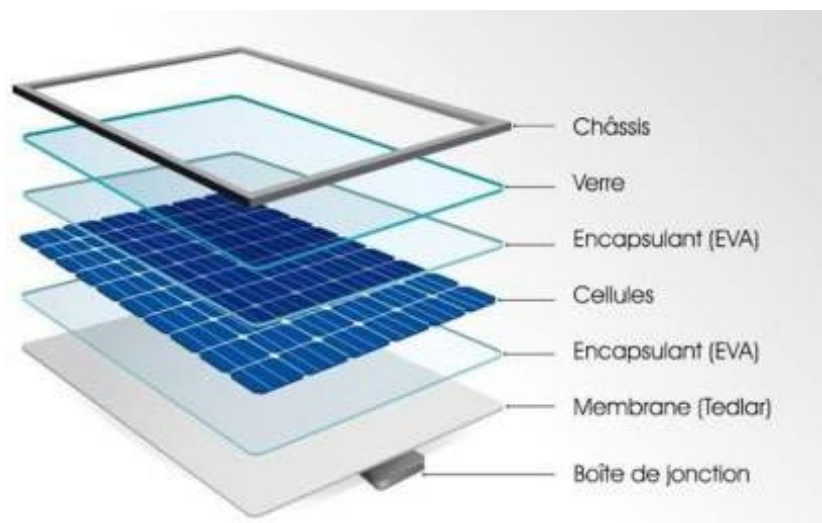


Figure 4.4 les composantes de cellules photovoltaïques.

4.8.2.2 Cellules solaires thermiques (Concentrated Solar Power – CSP)

4.8.2.2.1 Définition des cellules solaires thermiques

Les cellules solaires thermiques, ou plus précisément les systèmes de production d'électricité solaire thermique concentrée (CSP – Concentrated Solar Power), constituent une technologie permettant de convertir l'énergie solaire en électricité de manière indirecte. Le principe consiste à concentrer le rayonnement solaire à l'aide de miroirs afin de produire une chaleur élevée. Cette chaleur est ensuite utilisée pour générer de la vapeur, laquelle entraîne une turbine couplée à un alternateur produisant de l'électricité [15].

4.8.2.2.2 Principaux types de systèmes solaires thermiques (CSP)

Les technologies CSP se déclinent en plusieurs configurations, chacune adaptée à des besoins et des puissances spécifiques :

a. Concentrateur cylindro-parabolique (Parabolic Trough)

- Utilise des miroirs incurvés en forme de parabole pour concentrer les rayons solaires sur un tube absorbeur contenant un fluide caloporteur (souvent une huile thermique).
- Le fluide est chauffé jusqu'à environ 400 °C.
- Cette chaleur permet ensuite de produire de la vapeur destinée à actionner une turbine.

b. Tour solaire centrale (Solar Power Tower)

- Repose sur un champ d'héliostats (miroirs orientables) qui concentrent la lumière solaire vers un récepteur situé au sommet d'une tour.
- Le récepteur chauffe un fluide, généralement du sel fondu, à des températures dépassant 500 °C.
- Ce fluide sert ensuite à produire de la vapeur pour la génération d'électricité.

c. Concentrateur parabolique en disque (Parabolic Dish)

- Utilise un grand disque parabolique focalisant la lumière solaire en un point précis.
- La chaleur obtenue alimente un moteur Stirling, qui convertit directement l'énergie thermique en énergie mécanique puis en électricité.
- Cette technologie est particulièrement adaptée aux petites installations isolées [16].

d. Four solaire (Solar Furnace)

- Utilise un ensemble de miroirs pour concentrer les rayons solaires sur un point focal extrêmement réduit.
- Permet d'atteindre des températures très élevées, utilisées principalement pour la recherche scientifique ou pour la production d'électricité à petite échelle.

4.8.2.2.3 Avantages des systèmes solaires thermiques pour la production d'électricité

Les systèmes CSP présentent plusieurs atouts majeurs :

- Très haute efficacité dans les régions bénéficiant d'un fort ensoleillement, comme les zones désertiques.
- Possibilité de stockage thermique, notamment grâce aux sels fondus, permettant de produire de l'électricité même en l'absence de soleil (la nuit ou par temps couvert).
- Adaptation aux grandes centrales solaires, ce qui en fait une solution pertinente pour la production d'électricité à grande échelle.



Figure 4.5 Cellules solaires thermiques.

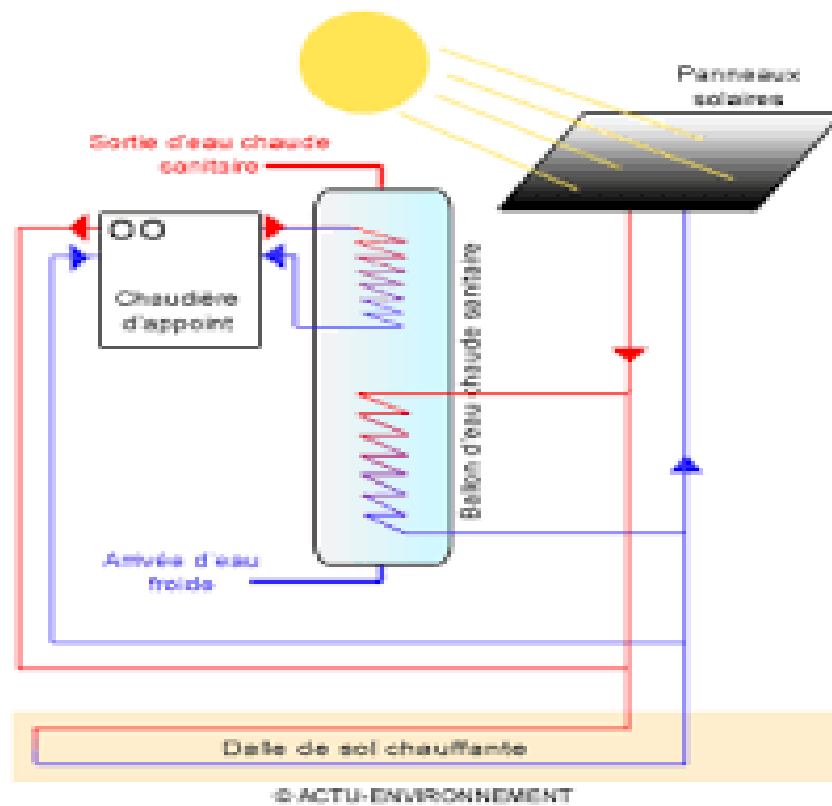


Figure 4.6 Plants de Cellules solaires thermiques.

Chapitre 05

Calculs des apports thermiques

5.1 Le Travail

Dans ce travail pratique, nous allons effectuer les calculs appliqués des apports thermiques pour un bâtiment administratif de services. Ce bâtiment est composé d'un rez-de-chaussée comprenant sept pièces, un hall, et présentant onze parois extérieures. Il est situé en Algérie, dans la région de In Salah, au sud du pays, ce qui implique des conditions climatiques spécifiques à prendre en compte dans les calculs.

Pour la réalisation de cette étude, nous nous appuierons sur les prescriptions des Documents Techniques Réglementaires (DTR).

5.2 Documents Techniques Réglementaires (DTR)

Le DTR (Document Technique Réglementaire) est une norme officielle algérienne qui regroupe un ensemble de règles techniques obligatoires à appliquer dans différents domaines liés au bâtiment, notamment : la construction, l'énergie, l'isolation, les installations électriques, les réseaux de fluides, etc.

Ces documents sont élaborés par les autorités compétentes, en particulier le CTC (Centre de Contrôle Technique de la Construction), afin de garantir :

- La qualité des ouvrages,
- La sécurité des usagers,
- La performance énergétique des bâtiments,
- La conformité aux exigences réglementaires nationales.

Les DTR constituent une référence essentielle pour :

- Les bureaux d'études,
- Les architectes et les ingénieurs,
- Les entreprises de construction,
- Les organismes de contrôle et d'inspection.

Dans le cadre de ce travail, les calculs des apports thermiques seront donc réalisés conformément aux prescriptions en vigueur définies par les DTR applicable

5.3 Classification des DTR selon leurs domaines d'application

Les Documents Techniques Réglementaires (DTR) sont répartis en plusieurs familles, chacune couvrant un domaine spécifique lié à la conception, à la réalisation et à la sécurité des bâtiments.

Les principales catégories sont:

- **DTR C2 – Structure et stabilité des bâtiments**

Cette famille regroupe les exigences techniques relatives à la conception et à la réalisation des structures porteuses, ainsi qu'à la stabilité générale des constructions.

- **DTR C3 – Performance thermique et acoustique**

Elle concerne les règles liées à :

- L'isolation thermique,
- L'isolation acoustique,
- La ventilation,
- La maîtrise des déperditions,
- L'étanchéité à l'air.

L'objectif est d'assurer un confort optimal et une efficacité énergétique élevée.

- **DTR C4 – Installations électriques**

Cette catégorie définit les normes de **conception**, d'**installation** et de **sécurité** des réseaux électriques dans les bâtiments.

- **DTR C5 – Réseaux de plomberie et d'assainissement**

Elle traite des prescriptions techniques relatives :

- Aux installations d'alimentation en eau,
- Aux systèmes d'évacuation,
- Aux dispositifs d'assainissement.

- **DTR G – Installations de gaz**

Cette famille couvre les règles de mise en œuvre des installations de gaz, incluant :

- Les exigences de sécurité,
- Les matériaux autorisés,
- Les méthodes d'exécution.

- **DTR S – Sécurité incendie et prévention des risques**

Elle regroupe les dispositions visant à :

- Prévenir les incendies,
- Organiser l'évacuation,
- Réduire les risques dans les bâtiments grâce à des systèmes adaptés et des

mesures de protection.

5.4 Documents techniques de la famille C3 relatifs à la performance énergétique et acoustique

La famille C3 regroupe un ensemble de documents techniques réglementaires portant sur les exigences de performance énergétique et d'isolation acoustique des bâtiments. Ces documents définissent les principes, méthodes et critères nécessaires pour assurer :

- Une isolation efficace,
- Une ventilation adéquate,
- Une maîtrise optimale des flux thermiques.

Les documents de cette famille comprennent :

a. DTR C3.1 – Isolation thermique par l'intérieur

Ce document précise les exigences techniques relatives à la mise en œuvre de l'isolation thermique intérieure, incluant :

- Les matériaux admissibles,
- Les méthodes d'application,
- Les performances attendues.

b. DTR C3.2 – Déperditions thermiques (chauffage)

Il traite des règles de calcul et des paramètres à considérer pour évaluer les déperditions thermiques liées aux systèmes de chauffage, dans le but d'optimiser la consommation énergétique.

c. DTR C3.3 – Ventilation naturelle et mécanique

Ce texte encadre les principes de conception et d'installation des dispositifs de ventilation, qu'ils soient :

- Naturels,
- Mécaniques.

L'objectif est d'assurer une qualité d'air satisfaisante et un confort thermique adéquat.

d. DTR C3.4 – Apports thermiques (climatisation)

Ce document définit les critères relatifs aux apports thermiques internes et externes influençant les besoins en climatisation, ainsi que les méthodes permettant de maîtriser les charges thermiques.

e. DTR C3.5 – Isolation thermique répartie (ITE)

Il établit les règles techniques concernant l'isolation thermique par l'extérieur (ITE), notamment :

- Les systèmes utilisés,
- Les conditions de mise en œuvre,
- Les performances thermiques requises.

f. DTR C3.6 – Étanchéité à l'air

Ce document précise les exigences liées à l'**étanchéité à l'air** de l'enveloppe du bâtiment, visant à :

- Réduire les infiltrations parasites,
- Améliorer l'efficacité énergétique globale.

5.5 Contenu du DTR C3.4 – Apports thermiques (DTR C3.4 c'est l'important dans notre travail)

Le document **DTR C3.4** définit les méthodes et critères permettant d'évaluer les apports thermiques dans les bâtiments. Il sert de guide technique pour les ingénieurs, bureaux d'études et installateurs.

Il Ya des Principaux éléments du document :

a. Définition des apports thermiques

Le texte décrit les différentes sources de chaleur et leur impact sur les besoins en climatisation.

b. Méthodes de calcul

Le DTR précise les méthodes normalisées pour calculer :

- Les apports solaires selon l'orientation et le type de vitrage,
- Les apports par transmission à travers l'enveloppe,
- Les apports internes (occupants, appareils),
- Les apports dus à la ventilation et aux infiltrations.

c. Paramètres à prendre en compte

Le document impose la considération de :

- La zone climatique,
- L'orientation du bâtiment,
- Les matériaux de construction,
- Les coefficients de transmission thermique (U),
- Les facteurs solaires (g),
- Les débits de ventilation,

- Les conditions de confort recommandées.

d. Exigences de performance

Le DTR fixe des objectifs visant à :

- Réduire les apports thermiques,
- Améliorer l'efficacité énergétique,
- Optimiser la conception des systèmes de climatisation.

e. Recommandations techniques

Le document propose des solutions pour limiter les charges thermiques :

- Protections solaires (stores, brise-soleil),
- Vitrages performants,
- Isolation renforcée,
- Étanchéité à l'air,
- Ventilation contrôlée.

5.6 Importance du DTR C3.4 dans notre travail

L'utilisation du DTR C3.4 permet de :

- Analyser précisément les apports thermiques du bâtiment étudié,
- Dimensionner correctement le système de climatisation,
- Optimiser la consommation énergétique,
- Respecter les exigences réglementaires,
- Garantir un confort thermique durable.

Ainsi, le DTR C3.4 constitue un outil fondamental pour toute étude thermique ou projet de climatisation.

5.7 Notion d'apports thermiques (charges thermiques)

Les apports thermiques, également appelés charges thermiques, représentent l'ensemble des quantités de chaleur qui pénètrent dans un espace intérieur et que le système de climatisation doit compenser pour maintenir une température de confort.

Ces apports proviennent de trois grandes catégories :

a. Apports externes

- Rayonnement solaire à travers les vitrages,
- Transmission thermique à travers les parois, toitures et planchers,
- Infiltrations d'air extérieur,

- Conditions climatiques et orientation du bâtiment.

b. Apports internes

- Occupants (chaleur corporelle),
- Équipements électriques et électroniques,
- Éclairage,
- Machines et appareils divers.

c. Apports liés à la ventilation

- Air neuf introduit pour assurer la qualité de l'air,
- Air repris et recyclé.

Les charges thermiques déterminent directement :

- La puissance frigorifique nécessaire,
- La consommation énergétique du système,
- Le niveau de confort thermique,
- La performance globale de l'installation.

Une estimation incorrecte peut entraîner un surdimensionnement (coût élevé, consommation excessive) ou un sous-dimensionnement (incapacité à refroidir correctement).

5.8 La création des calculs

5.8.1 Les lois principales

Les apports calorifiques sensibles A_s et latents A_l :

$$A_s = APO + AV + AI_s + AINF_s \text{ [W]}$$

$$A_l = AI_l + AINF_l \text{ [W]}$$

- APO (en W) représente les apports par les parois opaques.
- AV (en W) représente les apports à travers les parois vitrées.
- AI_s et AI_l (en W) représentent les parties sensibles et latentes des apports internes.
- $AINF_s$ et $AINF_l$ (en W) représentent les parties sensibles et latentes des apports dus aux infiltrations d'air.

Dans le cas où de l'air neuf s'introduit directement dans le local (sans passer par l'installation de climatisation, par le biais d'un dispositif de ventilation par exemple), il y a lieu d'en tenir compte dans le calcul des apports calorifiques.

Les apports calorifiques effectifs sensibles AE_s et latents AE_l :

$$AE_s = (C_{\Delta as} \times A_s) + (BF \times AREN_s) \text{ [W]}$$

$$AE_l = (C_{\Delta al} \times A_l) + (BF \times AREN_l) \text{ [W]}$$

- A_s (en W) représente les gains sensibles.

- A_l (en W) représente les gains latents.

- $AREN_s$ et $AREN_l$ (en W) représentent les parties sensibles et latentes des apports dus à la ventilation des locaux.

- BF ou facteur de by-pass exprime la partie de l'air extérieur (air neuf) non traité par l'installation de climatisation (imperfection de l'appareil de traitement), et qui vient au local sans modifications.

La valeur de BF représente une caractéristique l'équipement donnée dans les catalogues des constructeurs.

Les apports calorifiques totaux sensibles AT_s et latents AT_l :

$$AT_s = (C_{\Delta as} \times A_s) + AREN_s \text{ [W]}$$

$$AT_l = (C_{\Delta al} \times A_l) + AREN_l \text{ [W]}$$

- A_s (en W) représente les gains sensibles.

- A_l (en W) représente les gains latents.

- $C_{\Delta as}$ et $C_{\Delta al}$ sont des coefficients majorateurs des gains sensibles et latents

- $AREN_s$ et $AREN_l$ (en W) représentent les apports sensibles et latents dus à la ventilation des locaux.

Les apports calorifiques sont utilisés pour déterminer le débit d'air soufflé dans les locaux climatisés. Les apports calorifiques effectifs sont utilisés pour déterminer le débit d'air nécessaire (c'est à dire le débit d'air traité par la batterie). La détermination des apports calorifiques effectifs permet de dresser un bilan comparatif du prix de revient et du coût d'exploitation lorsqu'une option devra être prise pour le choix d'un facteur de by-pass pour une installation déterminée. Cet aspect n'est pas traité par le présent DTR. La détermination des apports totaux permet d'opter pour l'équipement adéquat.

Les apports de chaleur à travers une paroi opaque à un instant t, $APO(t)$:

$$APO(t) = 1,2 \times K_{été} \times S_{int} \times \Delta t_e(t) \text{ [W]}$$

- 1,2 (sans dimension) est un coefficient majorateur tenant compte des apports latéraux linéiques (à travers les ponts thermiques).

- $K_{\text{été}}$ (en $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) est le coefficient de transmission en partie courante de la paroi considérée pour l'été.
- S_{int} (en m^2) est la surface intérieure totale de la paroi considérée ; pour les toitures en pente, on prendra la projection horizontale de la surface.
- $\Delta t_e(t)$ (en $^\circ\text{C}$) est la différence équivalente de température à l'heure t .

En attendant de disposer de règles de calcul détaillées pour la détermination des apports à travers les ponts thermiques en période d'été, on se contentera de faire une estimation forfaitaire de 20% comme proposé dans le texte. En d'autres termes, les formules données pour le calcul des ponts thermiques en période d'hiver (DTR C 3-2) ne peuvent être utilisées ici.

Les apports APO à travers une paroi en contact avec le sol:

$$\text{APO} = K_{\text{été}} \times S_{\text{app}} \times (TS_m - TS_b) \text{ [W]}$$

- $K_{\text{été}}$ (en $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) est le coefficient de transmission de la paroi calculé comme si la paroi était en contact avec l'extérieur.
- S_{app} (en m^2) est la surface de la zone d'apport.
- TS_b (en $^\circ\text{C}$) est la température du local conditionné.
- TS_m (en $^\circ\text{C}$) est la température moyenne sèche de l'air extérieur.

Les gains à travers les parois vitrées extérieures $AV(t)$ sont donnés par :

$$AV(t) = AVT(t) + AVE(t) \text{ [W]}$$

- $AVT(t)$ (en W) représente les gains dus au gradient de température à travers les parois vitrées.
- $AVE(t)$ (en W) représente les gains dus au rayonnement solaire à travers les parois vitrées.

Les gains dus au gradient de température $AVT(t)$ à travers les parois vitrées extérieures:

$$AVT(t) = 1,2 \times K_{\text{été}} \times S_{\text{ouv}} \times (TS_e(t) - TS_b) \text{ [W]}$$

- 1,2 (sans dimension) est un coefficient majorateur tenant compte des apports à travers les ponts thermiques.
- $K_{\text{été}}$ (en $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) est le coefficient de transmission en partie courante de la paroi considérée.
- S_{ouv} (en m^2) est la surface de l'ouverture dans la paroi opaque.
- $TS_e(t)$ (en $^\circ\text{C}$) est la température extérieure sèche à l'heure t .
- TS_b (en $^\circ\text{C}$) est la température intérieure de base.

Les gains dus au rayonnement solaire à travers les parois vitrées extérieures AVE(t) :

$$AVE(t) = [SV_{ens} \times It + (SV - SV_{ens}) \times Id] \times FS \times N_{PVI}(t) \text{ [W]}$$

- SV (en m²) est la surface totale vitrée.
- SV_{ens} (en m²) est la surface vitrée ensoleillée.
- SV - SV_{ens} (en m²) est la surface vitrée à l'ombre.
- It (en W/m²) est le rayonnement total maximal réel.
- Id (en W/m²) est le rayonnement diffus maximal réel.
- N_{PVI}(t) représente le coefficient d'amortissement relatif aux gains par ensoleillement à travers les parois vitrées à l'heure t considérée.
- FS est le facteur solaire du vitrage.

Le rayonnement total maximal réel It:

$$It = (C_{cadre} \times C_{limp} \times C_{alt} \times C_{ros}) \times It,b$$

Le rayonnement diffus maximal réel Id :

$$Id = (C_{cadre} \times C_{limp} \times C_{alt} \times C_{ros}) \times Id,b$$

- (C_{cadre} est un coefficient tenant compte de la nature du cadre;
- C_{limp} est un coefficient tenant compte de la limpidité de l'atmosphère ;
- C_{alt} est un coefficient tenant compte de l'altitude;
- C_{ros} est un coefficient tenant compte de la valeur du point de rosée

$$AINF_s(t) = 0,320 \times q_{vinf} \times (TS_e(t) - TS_b) \text{ [W]}$$

$$q_{vinf} = \sum (q_{vo_{inf,i}} \times S_{ouv,i}) \text{ [m}^3/\text{h]}$$

Les gains sensibles

$$A_s = APO + AV + AI_s + AINF_s \text{ [W]}$$

$$AINF_{l=0}$$

$$AI_l = 0$$

$$A1 = AI_l + AINF_{l=0} \text{ [W]}$$

Les gains sensibles dus au renouvellement de l'air AREN_s, et dus aux infiltrations :

AINF_s Sont donnés par les formules données ci-après :

$$AREN_s(t) = 0,320 \times q_{van} \times (TS_e(t) - TS_b) \text{ [W]}$$

$$AINF_s(t) = 0,320 \times q_{vinf} \times (TS_e(t) - TS_b) \text{ [W]}$$

- $0,320$ (en $J/m^3 \cdot ^\circ C$) représente le produit de la chaleur spécifique de l'air ($1004 J/ kg \cdot ^\circ C$) par la masse volumique de l'air ($1,15 kg/m^3$) et par un facteur de conversion ($1/3600$).
- q_{van} (en m^3/h) représente le débit d'air neuf.
- q_{vinf} (en m^3/h) représente le débit dû aux infiltrations.
- TS_e (en $^\circ C$) représente la température sèche de l'air extérieur.
- TS_b , (en $^\circ C$) représente la température sèche de l'air intérieur.

La courbe type des variations de la température sèche de l'air extérieur, pour les mois de Juillet et d'Août:

$$TS_e(t) = TS_b - [C_{TS}(t) \times Eb]$$

- $TS_e(t)$ (en $^\circ C$) représente la température sèche de l'air extérieur à l'heure t .
- TS_b , (en $^\circ C$) représente la température sèche de base de l'air extérieur.
- $C_{TS}(t)$ représente un coefficient correcteur.
- Eb (en $^\circ C$) représente l'écart diurne de base.

Vérification réglementaire :

La somme des apports calorifiques par les parois vitrées et les parois opaques aériennes doit vérifier au mois de Juillet à 15 h TSV, pour une température sèche intérieure de $27^\circ C$, la relation ci-après :

$$APO(15 h) + AV(15 h) \leq 1,05 \times A_{réf}(15 h) [W]$$

- APO (en W) désigne les apports calorifiques à travers les parois opaques aériennes.
- AV (en W) désigne les apports calorifiques à travers les parois vitrées.
- $A_{réf}$ (en W) désigne les apports calorifiques de référence.

Les termes de la formule 1.7 ne tiennent pas compte des parois en contact avec le sol, et des parois séparant deux locaux conditionnés.

Les apports calorifiques de référence $A_{réf}$:

$$A_{réf} = A_{réf,PH} + A_{réf,PV} + A_{réf,PVI} [W]$$

Les Apports de référence des parois opaques horizontales :

$$A_{\text{réf,PH}} = \Sigma (a \times S_{\text{int}} \times \Delta T_{\text{réf,PH}}) \text{ [W]}$$

Où :

- a (en W/m². °C) est un coefficient lié à la nature de la construction et fonction de la zone climatique ; la valeur d'a est donnée.
- S_{int} (en m²) désigne la surface de la paroi horizontale comptée de l'intérieur.
- ΔT_{réf,PH} (en °C) est la différence de température de référence pour les parois horizontales.

Les Apports de référence des parois opaques verticales :

$$A_{\text{réf,PV}} = \Sigma (c \times S_{\text{int}} \times \Delta T_{\text{réf,PV}}) \text{ [W]}$$

Où :

- c (en W/m². °C) est un coefficient lié à la nature de la construction et fonction de la zone climatique.
- S_{int} (en m²) désigne la surface de la paroi verticale comptée de l'intérieur.
- ΔT_{réf,PV} (en °C) est la différence de température de référence pour la paroi opaque verticale.

- Apports de référence des parois vitrées :

$$A_{\text{réf,PVI}} = AVE_{\text{réf}} + AVT_{\text{réf}} \text{ [W]}$$

Les apports de référence dus à l'ensoleillement à travers une paroi vitrée AVE_{réf} :

$$AVE_{\text{réf}} = [SV_{\text{ens}} \times It + (SV - SV_{\text{ens}}) \times Id] FS_{\text{réf}} \times N_{\text{PVI,réf}} \text{ [W]}$$

Où :

- SV (en m²) est la surface totale vitrée.
- SV_{ens} (en m²) est la surface vitrée ensoleillée à 15 h TSV.
- It (en W/m²) est le rayonnement total maximal réel pour l'orientation et la latitude considérées.
- Id (en W/m²) est le rayonnement diffus maximal réel.
- FS_{réf} est le facteur solaire de référence ; FS_{réf} est égal à :
 - 0,15 pour les locaux à usage d'habitation et d'hébergement,
 - 0,38 pour les locaux à usage de bureaux.
- N_{PVI,réf} est le coefficient d'amortissement relatif aux gains de référence des parois vitrées pour l'orientation considérée.

Les apports de référence dus au gradient de température à travers une paroi vitrée

$AVT_{\text{réf}}$:

$$AVT_{\text{réf}} = e' \times S_{\text{ouv}} \times \Delta T_{\text{S}_{\text{réf,PVI}}} \text{ [W]} \text{ où :}$$

- e' (en $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) est un coefficient relatif à la nature des locaux ; la valeur de e' (en $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) est prise égale à :

- 4,2 pour les locaux à usage d'habitation et d'hébergement.
- 5,4 pour les locaux à usage de bureaux.

- S_{ouv} (en m^2) est la surface d'ouverture dans le mur.

- $\Delta T_{\text{S}_{\text{réf,PVI}}}$ (en $^\circ\text{C}$) est la différence de température de référence des parois vitrées.

5.8.2 Données de base du bâtiment

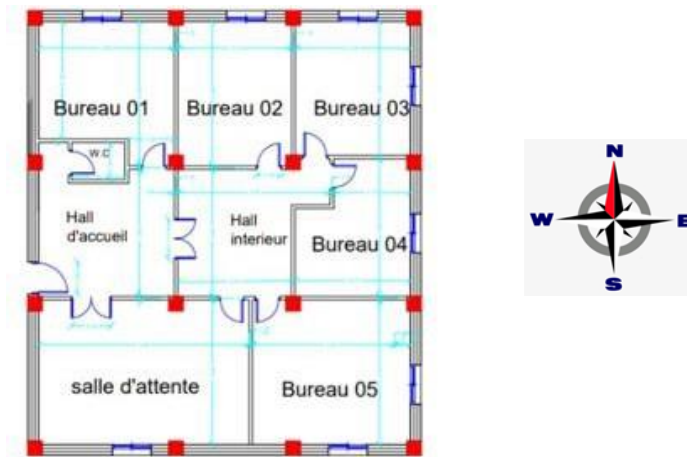


Figure 5.1 Plan du bâtiment.

Tableau 5.1 Les volumes de bâtiment.

Les pièces	L'élément
1	Salle d'attente
2	Hall d'accueil
3	Bureau de comptabilité
4	Bureau des archives
5	Bureau technique
6	Salle multifonction (impression, repos)
7	Bureau du directeur
8	Hall d'entrée
9	Toilette
9	total

Tableau 5.2 Les surfaces des parois extérieures.

N°	Surface (m²)
1	10.5594
2	5.3214
3	10.5594
4	7.1214
5	5.2052
6	5.4912
7	7.4074
8	7.1214
9	7.4074
10	8.1982
11	12.4696
totale	86.862

Et la surfaces de porte est 1.80 m et la surface d chaque fenêtre est 3.14 m

Tableau 5.3 Les surfaces des des planchers des volumes.

Les pieces	L'élément	La surface (m²)
1	Salle d'attente	24.17
2	Hall d'accueil	12.28
3	Bureau de comptabilité	15.60
4	Bureau des archives	18.09
5	Bureau technique	12.64
6	Salle multifonction (impression, repos)	12.65
7	Bureau du directeur	13.09
8	Hall d'entrée	11.55
9	Toilette	1,5
/	total	121.57

Tableau 5.4 Les périmètres des volumes.

Pièce	p (m)
Salle d'accueil	20.1
Hall d'accueil	9.86
Bureau de comptabilité	15.86
Bureau des archives	14.64
Bureau technique	14.3
Salle multifonction (impression, repos)	14.32
Bureau du directeur	17.12
Hall d'entrée	13.62

Deuxièmement : Valeurs de K**Formule générale**

$$1/k = R + 1/h_i + 1/h_e \text{ avec } R = R_t \text{ [m}^2 \cdot \text{°C/W]}$$

Calcul des résistances et du K**Pour les murs extérieurs**

$$R = e / \lambda \text{ [m}^2 \cdot \text{°C/W]}$$

$$\text{Couche 1 : Enduit ciment } R = 0,015 / 1,4 = 0,01$$

$$\text{Couche 2 : Brique rouge pleine } R = 0,10 / 0,80 = 0,12$$

$$\text{Couche 3 : Air statique rempli de polystyrène } R = 0,10 / 0,40 = 0,25$$

$$\text{Couche 4 : Brique rouge pleine } R = 0,10 / 0,80 = 0,12$$

$$\text{Couche 5 : Enduit ciment } R = 0,015 / 1,4 = 0,01$$

$$\text{Total } R = 0,52 \text{ [m}^2 \cdot \text{°C/W]}$$

$$1/k = 0,52 + 0,17 = 0,69 \rightarrow k = 1 / 0,69 = 1,44 \text{ [m}^2 \cdot \text{°C/W]}$$

Pour les piliers

$$\text{Couche 1 : Enduit ciment } R = 0,015 / 1,4 = 0,01$$

$$\text{Couche 2 : Béton } R = 0,4 / 1,05 = 0,38$$

$$\text{Couche 3 : Enduit ciment } R = 0,015 / 1,4 = 0,01$$

$$\text{Total } R = 0,40 \text{ [m}^2 \cdot \text{°C/W]}$$

$$1/k = 0,40 + 0,17 = 0,57 \rightarrow k = 1 / 0,57 = 1,75 \text{ [m}^2 \cdot \text{°C/W]}$$

Pour la toiture

Couche 1 : Béton $R = 0,04 / 1,05 = 0,038$

Couche 2 : Lourdine $R = 0,16 / 0,038 = 4,21$

Couche 3 : Enduit ciment $R = 0,015 / 1,4 = 0,010$

Total $R = 4,25 \text{ [m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W]}$

$1/k = 4,25 + 0,22 = 4,47 \rightarrow k = 1 / 4,47 = 0,22 \text{ [m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W]}$

Pour le plancher bas

Couche 1 : Dalle d'assise $R = 0,2 / 1,75 = 0,11$

Couche 2 : Barbotine $R = 0,02 / 1,4 = 0,01$

Couche 3 : Mortier $R = 0,05 / 1,15 = 0,04$

Total $R = 0,16$

$1/k = 0,16 + 0,22 = 0,38 \rightarrow k = 1 / 0,38 = 2,63 \text{ [m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W]}$

Pour les fenêtres

$1/k = 1/K_{vn} + r_{rid} + r_{occ} \text{ [m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W]}$

$1/k = 1/5,8 + 0,025 + 0,030 + 0 = 0,22 \rightarrow k = 1 / 0,22 = 4,54 \text{ [m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W]}$

Pour la porte

D'après le DTR : $k = 5,8 \text{ [m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W]}$

Charge thermique interne

Le document suivant présente les charges thermiques sensibles et latentes dans chaque pièce d'un bâtiment administratif, en tenant compte des apports des appareils de bureau et des personnes présentes, selon les valeurs de référence.

Tableau 5.5 Charges thermiques par volume – Administration (Appareils + Occupants).

Pièce	Appareils (W)	Occupants (n)	Occupants Sens. (W)	Occupants Lat. (W)	Total Sensible (W)
Salle d'attente	1350	3	213	165	1563
Hall d'accueil	450	1	71	60	525
Bureau de comptabilité	826	1	71	60	901
Bureau des archives	450	1	71	60	525
Bureau technique	450	1	71	60	525
Salle multifonction (impression, repos)	900	1	71	60	975
Bureau du directeur	826	1	71	60	901
Hall d'entrée	0	1	71	60	75

Remarque : Les charges latentes totales proviennent uniquement des occupants, les appareils de bureau ne générant que des charges sensibles.

Apports thermiques dus à l'éclairage

Les gains thermiques sensibles dus à l'éclairage ont été calculés à partir de la formule :

$$AI = \Sigma(W_n \times C_{me} \times C_{cr})$$

où :

- $W_n = 40$ W (puissance d'un tube fluorescent typique),
- $C_{me} = 1.25$ (coefficient de majoration pour tubes fluorescents),
- $C_{cr} = 1$ (éclairage non raccordé à un système d'extraction d'air).

Tableau 5.6 Les apports thermiques dus à l'éclairage.

Pièce	Nombre de lampes	Apport thermique (W)
Salle d'attente	2	32
Hall d'accueil	1	16
Bureau de comptabilité	1	16
Bureau des archives	1	16
Bureau technique	1	16
Salle multifonction	1	16
Bureau du directeur	2	32
Hall d'entrée	1	16

Total des apports thermiques dus à l'éclairage: 500 W (les valeurs le tableau 5.10 de DTR 3 4).

Tableau 5.7 Les valeurs retenues : (la source est DTR 3 4).

L'acronyme	Source	Valeur
TS_i	Température intérieure du bâtiment	26 C°
TS_m	Tableau 2.1	36,5 C°
$TS_{b,e}$	Tableau 2.1	48 C°
$K_{été}$	Calculé	1,81
Cl_{nc}	Tableau 3.6	4
$TS_{b,i}$	Température de la pièce	26 C°
(h 15)	Tableau 2.2	0 Donc $TS_e = TS_b$

E _b	Tableau 2.1	16.5 C°
$TS_{b,e}$	Page 24 dans DTR 3 4	48 C°
K _{vn}	Tableau 3.2 dans DTR 3 2	5,8
C _{cadre}	Page 27 dans DTR 3 4	1,17
C _{limp}	Page 27 dans DTR 3 4	1
C _{alt}	Page 27 dans DTR 3 4	1,0068
C _{rose}	Page 27 dans DTR 3 4, Tableau 2.5	1,19
FS	Tableau 4.7	0,60
HS _{b,e}	Tableau 2.1	5,5
HS _{b,i}	Tableau 2.6	50
BF	Tableau 1.1	0.25
C _{Δas}	Tableau 1.2	1,05
C _{Δal}	Tableau 1.2	1,00
C _{Δte}	Tableau 3.4	11,9
qvo _{inf,i}	Porte et fenêtre, Tableau 6.5	21,7
It,b(40)	Tableau 2.4	516
alfa	Tableau 3.5	0,50
a	Tableau 1.3	2,40
c	Tableau 1.5	1,4
'e	Page 22 dans DTR 3 4	5,4
ΔTS _{réf,PH}	Tableau 1.4	12,09
ΔTS _{réf,PVI}	Tableau 1.8	21
N _{PVI,réf}	Tableau 1.7	ouest 0.61 est 0.21 sud 0.65 nord 0.98
Masse) volumique de la (brique	ANNEXE 2	2000
qve _{max}	Tableau 6.2	30

$q_{ve_{min}}$	Tableau 6.1	130
$q_{V_{an}}$	Calculée en fonction des valeurs précédentes	113,33

7.3. Calculs préliminaires

Les valeurs de $\Delta t_e(t)$:

$$\Delta t_e(t) = \Delta t_{es}(t) + C_{\Delta t_e} + \frac{\alpha}{0,9} + [\Delta t_{em}(t) - \Delta t_{es}] \times \frac{I_{t,b}}{I_{t,b}(40)} \text{ (en } ^\circ\text{C)}$$

Volume 1

Paroi à ouest

$$\Delta t_e(t) = 0 + 11.9 + \frac{0.50}{0,9} + [5.5 - 0] \times \frac{515.4}{516} = 17.94 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Paroi à sud

$$\Delta t_e(t) = 5.5 + 11.9 + \frac{0.50}{0,9} + [0 - 5.5] \times \frac{79}{217} = 15.95 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La toiture

$$\Delta t_e(t) = 0 + 11.9 + \frac{0.50}{0,9} + [15.6 - 0] \times \frac{780}{734} = 29.03 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Volume 2

Paroi à ouest

$$\Delta t_e(t) = 0 + 11.9 + \frac{0.50}{0,9} + [5.5 - 0] \times \frac{515.4}{516} = 17.94 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Porte à ouest

$$\Delta t_e(t) = 0 + 11.9 + \frac{0.50}{0,9} + [5.5 - 0] \times \frac{515.4}{516} = 17.94 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La toiture

$$\Delta t_e(t) = 0 + 11.9 + \frac{0.50}{0,9} + [15.6 - 0] \times \frac{780}{734} = 29.03 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Volume 3

Paroi à ouest

$$\Delta t_e(t) = 0 + 11.9 + \frac{0.50}{0,9} + [5.5 - 0] \times \frac{515.4}{516} = 17.94 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Paroi à nord

$$\Delta t_e(t) = 0.5 + 11.9 = 12.40 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La toiture

$$\Delta t_e(t) = 0 + 11.9 + \frac{0.50}{0,9} + [15.6 - 0] \times \frac{780}{734} = 29.03 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Volume 4

Paroi à nord

$$\Delta t_e(t) = 0.5 + 11.9 = 12.40 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La toiture

$$\Delta t_e(t) = 0 + 11.9 + \frac{0.50}{0.9} + [15.6 - 0] \times \frac{780}{734} = 29.03 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Volume 5

Paroi à est

$$\Delta t_e(t) = 10.6 + 0 + \frac{0.50}{0.9} + [0 - 10.6] \times \frac{514.5}{516} = 0.56 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Paroi à nord

$$\Delta t_e(t) = 0.5 + 11.9 = 12.40 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La toiture

$$\Delta t_e(t) = 0 + 11.9 + \frac{0.50}{0.9} + [15.6 - 0] \times \frac{780}{734} = 29.03 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Volume 6

Paroi à est

$$\Delta t_e(t) = 10.6 + 0 + \frac{0.50}{0.9} + [0 - 10.6] \times \frac{514.5}{516} = 0.56 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La toiture

$$\Delta t_e(t) = 0 + 11.9 + \frac{0.50}{0.9} + [15.6 - 0] \times \frac{780}{734} = 29.03 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Volume 7

Paroi à est

$$\Delta t_e(t) = 10.6 + 0 + \frac{0.50}{0.9} + [0 - 10.6] \times \frac{514.5}{516} = 0.56 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Paroi à sud

$$\Delta t_e(t) = 5.5 + 11.9 + \frac{0.50}{0.9} + [0 - 5.5] \times \frac{79}{217} = 15.95 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La toiture

$$\Delta t_e(t) = 0 + 11.9 + \frac{0.50}{0.9} + [15.6 - 0] \times \frac{780}{734} = 29.03 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Le rayonnement total maximal réel I_t :

$$I_t = (C_{\text{cadre}} \times C_{\text{limp}} \times C_{\text{alt}} \times C_{\text{ros}}) \times I_{t,b}$$

Le rayonnement diffus maximal réel I_d :

$$I_t = C_{\text{cadre}} \times C_{\text{limp}} \times C_{\text{alt}} \times C_{\text{ros}} \times I_{d,b}$$

Les coefficients :

C_{cadre} (Pour un cadre métallique) = 1.17

C_{limp} (Atmosphère claire) = 1.00

C_{alt} (Hauteur 292 m) = 1.0068

C_{ros} (Une zone climatique D2) = 1.19

On calcule le coefficient total :

$$C = 1.17 \times 1.00 \times 1.0068 \times 1.19 = 1.404$$

Le rayonnement total de base $I_{t,b}$ (en W/m^2) :

Pour la paroi à ouest :

$$I_{t,b}(27^\circ) = I_{t,b}(20^\circ) + [(27 - 20) / (30 - 20)] \times [I_{t,b}(30^\circ) - I_{t,b}(20^\circ)]$$

$$I_{t,b}(27^\circ) = 514 + (7/10) \times (516 - 514) = 515.4 \text{ W/m}^2$$

Pour la paroi à nord :

$$I_{t,b}(27^\circ) = I_{t,b}(20^\circ) + [(27 - 20) / (30 - 20)] \times [I_{t,b}(30^\circ) - I_{t,b}(20^\circ)]$$

$$I_{t,b}(27^\circ) = 50 + (7/10) \times (59 - 50) = 56.3 \text{ W/m}^2$$

Pour la paroi à l'est :

$$I_{t,b}(27^\circ) = I_{t,b}(20^\circ) + [(27 - 20) / (30 - 20)] \times [I_{t,b}(30^\circ) - I_{t,b}(20^\circ)]$$

$$I_{t,b}(27^\circ) = 514 + (7/10) \times (516 - 514) = 515.4 \text{ W/m}^2$$

Pour la paroi à sud :

$$I_{t,b}(27^\circ) = I_{t,b}(20^\circ) + [(27 - 20) / (30 - 20)] \times [I_{t,b}(30^\circ) - I_{t,b}(20^\circ)]$$

$$I_{t,b}(27^\circ) = 44 + (7/10) \times (94 - 44) = 79 \text{ W/m}^2$$

Pour la toiture :

$$I_{t,b}(27^\circ) = I_{t,b}(20^\circ) + [(27 - 20) / (30 - 20)] \times [I_{t,b}(30^\circ) - I_{t,b}(20^\circ)]$$

$$I_{t,b}(27^\circ) = 791 + (7/10) \times (776 - 791) = 780 \text{ W/m}^2$$

2.3. Le rayonnement total maximal réel I_t (en W/m^2) :

$$I_t = (C_{\text{cadre}} \times C_{\text{limp}} \times C_{\text{alt}} \times C_{\text{ros}}) \times I_{t,b}$$

2.4. Le rayonnement diffus maximal réel I_d (en W/m^2) :

$$I_t = (C_{cadre} \times C_{limp} \times C_{alt} \times C_{ros}) \times I_{d,b}$$

Le débit minimal d'air neuf $q_{v,an}$ pour un logement est donné par (en m^3/h) :

$$q_{v,an} = \text{Max. } [0,6 \times V_h ; q_{v,réf}]$$

V_h (en m^3) désigne le volume habitable ;

$-q_{v,réf}$ (en m^3/h) désigne le débit extrait de référence.

$$q_{v,réf} = \frac{5q_{v,min} + q_{v,max}}{6}$$

$-q_{v,max}$ (en m^3/h) est le débit extrait maximal de référence,

$-q_{v,min}$ (en m^3/h) est le débit extrait minimal de référence.

$$0,6 \times V_h = 0,6 \times 121,57 = 72,94$$

$$q_{v,réf} = \frac{5q_{v,min} + q_{v,max}}{6}$$

$$q_{v,réf} = \frac{5(130) + 30}{6} = 113,33$$

$$113,33 > 72,94$$

$$q_{v,an} = 113,33 \text{ } m^3/h$$

Remarques essentielles – Point de départ de l'étude

1. Origine des charges thermiques Toutes les charges thermiques considérées dans cette étude proviennent exclusivement de l'extérieur du bâtiment.
2. Contribution du sol Le sol ne génère aucune charge thermique notable et peut être négligé dans les calculs.
3. Température intérieure La température intérieure est maintenue constante à 26 °C durant toute la période étudiée.
4. Charges thermiques latentes internes Aucune charge latente interne n'est prise en compte, car :
 - L'air extérieur est plus chaud que l'air intérieur,
 - La température intérieure reste stable.
5. Apports solaires à travers les fenêtres Les fenêtres sont efficacement protégées par des rideaux, éliminant ainsi toute charge thermique due au rayonnement solaire direct.
6. Conditions temporelles de l'étude Les analyses sont réalisées à 15 h, en été (mois de juillet), correspondant au pic de chaleur dans la zone géographique étudiée.

7.4. Les calculs des apports calorifiques des tous les volumes :

Tableau 5.8 Résultats des apports calorifiques de volume 1.

$APO(t) = 1.2 \times K_{\text{été}} \times S_{\text{int}} \times \Delta t_e(t) \text{ [W]}$		L'élément
$1.2 \times 1.44 \times 33.13 \times 33.89 = 1939.03$	33.13	deux paroi
Pour la colonne sud $1.2 \times 1.75 \times 1.43 \times 15.95 = 47.89$ Pour la colonne ouest $1.2 \times 1.75 \times 1.14 \times 17.94 = 42.94$	2.57	Deux pilier
$1.2 \times 0.22 \times 24.17 \times 29.03 = 185.23$	24.17	Le toiture
2215.09		L'ensemble
$AVT(t) = 1.2 \times K_{\text{été}} \times S_{\text{ouv}} \times (TS_e(t) - TS_{b,i}) \text{ [W]}$	3.14	Les fenêtres
$1.2 \times 4.54 \times 3.14 \times (22) = 376.34$		
$AVE(t) = [SV_{\text{ens}} \times It + (SV - SV_{\text{ens}}) \times Id] \times FS \times NPVI(t) \text{ [W]}$	3.14	Un fenêtre à sud
=0		
$AV(t) = AVT(t) + AVE(t) \text{ [W]}$		
=376.34		
12704.65		
$AINF_s(t) = 0.320 \times qv_{\text{inf}} \times (TS_e(t) - TS_{b,i}) \text{ [W]}$		
$0.320 \times 68.138 \times 22 = 479.63$		
=479.63		
$qv_{\text{inf},i} = \Sigma (qv_{\text{inf},i} \times S_{\text{ouv},i}) \text{ [m}^3/\text{h]}$		
$21.7 \times 3.14 = 68.138$		
$A_s = APO + AV + AI_s + AINF_s \text{ [W]}$		
$= 2215.09 + 12704.65 + 1595 + 479.63$		
=4666.62		
$AREN_s(t) = 0.320 \times qv_{\text{an}} \times (TS_e(t) - TS_{b,i}) \text{ [W]}$		
$0.320 \times 113.33 \times 22 = 797.84$		
=797.84		
$AE_s = (C_{\Delta s} \times A_s) + (BF \times AREN_s) \text{ [W]}$ $C_{\Delta s} = 1.05$		

$BF = 0.25$		
$= (1.05 \times 4666.62) + (0.25 \times 797.84)$		
$= 5099.41$		
$AT_s = (C_{\Delta as} \times A_s) + AREN_s [W][W]$		
$= (1.05 \times 4666.62) + 797.84 =$		
$= 5697.79$		

Exemple de La Vérification :

$$APO (15 h) + AV (15 h) \leq 1,05 \times A_{réf} (15 h)$$

$$A_{réf} = A_{réf,PH} + A_{réf,PV} + A_{réf,PVI} [W]$$

$$A_{réf,PH} = \Sigma (a \times Sint \times \Delta TS_{réf,PH}) [W]$$

$$A_{réf,PV} = \Sigma (c \times Sint \times \Delta TS_{réf,PV}) [W]$$

-Calcul de $\Delta TS_{réf}$:**-Pour la ligne à 20 degrés :**

Pour la façade ouest 12,31

Pour la façade est 9,48

Pour la façade sud 9,29

Pour la façade nord 8,26

-Pour la ligne à 30 degrés :

Pour la façade ouest 12,35

Pour la façade est 9,49

Pour la façade sud 10,48

Pour la façade nord 8,26

Interpolation linéaire

$$\Delta TS_{réf,PV} (27^\circ) = \Delta TS_{réf,PV} (20^\circ) + [(27 - 20) / (30 - 20)] \times [\Delta TS_{réf,PV} (30^\circ) - \Delta TS_{réf,PV} (20^\circ)]$$

La facade de ouest :

$$\Delta TS_{réf,PV} (27^\circ) = 12.31 + [(27 - 20) / (30 - 20)] \times [12.35 - 12.31] = 12.338$$

La facade de est :

$$\Delta TS_{réf,PV} (27^\circ) = 9.48 + [(27 - 20) / (30 - 20)] \times [9.49 - 9.48] = 9.487$$

La facade de sud :

$$\Delta T_{\text{réf,PV}} (27^\circ) = 9.29 + [(27 - 20) / (30 - 20)] \times [10.48 - 9.29] = 10.123$$

La facade de nord :

$$\Delta T_{\text{réf,PV}} (27^\circ) = 8.26 + [(27 - 20) / (30 - 20)] \times [8.26 - 8.26] = 8.26$$

$$A_{\text{réf,PVI}} = AVE_{\text{réf}} + AVT_{\text{réf}} \text{ [W]}$$

$$AVE_{\text{réf}} = [SV_{\text{ens}} \times It + (SV - SV_{\text{ens}}) \times Id] FS_{\text{réf}} \times N_{\text{PVI,réf}} \text{ [W]}$$

$$AVT_{\text{réf}} = e' \times \text{Souv} \times \Delta T_{\text{réf,PVI}} \text{ [W]}$$

-Volume 1 :

$$A_{\text{réf}} = A_{\text{réf},} + A_{\text{réf},V} + A_{\text{réf,PVI}} \text{ [W]}$$

$$A_{\text{réf},} = \Sigma (2.40 \times 24.17 \times 12.09) = 701.32 \text{ [W]}$$

$$A_{\text{réf},1} = \Sigma (1.4 \times 33.13 \times 22.461) = 1041.79 \text{ [W]}$$

$$A_{\text{réf},2} = \Sigma (1.4 \times 2.57 \times 22.461) = 80.81$$

$$A_{\text{réf}} = A_{\text{réf},V1} + A_{\text{réf,PV2}} = 1122.60$$

$$A_{\text{réf}} = AVE_{\text{réf}} + AVT_{\text{réf}} \text{ [W]}$$

$$AVE_{\text{réf}} = [0 \times 110.91 + (3.14 - 0) \times 79.04] \times 0.38 \times 0.65 \text{ [W]}$$

$$AVT_{\text{réf}} = 5.4 \times 3.14 \times 21 \text{ [W]}$$

$$A_{\text{réf}} = 417.38$$

$$A_{\text{réf}} = A_{\text{réf},} + A_{\text{réf,PV}} + A_{\text{réf,PVI}} \text{ [W]} = 2241.30 \text{ APO}$$

$$(15 \text{ h}) + AV (15 \text{ h}) \leq 1,05 \times A_{\text{réf}} (15 \text{ h})$$

$$2215.091 + 17.10 \leq 1,05 \times 2241.30$$

Donc c'est logique.

Tableau 5.9 Les apports calorifiques du volume 2.

$APO(t) = 1.2 \times K_{\text{été}} \times S_{\text{int}} \times \Delta t_e(t) \text{ [W]}$	L'élément
$1.2 \times 1.44 \times 5.32 \times 17.94 = 164.92$	deux paroi
Pour la colonne oust $1.2 \times 5.8 \times 1.80 \times 17.94 = 224.75$	un pilier
$1.2 \times 0.22 \times 12.28 \times 29.03 = 94.11$	Le toiture
483.78	L'ensemble
$AVT(t) = 1.2 \times K_{\text{été}} \times S_{\text{ouv}} \times (TS_e(t) - TS_b)$ [W]	Les fenêtres est not existe

$AVE(t) = [SV_{ens} \times It + (SV - SV_{ens}) \times Id] \times FS \times N_{PVI}(t) [W]$	
$AV(t) = AVT(t) + AVE(t) [W]$	
$AINF_s(t) = 0.320 \times q_{vinf} \times (TS_e(t) - TS_{b,i}) [W]$	
$q_{vinf,i} = \Sigma (q_{vo_{inf,i}} \times S_{ouv,i}) [m^3/h]$	
$A_s = APO + AV + AI_s [W]$	
$483.78+0+537+0=1020.78$	
$AREN_s(t) = 0.320 \times q_{van} \times (TS_e(t) - TS_{b,i}) [W]$	
$0.320 \times 113.33 \times 22=797.84$	
$=797.84$	
$AE_s = (C_{\Delta as} \times A_s) + (BF \times AREN_s) [W]$ $C_{\Delta as} = 1.05$ $BF = 0.25$	
$=(1.05 \times 1020.78) + (0.25 \times 797.84)$	
$=1271.27$	
$AT_s = (C_{\Delta as} \times A_s) + AREN_s [W]$	
$=(1.05 \times 1020.78) + 797.84$	
$=1869.65$	

Tableau.5.10. Les apports calorifiques du de volume 3.

$APO(t) = 1.2 \times K_{été} \times S_{int} \times \Delta t_e(t) [W]$	L'élémenet
$1.2 \times 1.44 \times 17.67 \times 30.34=926.39$	deux paroi
Pour la colonne ouest $1.2 \times 1.75 \times 1.43 \times 17.94=53.87$ Pour la colonne nord $1.2 \times 1.75 \times 0.71 \times 12.40=18.48$	Deux pilier

$1.2 \times 0.22 \times 15.60 \times 29.03 = 119.55$	Le toiture
1118.29	L'ensemble
$AVT(t) = 1.2 \times K_{été} \times S_{ouv} \times (TS_e(t) - TS_b)$ [W]	Les fenêtres
$1.2 \times 4.54 \times 3.14 \times (22) = 376.34$	
376.34	
$AVE(t) = [SV_{ens} \times It + (SV - SV_{ens}) \times Id] \times FS \times N_{PVI}(t)$ [W]	Un fenêtre à le nord
=0	
$AV(t) = AVT(t) + AVE(t)$ [W]	
=376.34	
$AINF_s(t) = 0.320 \times q_{v_{inf}} \times (TS_e(t) - TS_b)$ [W]	
$0.320 \times 68.13 \times 22 = 479.63$	
479.63	
$q_{v_{inf}} = \Sigma (q_{v_{inf,i}} \times S_{ouv,i})$ [m³/h]	
$q_{v_{inf}} = 21.7 \times 3.14 = 68.13$	
$A_s = APO + AV + AI_s + AINF_s$ [W]	
=1118.29+376.34+913+479.63	
=2887.26	
$AREN_s(t) = 0.320 \times q_{v_{an}} \times (TS_e(t) - TS_b)$ [W]	
$0.320 \times 113.33 \times 22 = 797.84$	
=797.84	
$AE_s = (C_{\Delta as} \times A_s) + (BF \times AREN_s)$ [W] $C_{\Delta as} = 1.05$ $BF = 0.25$	
=(1.05 × 2887.26) + (0.25 × 797.84)	
=3231.08	

$AT_s = (C_{\Delta as} \times A_s) + AREN_s [W]$	
$= (1.05 \times 2887.26) + 797.84$	
$= 3829.46$	

Tableau 5.11 Les apports calorifiques du volume 4.

$APO(t) = 1.2 \times K_{été} \times S_{int} \times \Delta t_e(t) [W]$	L'élément
$1.2 \times 1.44 \times 5.20 \times 12.40 = 111.42$	deux paroi
Pour la colonne nord : $1.2 \times 1.75 \times 0.85 \times 12.40 = 22.13$	Deux pilier
$1.2 \times 0.22 \times 13.09 \times 29.03 = 100.32$	Le toiture
$= 233.87$	L'ensemble
$AVT(t) = 1.2 \times K_{été} \times S_{ouv} \times (TS_e(t) - TS_{b,i}) [W]$	Les fenêtres
$1.2 \times 4.54 \times 3.14 \times (22) = 376.34$	
376.34	
$AVE(t) = [SV_{ens} \times It + (SV - SV_{ens}) \times Id] \times FS \times N_{PVIT}(t) [W]$	Un fenêtre à le nord
$= 0$	
$AV(t) = AVT(t) + AVE(t) [W]$	
376.34	
$AINF_s(t) = 0.320 \times qv_{inf} \times (TS_e(t) - TS_{b,i}) [W]$	
$0.320 \times 68.13 \times 22 = 479.63$	
479.63	
$qv_{inf,i} = \Sigma (qv_{o_{inf,i}} \times S_{ouv,i}) [m^3/h]$	
$qv_{inf} = 21.7 \times 3.14 = 68.13$	
$A_s = APO + AV + AI_s + AINF_s [W]$	

$=233.87+376.34+537+479.63$	
$=1616.84$	
$AREN_s(t) = 0.320 \times q_{van} \times (TS_e(t) - TS_b)$ [W]	
$0.320 \times 113.33 \times 22 = 797.84$	
$=797.84$	
$AE_s = (C_{\Delta as} \times A_s) + (BF \times AREN_s) [W]$ $C_{\Delta as} = 1.05$ $BF = 0.25$	
$=(1.05 \times 1616.84) + (0.25 \times 797.84)$	
$=1897.14$	
$AT_s = (C_{\Delta as} \times A_s) + AREN_s [W]$	
$=(1.05 \times 1616.84) + 797.84$	
$=2495.52$	

Tableau 5.12 Les apports calorifiques du volume 5.

$APO(t) = 1.2 \times K_{été} \times S_{int} \times \Delta t_e(t) [W]$	L'élément
$1.2 \times 1.44 \times 12.89 \times 12.96 = 288.67$	deux paroi
Pour la colonne nord $1.2 \times 1.75 \times 0.71 \times 12.40 = 18.48$ Pour la colonne est $1.2 \times 1.75 \times 0.28 \times 0.56 = 0.32$	Deux pilier
$1.2 \times 0.22 \times 12.65 \times 29.03 = 96.94$	Le toiture
$=404.41$	L'ensemble
$AVT(t) = 1.2 \times K_{été} \times S_{ouv} \times (TS_e(t) - TS_b)$ [W]	Les fenêtres
$1.2 \times 4.54 \times 3.14 \times 2 \times (22) = 752.68$	
$AVE(t) = [SV_{ens} \times It + (SV - SV_{ens}) \times Id] \times FS \times N_{PVI}(t) [W]$	Un fenêtre à le nord Et Un fenêtre à l'est
$=0$	

$AV(t) = AVT(t) + AVE(t) \text{ [W]}$	
=752.68	
$AINF_s(t) = 0.320 \times qv_{inf} \times (TS_e(t) - TS_b)$ [W]	
$0.320 \times 136.27 \times 22 = 959.34$	
959.34	
$qv_{inf} = \Sigma (qv_{inf,i} \times S_{ouv,i}) \text{ [m}^3/\text{h]}$	
$qv_{inf1} + qv_{inf2}$ $(21.7 \times 3.14) + (21.7 \times 3.14) = 136.27$	
$A_s = APO + AV + AI_s + AINF_s \text{ [W]}$	
=404.41+752.68+537+959.34	
=2653.43	
$AREN_s(t) = 0.320 \times qv_{an} \times (TS_e(t) - TS_b)$ [W]	
$0.320 \times (113.33 \times 2) \times 22 = 1595.68$	
=1595.68	
$AE_s = (C_{\Delta as} \times A_s) + (BF \times AREN_s) \text{ [W]}$ $C_{\Delta as} = 1.05$ $BF = 0.25$	
= $(1.05 \times 2653.43) + (0.25 \times 1595.68)$	
=3185.02	
$AT_s = (C_{\Delta as} \times A_s) + AREN_s \text{ [W]}$	
= $(1.05 \times 2653.43) + (0.25 \times 1595.68)$	
=4381.78	

Tableau 5.13 Les apports calorifiques du volume 6.

$APO(t) = 1.2 \times K_{été} \times S_{int} \times \Delta t_c(t) \text{ [W]}$	L'élément
$1.2 \times 1.44 \times 7.12 \times 0.56 = 6.84$	un paroi
Pour la colonne est $1.2 \times 1.75 \times 0.85 \times 0.56 = 1$	un pilier
$1.2 \times 0.22 \times 12.64 \times 29.03 = 96.34$	Le toiture
$= 104.18$	L'ensemble
$AVT(t) = 1.2 \times K_{été} \times S_{ouv} \times (TS_e(t) - TS_b) \text{ [W]}$	Les fenêtres
$1.2 \times 4.54 \times 3.14 \times (22) = 376.34$	
$AVE(t) = [SV_{ens} \times It + (SV - SV_{ens}) \times Id] \times FS \times N_{PVI}(t) \text{ [W]}$	Une fenêtre à l'est
$= 0$	
$AV(t) = AVT(t) + AVE(t) \text{ [W]}$	
$= 376.34$	
$AINF_s(t) = 0.320 \times q_{vinf} \times (TS_e(t) - TS_b) \text{ [W]}$	
$= 0.320 \times 68.13 \times 22$	
$= 479.63$	
$q_{vinf} = \Sigma (q_{voinf,i} \times S_{ouv,i}) \text{ [m}^3/\text{h]}$	
$q_{vinf} = (21.7 \times 3.14) = 68.13$	
$A_s = APO + AV + AI_s + AINF_s \text{ [W]}$	
$= 104.18 + 376.34 + 463 + 479.63$	
$= 1423.15$	
$AREN_s(t) = 0.320 \times q_{van} \times (TS_e(t) - TS_b) \text{ [W]}$	
$0.320 \times 113.33 \times 22 = 797.84$	
$= 797.84$	
$AE_s = (C_{\Delta as} \times A_s) + (BF \times AREN_s) \text{ [W]}$ $C_{\Delta as} = 1.05$ $BF = 0.25$	

$=(1.05 \times 1423.15) + (0.25 \times 797.84)$	
$=1693.76$	
$AT_s = (C_{\Delta as} \times A_s) + AREN_s \text{ [W]}$	
$=(1.05 \times 1423.15) + 797.84$	
$=2292.14$	

Tableau 5.14 Les apports calorifiques du de volume 7.

$APO(t) = 1.2 \times K_{été} \times S_{int} \times \Delta t_e(t) \text{ [W]}$	L'élément
$1.2 \times 1.44 \times 15.59 \times 16.51 = 444.78$	deux paroi
Pour la colonne est $1.2 \times 1.75 \times 1.14 \times 0.56 = 1.34$ Pour la colonne sud $1.2 \times 1.75 \times 1.43 \times 15.95 = 47.89$	Deux pilier
$1.2 \times 0.22 \times 18.09 \times 29.03 = 115.60$	Le toiture
$= 609.61$	L'ensemble
$AVT(t) = 1.2 \times K_{été} \times S_{ouv} \times (TS_e(t) - TS_b) \text{ [W]}$	Les fenêtres
$1.2 \times 4.54 \times (3.14 \times 2) \times (22) = 752.69$	
$AVE(t) = [SV_{ens} \times It + (SV - SV_{ens}) \times Id] \times FS \times N_{PVI}(t) \text{ [W]}$	Une fenêtre à l'est Et une fenêtre à le sud
$= 0$	
$AV(t) = AVT(t) + AVE(t) \text{ [W]}$	
$= 752.68$	
$AINF_s(t) = 0.320 \times qv_{inf} \times (TS_e(t) - TS_b) \text{ [W]}$	
$= 0.320 \times 136.27 \times 22 = 959.34$	
$qv_{inf} = \Sigma (qv_{o_{inf,i}} \times S_{ouv,i}) \text{ [m}^3/\text{h]}$	
$qv_{inf} = qv_{inf1} + qv_{inf2}$ $=(21.7 \times 3.14) + (21.7 \times 3.14) = 136.27$	
$A_s = APO + AV + AI_s + AINF_s \text{ [W]}$	
$= 609.61 + 752.68 + 929 + 959.34$	
$= 2321.63$	

$AREN_s(t) = 0.320 \times q_{van} \times (TS_e(t) - TS_b) [W]$	
$= 0.320 \times (113.33 \times 2) \times 22 = 797.84$	
797.84	
$AE_s = (C_{\Delta as} \times A_s) + (BF \times AREN_s) [W]$ $C_{\Delta as} = 1.05$ $BF = 0.25$	
$= (1.05 \times 2321.63) + (0.25 \times 797.84)$	
= 2637.17	
$AT_s = (C_{\Delta as} \times A_s) + AREN_s [W]$	
$= (1.05 \times 2321.63) + 797.84$	
= 3235.51	

-La valeur totale des charges thermiques :

La valeur totale des charges thermiques = charge de toutes les tailles

= charge 1 + charge 2 + charge 3 + charge 4 + charge 5 + charge 6 + charge 7

= 5697,79 + 1869,65 + 3829,46 + 2495,52 + 4381,78 + 1693,76 + 3235,51 = 23203,47 [W]

= 23.20 [KW]

Chapitre 06

**L'aspect
innovant.**

6.1 Description du système proposé

L'aspect innovant est Connexion d'un compresseur DC à un climatiseur alimenté par panneaux solaires

L'augmentation constante de la demande énergétique mondiale a conduit à une recherche accrue de solutions durables et économes en énergie. Parmi celles-ci, l'exploitation de l'énergie solaire constitue une option particulièrement pertinente, notamment dans les régions fortement ensoleillées.

Dans ce contexte, l'intégration d'un compresseur fonctionnant en courant continu (DC) au sein d'un système de climatisation alimenté par des panneaux solaires représente une approche innovante permettant de réduire la dépendance au réseau électrique conventionnel, de diminuer les coûts d'exploitation et de limiter les émissions associées à la production d'énergie.

Cette configuration repose sur la capacité du compresseur DC à fonctionner directement à partir d'une source photovoltaïque, ce qui améliore le rendement global du système et réduit les pertes liées aux conversions d'énergie. Elle constitue ainsi une solution adaptée aux bâtiments isolés, aux installations autonomes ou aux projets visant une meilleure efficacité énergétique.

6.2 Composants du système

6.2.1 Panneaux solaires

Les panneaux solaires constituent l'élément principal de production d'énergie du système. Ils convertissent le rayonnement solaire en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Leur dimensionnement dépend de plusieurs paramètres, notamment :

- La puissance nominale du compresseur DC,
- La durée quotidienne de fonctionnement souhaitée,
- L'ensoleillement disponible sur le site,
- Les pertes éventuelles liées au câblage ou aux conditions d'installation.

Dans les applications de climatisation légère ou résidentielle, des panneaux d'une puissance comprise entre 100 W et 400 W sont couramment utilisés. Leur association en série ou en parallèle permet d'obtenir la tension et le courant nécessaires pour alimenter efficacement le compresseur et les autres composants du système.



Figure 6.1 Panneaux solaires.

6.2.2 Régulateur de charge (MPPT)

6.2.2.1 Définition

Le MPPT signifie Maximum Power Point Tracker, c'est-à-dire suiveur du point de puissance maximale.

C'est un appareil électronique utilisé dans les systèmes photovoltaïques pour optimiser la récupération de l'énergie électrique produite par les panneaux solaires, en toutes conditions climatiques [18].

6.2.2.2 Fonction du dispositif MPPT

Sa fonction principale est : Ajuster la tension et le courant entre le panneau solaire et la batterie ou la charge, de manière à ce que le panneau fonctionne au point où il produit la puissance maximale.

Les panneaux solaires ne produisent pas toujours la même tension ou le même courant. Le MPPT calcule et ajuste automatiquement les conditions de fonctionnement pour obtenir la puissance maximale ($P = V \times I$).

6.2.2.3 Comment fonctionne d'un MPPT ?

- Il mesure la tension et le courant en sortie du panneau.
 - Il calcule la puissance.
 - Il modifie légèrement la tension pour tester différentes conditions.
 - Il identifie le point de puissance maximale (MPP).
 - Il adapte ensuite la tension en sortie pour charger la batterie efficacement via un convertisseur DC-DC.

Exemple :

- Le panneau produit 20V et 5A = 100W.
- La batterie est à 12V.
- Le MPPT abaisse la tension à 12V tout en maintenant la puissance, et fournit environ 8,3A à la batterie.

Tableau 6.1 Comparaison d'un MPPT et PWM.

Critère	MPPT	PWM
Rendement	Très élevé (jusqu'à 98%)	Faible (60–80%)
Compatible avec des panneaux à haute tension ?	Oui	Non
Performances par temps nuageux ou froid	Excellentes	Limitées
Coût	Plus cher	Moins cher

Composition d'un MPPT :

1. Entrée pour le panneau solaire
2. Circuit de conversion DC-DC
3. Microcontrôleur pour le suivi du MPP
4. Sortie vers la batterie ou la charge
5. Écran et boutons de configuration (selon les modèles)

Quand utiliser un MPPT ?

- Lorsque vous utilisez des panneaux solaires à tension élevée (24V, 36V, etc.) avec une batterie basse tension (12V).
- Dans des régions où l'ensoleillement varie fréquemment.
- Si vous souhaitez maximiser l'énergie solaire disponible.

Exemple pratique :

Panneau solaire : 250W, 30V, 8.3A

Batterie : 12V

Sans MPPT : on récupère seulement 100 à 120W

Avec MPPT : on peut atteindre les 250W complets



Figure 6.2 MPPT.

6.2.3 Batteries solaires

6.2.3.1 Définition

La batterie solaire est un composant essentiel dans un système photovoltaïque autonome. Elle permet de stocker l'énergie électrique produite par les panneaux solaires pendant la journée, afin de l'utiliser lorsque l'ensoleillement est insuffisant, notamment la nuit ou par temps nuageux[19].

6.2.3.2 La Fonctionnement des batteries solaires

Lorsqu'un panneau solaire capte la lumière du soleil, il la convertit en électricité sous forme de courant continu (DC). Cette électricité peut être utilisée immédiatement ou stockée dans une batterie solaire. La batterie se charge pendant les heures d'ensoleillement et restitue l'énergie stockée lorsque cela est nécessaire.

6.2.3.3 Types des batteries solaires

Il existe plusieurs types de batteries utilisées dans les installations solaires :

a- Batteries au plomb-acide :

- Les plus courantes et les moins chères.
- Exemples : batteries AGM et batteries à gel.
- Durée de vie limitée et nécessitent un entretien pour certains modèles.

b- Batteries lithium-ion :

- Plus légères, plus compactes et plus performantes.
- Longue durée de vie et cycles de charge-décharge plus nombreux.
- Plus coûteuses, mais de plus en plus populaires.

c. Batteries au sel ou à flux :

- Technologies émergentes avec des avantages écologiques.
- Moins répandues, réservées à des projets spécifiques.

6.2.3.4 Les raisons de l'utilisation d'une batterie solaire

- Autonomie énergétique : permet une indépendance par rapport au réseau électrique.
- Sécurité d'alimentation : assure une continuité de service en cas de coupure de courant.
- Optimisation de la production solaire : l'énergie excédentaire est conservée pour une utilisation ultérieure.

6.2.3.5 Applications d'une batterie solaire

Les batteries solaires sont utilisées dans :

- Les maisons isolées,
- Les systèmes de secours (onduleurs),
- Les installations agricoles,
- Les stations de télécommunication, ● Les camping-cars et les bateaux.



Figure 6.3 Une batterie solaire.

6.2.4. Le Compresseur DC

Il fonctionne directement en courant continu sans conversion AC, réduisant les pertes d'énergie et augmentant l'efficacité. Fonctionne typiquement en 12V, 24V ou 48V.



Figure 6.4 Compresseur DC.

6.2.5 La Carte de contrôle de climatiseur

La carte de contrôle, ou carte électronique, est le cerveau du climatiseur. Elle gère le fonctionnement de tous les composants : compresseur, ventilateur, vanne d'expansion, et capteurs [20].

Ses principales fonctions sont :

- Réguler la température selon les données des capteurs.
- Gérer les modes de fonctionnement (refroidissement, chauffage, ventilation...).
- Assurer la sécurité en cas de surtension, surchauffe ou défaut.
- Communiquer avec la télécommande ou l'unité extérieure.

Elle joue donc un rôle essentiel dans le bon fonctionnement, l'efficacité énergétique et la longévité du climatiseur.



Figure 6.5 Carte de contrôle de climatiseur.

6.3 La connexion du système

6.3.1. Panneaux vers le régulateur

Les panneaux se connectent au régulateur via des câbles adaptés au courant continu. La tension doit correspondre à celle requise pour charger la batterie.

6.3.2 Connexion des batteries

Les batteries se connectent au régulateur pour stocker l'énergie. La tension et le montage (série ou parallèle) doivent correspondre au compresseur.

6.3.3 Compresseur connecté via carte de contrôle

Le compresseur peut être connecté directement ou via une carte de contrôle qui ajuste les cycles selon la température.

6.4 Calculs de dimensionnement

6.4.1 Consommation du compresseur

Exemple : compresseur 500 W, 6 h/jour $\rightarrow 500 \times 6 = \text{**3000 Wh/jour**}$

6.4.2 Choix des panneaux

Avec 5 heures d'ensoleillement effectif :

$3000 \text{ Wh} \div 5 \text{ h} = \text{**600 W**} \rightarrow 2 \text{ panneaux de } 300 \text{ W ou } 3 \text{ de } 200 \text{ W [8]}$

6.4.3 Choix de la batterie

Tension 12V : $3000 \text{ Wh} \div 12\text{V} = \text{**250 Ah**} \rightarrow 2 \text{ batteries } 12\text{V} - 150\text{Ah [9]}$

6.5 Application à notre exemple

Dans notre expérience, nous allons calculer l'énergie et le coût nécessaires pour climatiser ce bâtiment en utilisant un climatiseur traditionnel à courant alternatif et en utilisant un climatiseur à courant continu, et nous montrerons le côté avantageux du climatiseur à courant continu.

Dans notre exemple, nous n'avons pas besoin de batterie car la climatisation ne fonctionne que le jour et l'entreprise ne fonctionne pas la nuit.

-La valeur totale des charges thermiques :

$$\begin{aligned} &\text{La valeur totale des charges thermiques} = \text{charge de toutes les tailles} \\ &= \text{charge 1} + \text{charge 2} + \text{charge 3} + \text{charge 4} + \text{charge 5} + \text{charge 6} + \text{charge 7} \\ &= 5697,79 + 1869,65 + 3829,46 + 2495,52 + 4381,78 + 1693,76 + 3235,51 = 23203,47 \text{ [W]} \\ &= 23.20 \text{ [KW]} \end{aligned}$$

a. La puissance électrique de chaque climatiseur :

-Nous utilisons la formule :

$$P_{elec} = \frac{C_{App}}{COP} \text{ [KW]}$$

a1. Par un climatiseur fonctionnant avec un compresseur à courant alternatif :

$$P_1 = \frac{5.698}{3} = 1.89$$

$$P_2 = \frac{1.870}{3} = 0.62$$

$$P_3 = \frac{3.829}{3} = 1.27$$

$$P_4 = \frac{2.496}{3} = 0.83$$

$$P_5 = \frac{4.382}{3} = 1.46$$

$$P_6 = \frac{1.694}{3} = 0.56$$

$$P_7 = \frac{3.236}{3} = 1.07$$

$$P_{tot} = \frac{23.20}{3} = 7.73$$

$$P_{total AC} = 7.73 \text{ KW}$$

-nous devons utiliser un onduleur avec le courant alternatif, car le panneau solaire fournit un courant continu et le climatiseur fonctionne avec du courant alternatif, donc nous convertissons le courant continu en courant alternatif.

-L'efficacité de l'onduleur est généralement de 90 à 95 %

a2- Pertes de l'onduleur et des câbles :

L'onduleur a un rendement de 92 % et les câbles ont un rendement de 97 %, donc les pertes totales sont :

$$Dép_{on+câ} = 0.92 \times 0.97 = 0.89$$

a3- La puissance réel

$$P_{réalité AC} = \frac{P_{AC}}{\eta_{Inv}} = \frac{7.7}{0.89} = 8.66 \text{ KW}$$

a4-Par un climatiseur fonctionnant avec un compresseur à courant continu :

$$P_1 = \frac{5.698}{4.5} = 1.26$$

$$P_2 = \frac{1.870}{4.5} = 0.41$$

$$P_3 = \frac{3.829}{4.5} = 0.85$$

$$P_4 = \frac{2.496}{4.5} = 0.55$$

$$P_5 = \frac{4.382}{4.5} = 0.97$$

$$P_6 = \frac{1.694}{4.5} = 0.37$$

$$P_7 = \frac{3.236}{4.5} = 0.71$$

$$P_{tot} = \frac{23.20}{4.5} = 5.16$$

$$P_{total DC} = 5.16 \text{ KW}$$

Le climatiseur à compresseur à courant continu n'a pas besoin d'un onduleur car il fonctionne avec un courant similaire à celui produit par le panneau solaire, qui est un courant continu. Cependant, nous avons besoin d'un régulateur de charge pour alimenter le climatiseur, car la tension produite par le panneau solaire de 400 watts est généralement inférieure à la tension nécessaire pour que le climatiseur à courant continu fonctionne, qui est le plus souvent de 48 volts, et l'efficacité du régulateur de charge peut atteindre 95 %.

a5- Pertes du régulateur de charge et des câbles :

Le régulateur de charge a un rendement de 95 % et les câbles ont un rendement de 97 %. Si les pertes totales sont

$$Dép_{an+ca} = 0.95 \times 0.97 = 0.92$$

$$P_{réalité\ DC} = \frac{5.16}{0.92} = 5.60$$

$$P_{réalité\ DC} = 5.60\text{ KW} < P_{réalité\ AC} = 8.66\text{ KW}$$

Cela signifie économiser davantage d'énergie avec un climatiseur à courant continu

b. Le nombre de panneaux solaires dont nous avons besoin :

Supposons que nous ayons des panneaux solaires de type 400W (0,4 KW) par panneau. -Pour le panneau solaire, sa puissance nominale n'est pas sa puissance réelle. À une température de 48 degrés Celsius, l'efficacité du panneau diminue de 9,2 %, et il ne produit donc pas 0,4 kW mais 0,363 kW par heure.

b1- Tout d'abord, un climatiseur AC :

$$N_{pan} = \frac{P_{elec\ AC}}{P_{pann}} = \frac{8.66}{0.363} = 23.85$$

$$N=24$$

b2-. Deuxièmement, pour le climatiseur DC :

$$N_{pan} = \frac{P_{elec\ AC}}{0.363} = \frac{5.60}{0.363} = 15.42$$

$$N=16$$

$$N_{Totale\ DC} = 16 < N_{Totale\ AC} = 24$$

Si le coût des panneaux dans le système de climatisation à courant continu est le plus bas, Ici, il est évident que la différence de coût des panneaux est très grande et que l'avantage revient au système de climatisation à courant continu.

Une autre caractéristique du climatiseur avec compresseur à courant continu est qu'il peut réduire sa puissance de fonctionnement, ce qui est utile puisque la température n'est pas toujours constante. Lorsque la température baisse.

6. 6 Avantages du compresseur DC solaire

- Réduction de la consommation réseau.
- Pas besoin d'onduleur (pas de conversion AC/DC).

- Moins de pertes énergétiques.
- Autonomie dans les zones isolées.

6.7 Contraintes

- Coût élevé des batteries.
- Nécessité de réguler correctement la tension et le courant.
- Entretien régulier requis.

6.8 Schéma simplifié

[Panneaux solaires] → [Régulateur] → [Batteries] → [Carte de contrôle] → [Compresseur DC]

C Conclusion

Le recours à un système de climatisation fonctionnant à l'énergie solaire, en particulier avec un compresseur alimenté en courant continu (DC), représente une avancée significative vers une consommation énergétique plus durable et autonome. L'utilisation du courant continu permet de réduire les pertes liées à la conversion d'énergie, d'améliorer l'efficacité du système, et de simplifier l'intégration directe avec les panneaux photovoltaïques, qui produisent eux-mêmes du courant continu.

Cette solution s'avère particulièrement adaptée aux régions isolées ou à faible accès au réseau électrique, offrant une climatisation fiable tout en exploitant une ressource abondante et gratuite : le soleil. En outre, elle répond aux exigences environnementales contemporaines en réduisant considérablement l'empreinte carbone liée à la climatisation conventionnelle. Toutefois, malgré tous les avantages, ce type de système nécessite une étude technique approfondie pour optimiser le dimensionnement, le stockage énergétique et la régulation. L'évolution technologique actuelle et la baisse progressive des coûts des équipements solaires renforcent la viabilité et l'attractivité de ces systèmes dans les années à venir.

Ainsi, la climatisation solaire à compresseur DC constitue non seulement une alternative écologique, mais aussi une solution réaliste et prometteuse pour un avenir énergétique durable.

Références

Références:

- [1] Ingenium. (2023). La physique de l'énergie. <https://ingenium.ca/fr/apprentissage/la-science-chez-soi/la-physique-de-lenergie/>
- [2] Wikipédia. (2025). Transfert thermique. Consulté le 12 décembre 2025 sur https://fr.wikipedia.org/wiki/Transfert_thermique
- [3] Bessanane, N. (s.d.). Rayonnement thermique – Résumé et exercices. Université Batna 2. -erm-s2.pdf
- [4] Portillo, G. (2023, 12 janvier). Condensation de surface : formation de la rosée et du brouillard. ProjetEcolo. <https://www.projetecolo.com/rosee-definition-et-point-de-rosee-1952.html>
- [5] Thermal Engineering. (2024). Qu'est-ce que le cycle de compression de vapeur – cycle de réfrigération. <https://www.thermal-engineering.org/fr/quest-ce-que-le-cycle-de-compression-de-vapeur-cycle-de-refrigeration-definition/>
- [6] Giménez, A. (2023, 10 janvier). Compresseurs : définition, classification et types. Area Academy. <https://areacooling.com/areacademy/fr/compresseurs-dfinition-classification-et-types/>
- [7] Innoref. (2024, 21 October). Exploring DC Compressor.
- [8] Althouse, A. D., Turnquist, C. H., & Bracciano, A. F. (2020). Modern Refrigeration and Air Conditioning (22nd ed.). Goodheart Willcox.
- [9] MIT. (s.d.). How a Compression Refrigeration System Works. https://web.mit.edu/2.972/www/reports/compression_refrigeration_system/compression_refrigeration_system.html
- [10] Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2020). Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics, and Wind (5th ed.). Wiley.
- [11] Arya, S., & Mahajan, P. (2023). Solar Cells: Types and Applications. Springer.
- [12] Energy Education. (s.d.). Photovoltaic cell. University of Calgary. https://energyeducation.ca/encyclopedia/Photovoltaic_cell
- [13] Luque, A., & Hegedus, S. (2011). Handbook of Photovoltaic Science and Engineering (2nd ed.). Wiley.
- [14] Dunlop, J. P. (2012). Photovoltaic Systems (3rd ed.). American Technical Publishers.

Références

- [15] U.S. Department of Energy. (s.d.). Concentrating Solar Thermal Power Basics.
<https://www.energy.gov/eere/solar/concentrating-solar-thermal-power-basics>

- [16] Penn State University. (s.d.). 7.4. Parabolic Dish CSP Technology.
<https://courses.ems.psu.edu/eme812/node/648>

- [17] The Renewables. (2024). Environmental Benefits of Solar Energy.
<https://therenewables.org/environmental-benefits-of-solar-energy/>

- [18] Solanki, C. S. (2015). Solar Photovoltaics: Fundamentals, Technologies and Applications (3rd ed.). McGraw Hill Education.

- [19] U.S. Department of Energy. (n.d.). Solar Integration: Solar Energy and Storage Basics.
<https://www.energy.gov/eere/solar/solar-integration-solar-energy-and-storage-basics>

- [20] Whitman, W. C., Johnson, W. M., & Tomczyk, J. A. (2016). Refrigeration and Air Conditioning Technology (8th ed.). Cengage Learning.

ملخص:

يعدّ نظام التكييف المعتمد على الطاقة الكهروضوئية حلاً فعالاً لتقليل استهلاك الكهرباء التقليدية، إذ تعتمد هذه الأنظمة على الألواح الشمسية لتحويل ضوء الشمس إلى طاقة كهربائية تُستخدم مباشرة أو تُخزّن في بطاريات، مما يجعلها مناسبة للمناطق المشمسة وللمباني خارج الشبكة. ويساهم هذا النظام في خفض الانبعاثات الكربونية وتعزيز الاستدامة. وعند استخدام مكيف يعمل بضغوط تيار مستمر (DC)، ترتفع كفاءة النظام بفضل تقليل خسائر تحويل الطاقة وتوافقه المباشر مع الألواح الشمسية والبطاريات. لذلك يُعد هذا النوع من المكيفات خياراً مثالياً للأنظمة الشمسية المنزلية، مع تحقيق توفير أكبر في الطاقة وتقليل البصمة الكربونية.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الكهروضوئية، تكييف الهواء، الحملات الحرارية، الألواح الشمسية، التيار المستمر DC، ضاغط DC، كفاءة الطاقة، أنظمة خارج الشبكة.

Abstract:

An air conditioning system based on photovoltaic energy is an effective solution to reduce the use of conventional electricity, as these systems rely on solar panels to convert sunlight into electrical energy that can be used directly or stored in batteries. This makes them suitable for sunny regions and for buildings located off the grid, while also contributing to reducing carbon emissions and enhancing sustainability.

When using an air conditioner equipped with a direct-current (DC) compressor, the system's efficiency increases further, as DC operation reduces energy conversion losses and allows direct compatibility with solar panels and batteries. Therefore, this type of air conditioner is ideal for residential solar systems, providing greater energy savings and lowering the carbon footprint.

Keywords: photovoltaic energy, air conditioning, heat gains, solar panels, DC power, DC compressor, energy efficiency, off-grid systems.

Résumé:

Un système de climatisation alimenté par l'énergie photovoltaïque constitue une solution efficace pour réduire la consommation d'électricité conventionnelle. Ces systèmes utilisent des panneaux solaires pour convertir la lumière du soleil en énergie électrique pouvant être utilisée directement ou stockée dans des batteries, ce qui les rend adaptés aux régions ensoleillées et aux bâtiments situés hors réseau. Ils contribuent également à réduire les émissions de carbone et à renforcer la durabilité.

Lorsqu'un climatiseur équipé d'un compresseur à courant continu (DC) est utilisé, l'efficacité du système augmente davantage, car le fonctionnement en courant continu réduit les pertes de conversion d'énergie et permet une compatibilité directe avec les panneaux solaires et les batteries. Ce type de climatiseur est donc idéal pour les systèmes solaires résidentiels, offrant une meilleure économie d'énergie et une réduction de l'empreinte carbon.

Mots-clés : énergie photovoltaïque, climatisation, apports calorifiques, panneaux solaires, courant continu (DC), compresseur DC, efficacité énergétique, systèmes hors réseau.