

République algérienne démocratique et populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou  
Faculté de génie de la construction  
Département de génie mécanique



*En vue de l'obtention du diplôme de Master II professionnel en Génie  
Mécanique, énergétique  
Option : Energies renouvelables*

## *Thème*

### ***ETUDE D'UNE MAISON ECOLOGIQUE A ENERGIE SOLAIRE (PV/T).***

Présenté par :

*YESSAD AMINE  
AILAM YASSINE*

Dirigé par : *MAKHLOUF SAID  
ZIRMI RACHID*

2016/2017

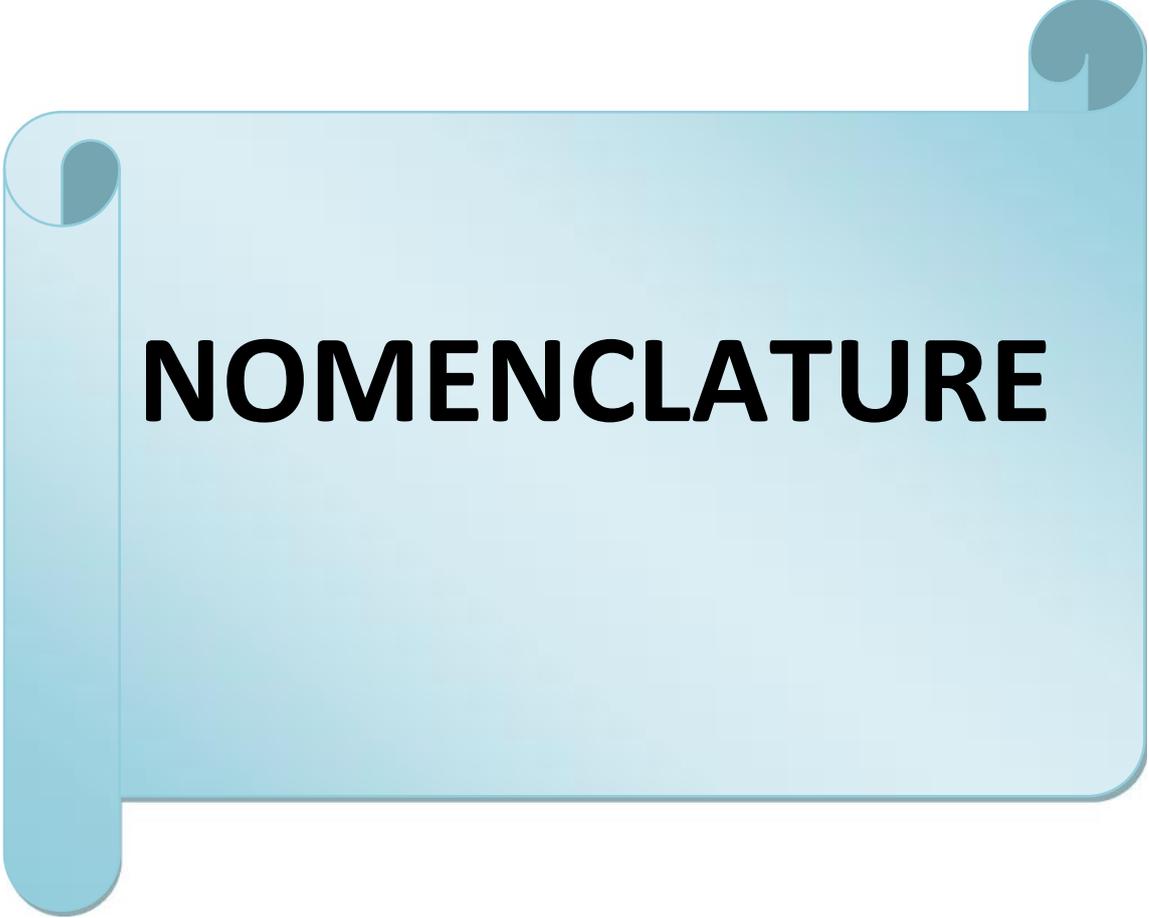
# *Remerciements*

*Nos sincères remerciements vont à nos encadreurs Mr Makhlouf Said et Mr Zirmi Rachid, qui ont pris au sérieux tous nos efforts et qui ont su être patients avec nous dans les moments les plus cruciaux,*

*A tous les employés de l'université Mouloud Mammeri, secrétaires, adjoints, et camarades...*

*Je tiens à remercier notre ami architecte Mr Khelaf Ahmed qui nous a beaucoup aidés dans notre travail.*

*Aux enseignants qui nous ont aidés à développer nos capacités intellectuelles et qui nous ont poussés à fournir plus d'efforts.*



# **NOMENCLATURE**

## Nomenclature

<b>K</b> : Coefficient d'échange global	[W/m <sup>2</sup> .K]
<b>C<sub>p</sub></b> : Capacité calorifique	[J/kg.K]
<b>Z</b> : Coefficient de correction	
<b>Z<sub>E</sub></b> : Coefficient de correction tenant compte des fenêtres	
<b>Z<sub>D</sub></b> : Coefficient de transmission global	
<b>Z<sub>H</sub></b> : Coefficient de transmission tenant compte de l'orientation	
<b>Z<sub>A</sub></b> : Coefficient de transmission tenant compte du site	
<b>Z<sub>u</sub></b> : Coefficient de transmission tenant compte du taux d'utilisation	
<b>λ</b> : Conductivité thermique	[W/m.K]
<b>Φ<sub>est</sub></b> : Apports de chaleur estivale	[W]
<b>Φ<sub>hiv</sub></b> : Déperditions de chaleur hivernale	[W]
<b>e</b> : Epaisseur	[m]
<b>Φ</b> : Flux de chaleur	[W]
<b>Φ<sub>I</sub></b> : Flux de chaleur par infiltration	[W]
<b>Φ<sub>T</sub></b> : Flux de chaleur par transmission	[W]
<b>h</b> : hauteur	[m]
<b>l</b> : Largeur	[m]
<b>L</b> : Longueur	[m]
<b>Nu</b> : Nombre de Nusselt	
<b>Pe</b> : Nombre de Péclet	
<b>Pr</b> : Nombre de Prandtl	

<b>Re</b> : Nombre de Reynolds	
<b>P</b> : puissance	[W]
<b>R</b> : Rayon	[m]
<b>R<sub>i</sub></b> : Rayon intérieur	[m]
<b>S</b> : surface	[m <sup>2</sup> ]
<b>T</b> : Température	[°C]
<b>T<sub>ext</sub></b> : Température extérieure	[°C]
<b>T<sub>int</sub></b> : Température intérieure	[°C]
<b>PV/T</b> : Photovoltaïque thermique	
<b>V<sub>co</sub></b> : Tension de circuit ouvert	[V]
<b>I<sub>cc</sub></b> : Courant de circuit-ouvert	[A]
<b>P<sub>max</sub></b> : Puissance maximale	[W]
<b>N<sub>s</sub></b> : Nombre de cellules en séries	
<b>N<sub>p</sub></b> : Nombre de cellules en parallèles	
<b>GPV</b> : Générateur Photovoltaïque	
<b>E</b> : Energie	[Wh/j]
<b>E<sub>p</sub></b> : Energie produite	[J]
<b>C<sub>j</sub></b> : Consommation journalière	
<b>R<sub>o</sub></b> : Rendement de l'onduleur	
<b>P<sub>c</sub></b> : Puissance crête	[W <sub>c</sub> ]
<b>E<sub>min</sub></b> : Le rayonnement solaire global journalier minimal reçu sur le plan des modules	[W/m <sup>2</sup> ]
<b>P<sub>cm</sub></b> : Puissance crête correspondante à un module	[W <sub>c</sub> ]
<b>S<sub>m</sub></b> : Surface d'un module	[m <sup>2</sup> ]

**$S_t$**  : Surface totale occupée par le champ sur le toit [m<sup>2</sup>]

**$N_j$**  : Le nombre de jours d'autonomie du système

**$P_f$**  : Décharge de batterie

**$R_b$**  : Rendement de la batterie

**$N_{bs}$**  : Nombre de batteries en série

**$U_b$**  : Tension de l'élément batterie donnée par le constructeur en [V]

**$N_{bp}$**  : Nombre de batteries en parallèle

**$\rho$**  : La résistivité du matériau conducteur en [ $\mu\Omega$  m.m]



**LISTE DES  
FIGURES**

## *Liste des figures*

### **Chapitre 1 :**

<b>Figure 1-1 :</b> <i>Paroi à une seule couche</i> .....	8
<b>Figure 1-2 :</b> <i>Paroi à plusieurs couches</i> .....	9
<b>Figure 1-3 :</b> <i>Paroi cylindrique à une seule couche</i> .....	11
<b>Figure 1-4 :</b> <i>Paroi cylindrique à plusieurs couches</i> .....	12
<b>Figure 1-5 :</b> <i>Paroi sphérique</i> .....	13
<b>Figure 1-6 :</b> Schéma qui illustre la convection.....	14
<b>Figure 1-7 :</b> Schéma qui illustre Le rayonnement.....	19

### **Chapitre 3 :**

<b>Figure 3-1 :</b> Schéma du plancher de la maison non isolée.....	32
<b>Figure 3-2 :</b> Schéma des parois (murs) de la maison non isolée .....	33
<b>Figure 3-3 :</b> Schéma du plancher du garage de la maison non isolée.....	35
<b>Figure 3-4 :</b> Schéma du plancher haut de la maison non isolée .....	36
<b>Figure 3-5 :</b> Schéma des fenêtres et des portes-fenêtres de la maison écologique.....	39
<b>Figure 3-6 :</b> Schéma du plancher de la maison écologique .....	40
<b>Figure 3-7 :</b> Schéma des murs de la maison écologique. ....	41
<b>Figure 3-8:</b> Schéma du plancher de la maison écologique.....	43
<b>Figure 3-9 :</b> Schéma la charpente de la maison écologique. ....	44
<b>Figure 3-10 :</b> Schéma des parois vitrées de la toiture vitrée.....	45

## Chapitre 4

<b>Figure 4-1 :</b> <i>Capteur hybride photovoltaïque thermique (PV/T)</i> .....	57
<b>Figure 4-2 :</b> <i>Fiche signalétique des panneaux solaires hybrides</i> .....	59
<b>Figure 4-3:</b> <i>Champ des panneaux solaires hybrides.</i> .....	59
<b>Figure 4-4:</b> <i>Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.</i> .....	61
<b>Figure 4-5:</b> <i>Module photovoltaïque :</i> .....	62
<b>Figure 4-6:</b> <i>Champ photovoltaïque.</i> .....	62
<b>Figure 4-7:</b> <i>Cellule monocristallin(a) et multi cristallin (b).</i> .....	63
<b>Figure 4-8:</b> <i>Cellule amorphe.</i> .....	64
<b>Figure 4-9 :</b> <i>Caractéristiques courant-tension d'un module photovoltaïque</i> .....	65
<b>Figure 4-10:</b> <i>Schéma simplifié d'un system PV.</i> .....	66
<b>Figure 4-11:</b> <i>Schème de l'installation photovoltaïque autonome</i> .....	83
<b>Figure 4-12:</b> <i>Cuve de stockage</i> .....	84
<b>Figure 4-13 :</b> <i>Schéma explicite de la cuve.</i> .....	85



**LISTE DES  
TABLEAUX**

## Liste des tableaux

### Chapitre 1

**Tableau 1-1** : *Métabolisme*..... 3

### Chapitre 2

**Tableau 2-1** : *Tableau des matériaux utilisés pour l'isolation des murs*..... 26

**Tableau 2-2** : *Tableau des matériaux utilisés pour les parois vitrées*..... 27

**Tableau 2-3** : *Tableau des matériaux d'isolation utilisés pour la toiture*..... 27

**Tableau 2-4** : *Tableau des matériaux d'isolation utilisés pour le plancher*..... 28

### Chapitre 3

**Tableau 3-1** : *Les matériaux utilisés pour le plancher bas de la maison non isolée*..... 31

**Tableau 3-2** : *Les matériaux composant les parois extérieures de la maison non isolée*..... 33

**Tableau 3-3** : *Les matériaux composant le plancher du garage de la maison non isolée*..... 34

**Tableau 3-4** : *Les matériaux composant le plancher haut de la maison non isolée*..... 36

**Tableau 3-5** : *Les matériaux composant le plancher bas de la maison isolée*..... 39

**Tableau 3-6** : *Les matériaux composant les murs de la maison non isolée*..... 41

**Tableau 3-7** : *Les matériaux composant le plancher haut de la maison isolée*..... 42

**Tableau 3-8** : *Les matériaux composant la charpente de la maison isolée*..... 44

**Tableau 3-9** : *Les matériaux composant la toiture vitrée de la maison isolée*..... 45

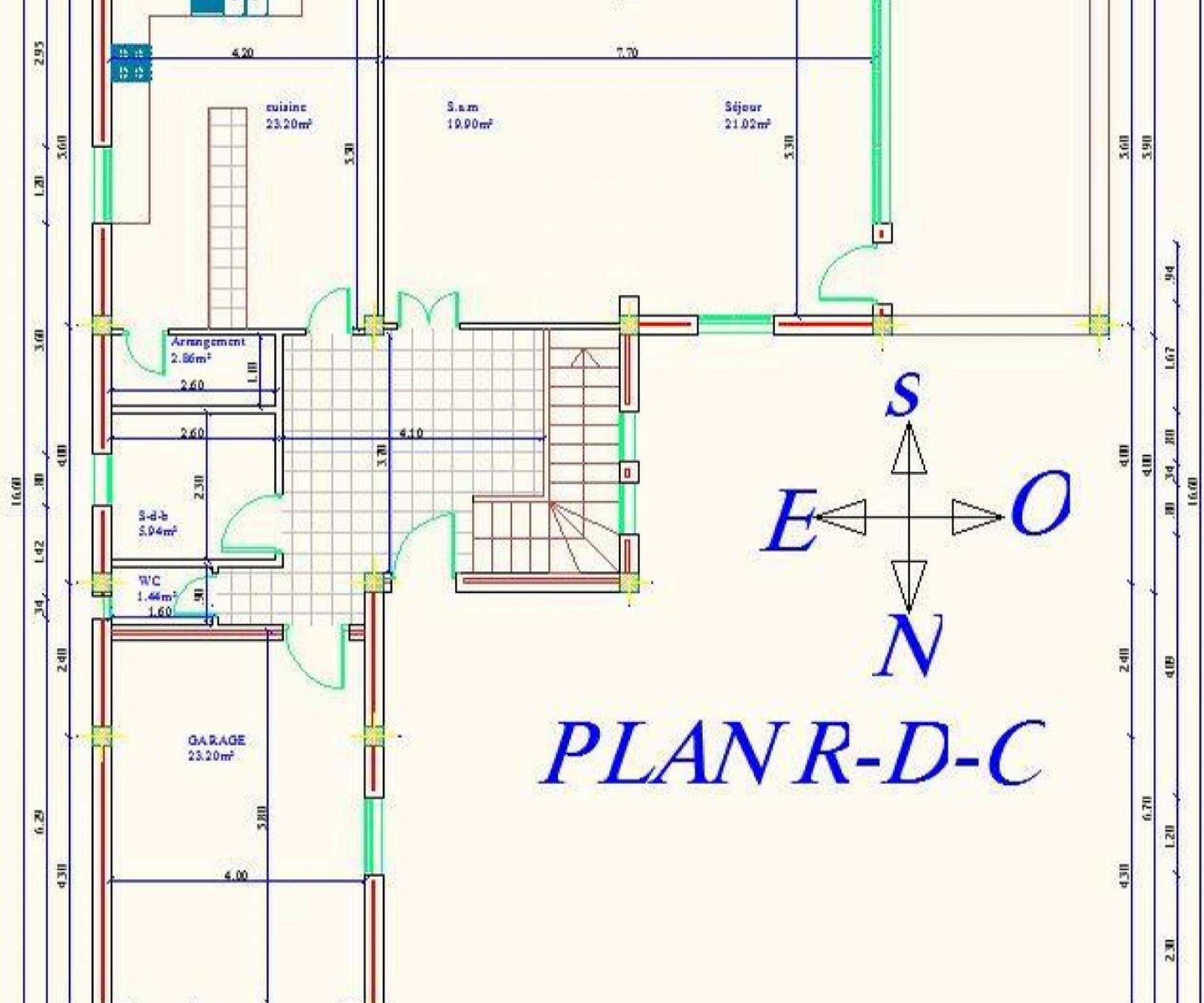
### Chapitre 4

**Tableau 4 -1** : *La consommation journalière d'énergie de la maison*..... 73

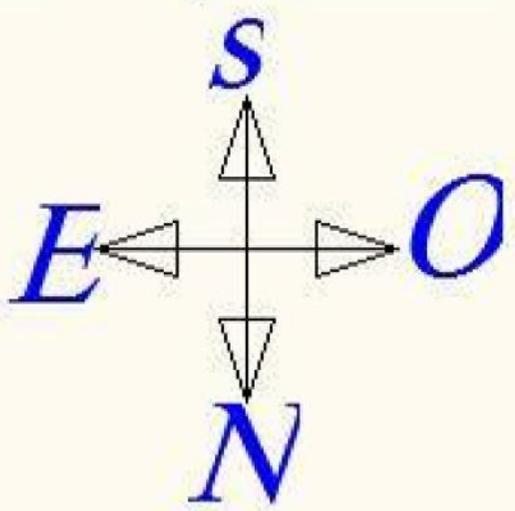
**Tableau 4-2** : *Tableau de dimensionnement de la climatisation*..... 80

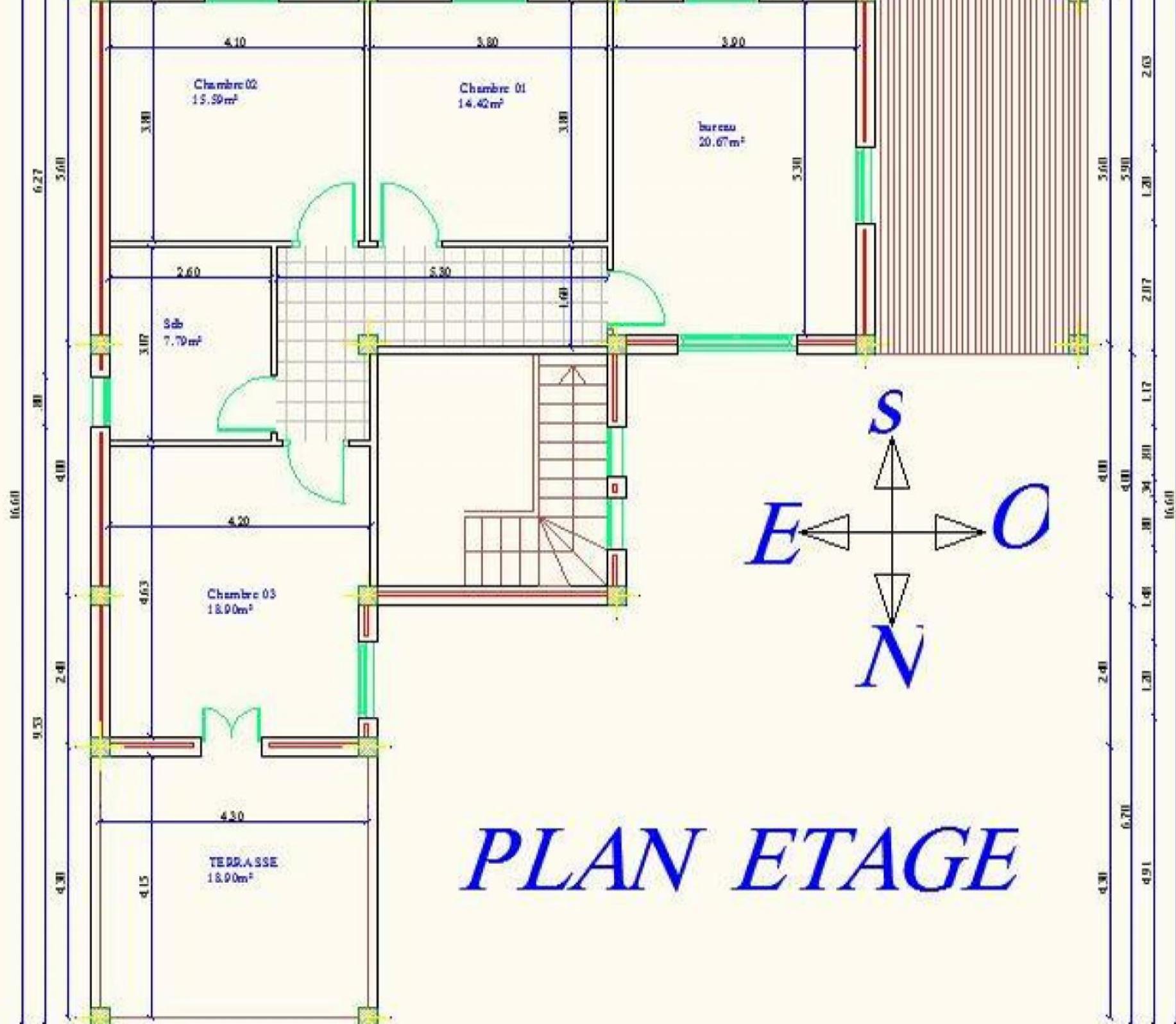
**Tableau 4-3**: *Tableau de dimensionnement des équipements de la maison*..... 82

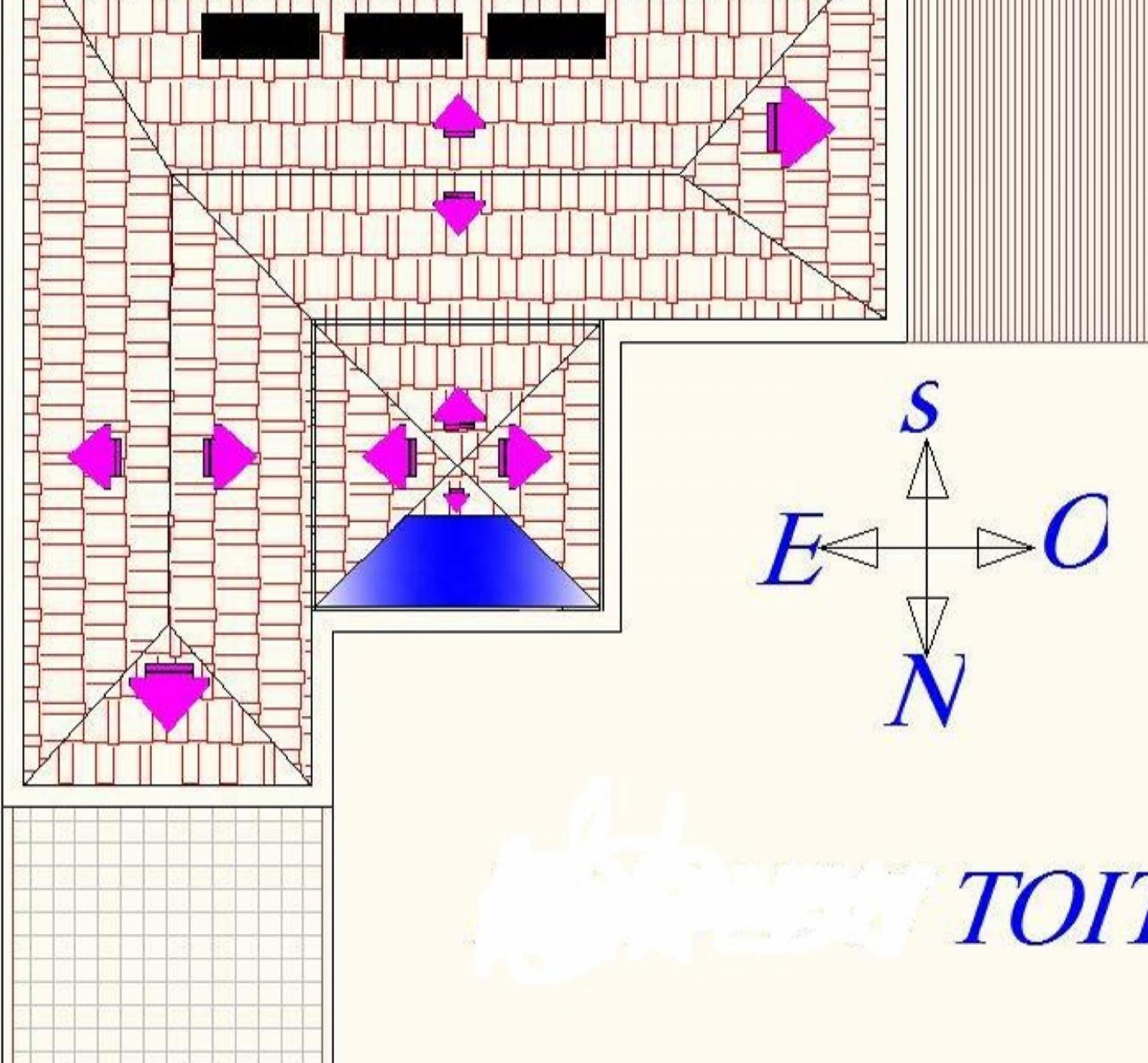
**Tableau 4-4** : *Estimation du coût de l'installation*..... 86



# PLAN R-D-C







*TOITURE*



# **SOMMAIRE**

## Sommaire

Introduction générale .....	1
-----------------------------	---

### **Chapitre 1**

1. Le confort thermique .....	2
Introduction.....	2
1.1. Notion de confort thermique .....	2
1.1.1. Introduction et définition .....	2
1.1.2. Métabolisme.....	2
1.1.3. Zone de confort thermique .....	4
1.1.4. Grandeurs physiques qui interviennent dans l'équilibre thermique du corps .....	4
1.2. Le conditionnement de l'air .....	5
1.2.1 Définition .....	5
1.2.2 But du conditionnement de l'air .....	5
Conclusion .....	6
2. Généralités sur le transfert thermique.....	7
Introduction.....	7
2. Modes de transfert de chaleur.....	7
2.1 La conduction .....	7
2.2 La convection.....	13
2.3. Le rayonnement .....	17
2.4. Le coefficient d'échange global .....	19
Conclusion .....	20

### **Chapitre 2**

Isolation thermique .....	22
Introduction.....	22
1. Caractéristiques principales de l'isolation thermique.....	22
1.1 La conductivité thermique .....	22
1.2 La résistance thermique ( $R = 1/K$ ) ou coefficient de conductance $K$ .....	22
2. Déperditions thermiques .....	23

2.1 Déperditions surfaciques par transmission.....	23
2.2 Déperditions linéiques.....	24
2.3 Déperditions par renouvellement d'air.....	24
3. Types d'isolation.....	24
3.1 : Isolation par l'intérieur.....	24
3.2 : Isolation par l'extérieur.....	25
4. Matériaux utilisés dans la maison écologique.....	25
4.1 Types de matériaux.....	26
4 : Inertie thermique.....	28
4.1 Les principales caractéristiques de l'inertie thermique.....	28
Conclusion.....	29

### ***Chapitre 3***

Etude thermique comparative entre une maison isolée et une autre non isolée.....	31
Introduction.....	31
1. La maison non isolée.....	31
1.1. Le plancher.....	31
1.2. Parois extérieures.....	33
1.3. Plancher haut du garage qui donne sur la terrasse.....	34
1.4. Plancher haut.....	35
1.5 Bilan estival et hivernal.....	37
2. La maison écologique.....	38
2.1 Parois vitrées.....	39
2.2 Plancher bas.....	39
2.3 Les murs.....	41
2.4 Plancher haut du garage.....	42
2.5 Charpente.....	44
2.6 Toiture vitrée.....	45
3. Etude thermique de la maison non isolée (bilan estival).....	46
4. Bilan estival de la maison écologique.....	51

## **Chapitre 4**

### Dimensionnement des panneaux hybrides (PV/T)

Introduction.....	57
1. Le principe du capteur solaire hybride (PVT) .....	57
1.1.1 Le solaire hybride .....	57
1.1.2 Le capteur solaire hybride : la solution optimisation .....	58
2. Le principe de l'effet photovoltaïque .....	59
2.1. La cellule photovoltaïque .....	60
2.2. Le matériau de base de la cellule photovoltaïque .....	62
3. Paramètres électriques du module photovoltaïque .....	64
3.1 Rendement .....	64
3.2 Regroupement des cellules .....	64
3.3 Système de stockage .....	66
4 Installation des panneaux.....	68
4.1 Disposition des panneaux.....	68
4.2 Installation des éléments de la batterie.....	70
5. Etude et dimensionnement d'un système photovoltaïque .....	71
5.1 Bilan énergétique de la maison .....	72
5.2 Dimensionnement photovoltaïque .....	73
6.2 Principe du système thermique .....	83
7. Estimation du coût de l'installation .....	85
Conclusion .....	87



**INTRODUCTION  
GENERALE**

### Introduction

Sur terre, l'homme a longtemps été un élément parmi les autres au sein des écosystèmes naturels. Cependant, en raison des progrès technologiques et de l'accroissement démographique, l'activité humaine est désormais considérée comme une des causes de ce que l'on appelle le changement climatique.

Si l'espèce humaine est la seule dont l'activité ait une influence majeure sur son milieu de vie, c'est aussi le seul qui peut agir pour tenter de restaurer certains équilibres menacés.

La notion assez générale d'une maison écologique correspond au souci de construire un habitat plus respectueux de l'environnement, plus sain et plus économe en énergie en matière première non renouvelable. D'une manière générale une maison est construite pour durer donc, ce n'est pas seulement sa construction qu'il faut soigner mais aussi son coût à l'utilisation, en argent et en ressource énergétique, au cours de ses longues années d'occupation : chauffage, éclairage, ventilation et eau.

Etre économe en énergie, c'est d'économiser les ressources dites fossiles, qui sont appelées à disparaître, en plus l'utilisation de ces énergies est source de pollution et en partie responsable du réchauffement climatique par les émissions de CO<sub>2</sub> qu'elle engendre, et pour mémoire, le pétrole est une matière première indispensable à la chimie moderne (résine, textile, plastique...), il est dommage de les utiliser pour se chauffer ou de se déplacer.

- Consommer le moins possible pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire, l'éclairage.
- Préférer les énergies renouvelables (solaire, éolienne, géothermie), le soleil, lui, n'est pas prêt de manquer.

Et pour concevoir une maison écologique, il faut mettre en œuvre des matériaux de construction au pouvoir isolant élevé, pour isoler correctement afin de dépenser le moins possible pour chauffer un habitat bien orienté, et avec une bonne inertie thermique « intelligent » pour conserver la chaleur en hiver et la fraîcheur en été.

Pour la production de l'électricité, l'énergie solaire photovoltaïque est la plus adéquate pour cette maison au vu des données locales, pour une installation autonome, nous utiliserons des panneaux hybrides photovoltaïques thermiques (PV/T), qui pourront alimenter la maison en électricité et en énergie thermique (pour le chauffage, eau chaude des sanitaire).

Dans ce travail, nous ferons une étude comparative entre deux maisons, l'une dite écologique et l'autre non isolée, pour évaluer la différence des pertes thermiques. Nous évoquerons le confort thermique indispensable pour le bien être de l'individu, ainsi que les notions du transfert thermique de l'isolation et de l'inertie thermique, puis nous ferons un dimensionnement des installations électrique et thermique de la maison.



# Chapitre 1

***LE CONFORT  
THERMIQUE ET  
GENERALITES SUR LE  
TRANSFERT THERMIQUE***

## **1. Confort thermique**

### **1.1. Introduction**

Le bien-être chez soi constitue l'un des éléments les plus importants du confort, qui caractérise le niveau de vie d'une population. Ce confort s'analyse comme la combinaison de plusieurs facteurs.

Au-delà de l'agencement, de la décoration et de l'éclairage, le confort thermique peut être considéré comme la base à satisfaire pour assurer un réel bien-être chez soi, sur son lieu de travail, dans une surface commerciale ou salle de spectacle. Résultante de plusieurs paramètres qui s'influencent mutuellement, le confort thermique s'analyse objectivement, même s'il conserve un caractère subjectif.

### **1.2. Notion de confort thermique**

#### **1.2.1. Introduction et définition**

L'homme moderne passe en gros 90 % de son temps dans des locaux fermés. Il est donc impératif de prendre toutes les dispositions pour que l'air qu'il respire soit, non seulement correctement renouvelé mais aussi en outre, il soit suffisamment humidifié, principalement en hiver durant la période de chauffage.

Le corps humain est le siège d'une production de chaleur dont il faut tenir compte pour assurer le confort des occupants d'un local.

Ainsi, la thermo-physiologie, qui est l'étude du comportement thermique du corps humain, permet d'expliquer les mécanismes de l'adaptation du corps à son environnement et d'en déduire les conditions à assurer par la technologie mise en œuvre (chauffage, climatisation).

#### **1.2.2. Métabolisme**

L'activité de l'individu (activité biologique et musculaire) crée au sein du corps humain un dégagement de chaleur. Cette énergie est appelée métabolisme, et est exprimée en [W]. La surface de la peau adoptée est de  $1.8 \text{ [m}^2\text{]}$  et la production de chaleur est supposée uniforme sur tout le corps. Les thermo-physiologistes utilisent l'échelle <<met>>, tel que  $1 \text{ met} = 58 \text{ W/m}^2$  en prenant comme référence la position assis-debout.

Le tableau ci-après, donne les valeurs moyennes de cette énergie :

Tableau 1-1 : Métabolisme [05].

Activité	W	W/m <sup>2</sup>	met
Repos. Couché	120	46	0.8
Repos. Assis	174	58	1.0
Activité légère (assis) et repos debout	170	70	1.2
Activité légère (debout)	230	93	1.6
Activité soutenue	315	174	3.0
Danse, jeux	395	220	3.8
Activité moyenne	210	116	2.0

La quantité de chaleur dissipée par le corps lors de l'activité, doit correspondre au métabolisme et le cas échéant, il s'ensuit des troubles physiologiques ou coup de chaleur. Le corps échange de l'énergie calorifique, essentiellement par trois modes de transfert de chaleur :

- Echanges par rayonnement avec les surfaces environnantes (en W/ m<sup>2</sup>)

$$r_{\text{ray}} = 7.15 (T_c - T_a) \quad (1.1)$$

- Echanges par convection avec l'air ambiant (en W)

$$r_{\text{cv}} = 5.6 (T_c - T_a) \quad (1.2)$$

- Echanges par évaporation (en W)

$$r_1 = 9.10^{-2} V (p_{\text{vs}} - p_{\text{vo}}) \quad (1.3)$$

$T_c$  : température de surface du corps.

$T_p$  : température des parois.

$T_a$  : température de l'air (en °C).

$P_{\text{vo}}$  : pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air (en Pa) à la température  $T_c$ .

$P_{\text{vs}}$  : pression partielle saturante en (Pa).

$V$  : portion de la surface du corps mouillée par la sueur.

L'équilibre thermique du corps est déterminé par l'égalité entre les échanges avec le milieu extérieur et le métabolisme, il faut satisfaire l'égalité suivante :

$$M = \dot{Q}_{\text{ray}} + \dot{Q}_{\text{cv}} \quad (1.4)$$

### 1.2.3. Zone de confort thermique

La sensibilisation de chaleur ou de froid (confort thermique) à l'intérieur d'un local par les occupants tient compte à la fois de la température de l'air et de son humidité relative, sa vitesse de circulation et la température des parois.

Les différentes zones en tenant compte de la variation de la température de l'air et son humidité relative sont :

- Zone-1- : zone de grand confort thermique.
- Zone-2- : zone de confort admissible.
- Zone-3- : zone de difficulté respiratoire.
- Zone-4- : zone d'étouffement.

### 1.2.4. Grandeurs physiques qui interviennent dans l'équilibre thermique du corps

- Température d'air (K) : intervient dans les échanges par convection et par évaporation.
- Température moyenne des parois  $T_p$  (K) : intervient dans les échanges par rayonnement.
- Vitesse de l'air  $U$  (m/s) : intervient en convection et évaporation
- Humidité relative de l'air  $\phi$  (%) : elle apparait dans les lois de l'évaporation

Ce sont donc quatre paramètres qui décrivent le local d'un point de vue du confort thermique.

### 1.3. Le conditionnement de l'air

#### 1.3.1 Définition

La notion de conditionnement de l'air a pris naissance en 1902, sous l'impulsion de W.H CARRIER, et en 1929, l'association américaine des ingénieurs en chauffage et ventilation (A.S.H.R.E.A) définissaient le fonctionnement de l'air comme le traitement de l'air assurant la maîtrise simultanée de sa température, son humidité, sa pureté et sa répartition.

Ainsi le conditionnement de l'air, qui a pour but d'assurer un confort thermique, consiste à amener l'air introduit dans un local d'une habitation, à des conditions bien déterminées à savoir :

- La température.
- L'humidité relative (degré hygrométrique).
- La pureté.
- Le renouvellement, la vitesse, la direction et répartition.

#### 1.3.2 But du conditionnement de l'air

Conditionner l'air, c'est créer à l'intérieur des locaux un climat favorable pour les occupants qui correspond à leurs besoins et leur équilibre physiologique au repos comme à l'activité.

Ainsi, l'homme adulte, se livrant à une activité physique, dégage une quantité de chaleur allant jusqu' à 200 kcal/h et 150 kcal/h s'il est au repos [05]. La sensation désagréable éprouvée en atmosphère confinée résulte en partie de la température et de l'humidité trop élevée due à la fois au dégagement calorifique des corps humains et à la vapeur d'eau rejetée par respiration. Les deux facteurs qui sont la température et le degré hygrométrique ne suffisent pas à eux seuls à définir une sensation de bien être, qui reste toutefois essentielle à la délimitation de zones de confort thermique, un autre facteur non moins important à savoir le degré de pureté qui joue un rôle non négligeable.

En effet, la présence d'occupants dans un local fermé en vicie rapidement l'atmosphère par suite de dégagement de CO<sub>2</sub> résultat de la respiration, de la fumée et des autres odeurs ainsi que des poussières soulevées par les occupants du local pendant l'activité.

**Conclusion**

Le calcul des déperditions de chaleur permettra de déterminer les besoins de nos habitations en termes de chaleur et rafraîchissement pour atteindre le confort thermique en période estivale, et en période hivernale.

## 2. Généralités sur le transfert thermique

### 2.1. Introduction

La transmission de la chaleur ou la théorie d'échange de chaleur est une science qui traite la propagation de la chaleur dans différents milieux.

L'expérience montre que deux corps isolés de l'ambiance et à température différente échangent de l'énergie sous forme de chaleur jusqu'à disparition complète de leur différence de température.

On distingue trois modes de transmission de la chaleur :

- La conduction
- La convection
- Le rayonnement

## 2. Modes de transfert de chaleur

### 2.1 La conduction

#### 2.1.1 Définition

La conduction thermique est la propagation de la chaleur, de molécule à molécule, dans un corps ou dans plusieurs corps contigus non réfléchissants, sans qu'il y ait mouvement du milieu ou que ce mouvement intervienne dans la transmission.

Ce mode de transmission caractérise essentiellement les transferts de chaleur dans les solides ou entre les corps solides contigus. La conduction intervient également dans les liquides et les gaz mais, sauf que dans le cas des liquides très visqueux ou des gaz emprisonnés dans des matériaux poreux, son effet est marginal par rapport à celui de la convection.

### 2.1.2. Loi de Fourier

Dès 1822, Fourier écrit l'expression de la densité de flux élémentaire de chaleur pendant un temps  $dT$  sous la forme suivante :

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\phi}{dx} &= - \frac{dT}{dx} \end{aligned} \right. \quad (1.5)$$

Le signe moins signifie que le flux calorifique va du corps chaud au corps froid, le signe du gradient de température étant opposé à celui du flux.

### 2.1.3 La conduction en régime permanent

Les paragraphes qui suivent donnent quelques résultats de l'expression de flux thermique obtenu en régime permanent dans le cas de corps de formes géométriques simples.

### 2.1.4 La conduction à travers une paroi plane

- paroi à une seule couche

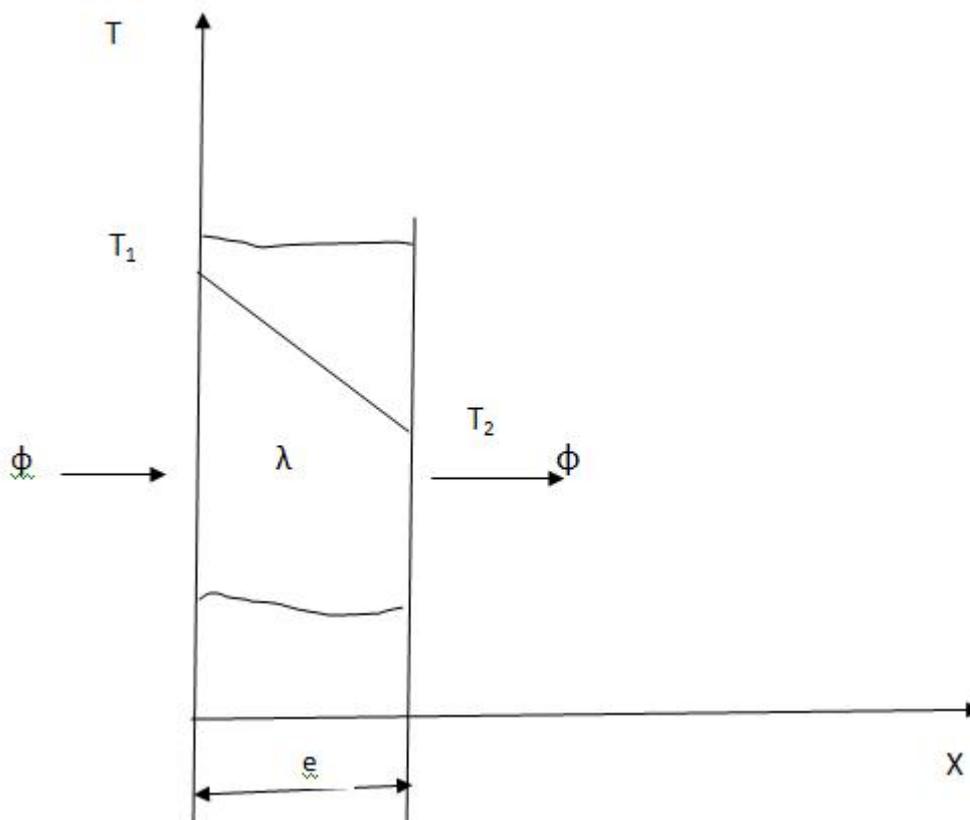


Figure 1-1 : Paroi à une seule couche.

La variation de la température suivant l'épaisseur de la paroi est régie par une relation linéaire. Le flux de chaleur passant à travers la paroi est exprimé par la loi de Fourier :

$$w = -\lambda s \times \frac{dT}{dx}$$

- **Paroi à plusieurs couches (murs composé)**

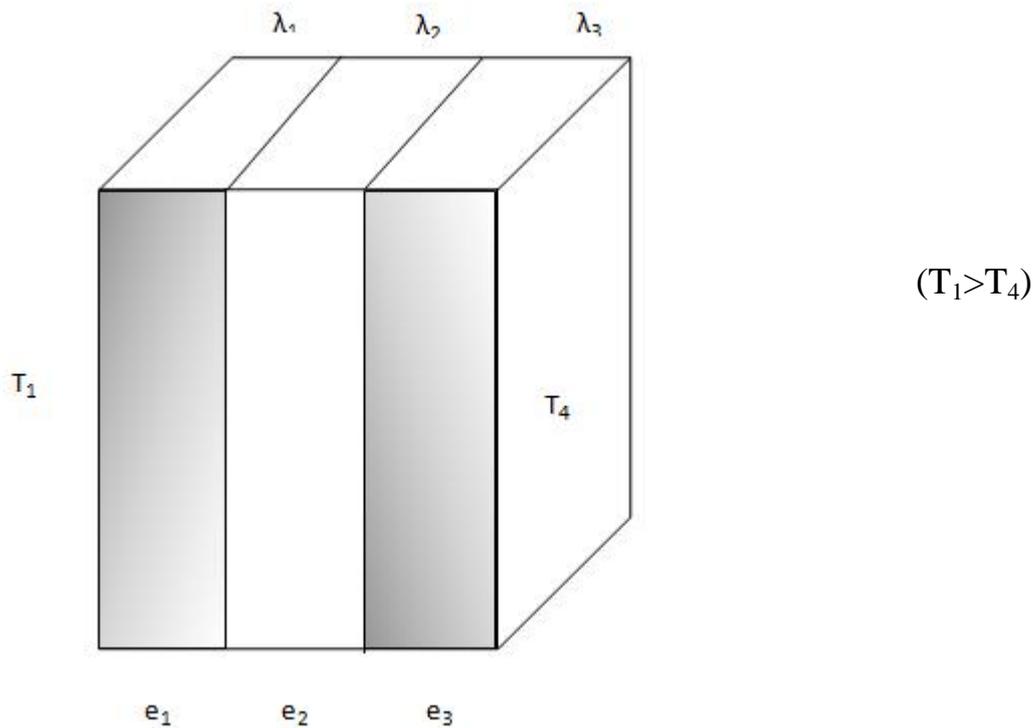


Figure 1-2 : Paroi à plusieurs couches.

Considérons une paroi constituée de trois couches de matériaux différents adhérant intimement l'une à l'autre.

Le flux de chaleur est constant pour toutes les couches de la paroi. C'est pourquoi pour chacune des couches nous pouvons écrire l'équation suivante :

- Première couche :  $\Phi = \frac{\lambda_1}{e_1} S (T_1 - T_2)$  (1.6)

- Deuxième couche :  $\Phi = \frac{\lambda_2}{e_2} S (T_2 - T_3)$  (1. 7)

- Troisième couche :  $\Phi = \frac{\lambda_3}{e_3} S (T_3 - T_4)$  (1. 8)

Le flux exprimé par les relations (équations) (1. 3), (1. 4) et (1. 5) étant les mêmes, on peut écrire pour la densité du flux  $\{$  :

$$\{ = \frac{\lambda_1}{e_1} (T_1 - T_2) = \frac{\lambda_2}{e_2} (T_2 - T_3) = \frac{\lambda_3}{e_3} (T_3 - T_4) \quad (1. 9)$$

On peut alors écrire :

$$\{ = \frac{(T_1 - T_2) + (T_2 - T_3) + (T_3 - T_4)}{\frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3}} \quad (1. 10)$$

Soit :

$$\{ = \frac{(T_1 - T_4)}{\frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3}} \quad T_1 > T_4 \quad (1. 11)$$

Si le mur est constitué par l'accrolement de n couches d'épaisseurs  $e_1, e_2, \dots, e_n$  et de conductivités thermiques  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ , le flux reste toujours constant et s'écrit :

$$w = \frac{(T_1 - T_{n+1})}{\sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i}} S \quad (1. 12)$$

### 2.1.5. La conduction à travers une paroi cylindrique

Outre les parois planes, dans le domaine pratique de l'échange de chaleur, il est souvent utilisé des parois cylindriques (paroi de tubes) qui sont soit à une seule couche soit à plusieurs couches.

- Paroi cylindrique à une seule couche :

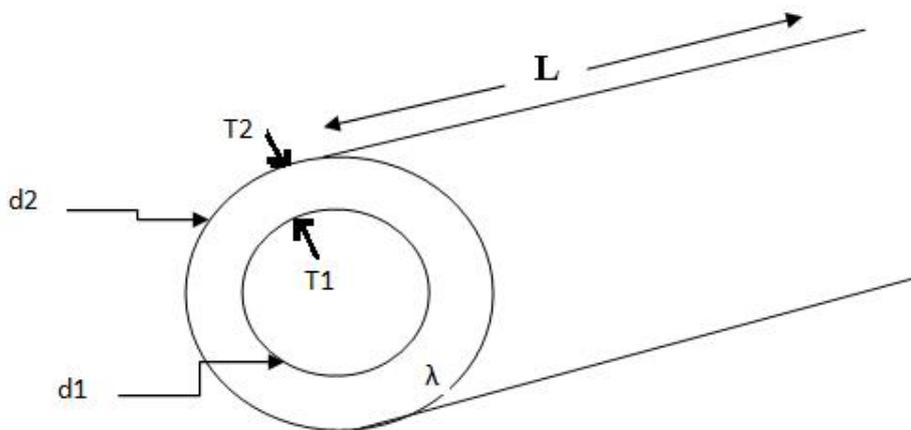


Figure 1-3 : Paroi cylindrique à une seule couche.

La valeur de flux passant à travers une paroi cylindrique à une seule couche est :

$$W = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{2\pi\lambda L} \ln \frac{d_2}{d_1}} \quad T_1 > T_2 \quad (1.13)$$

- **Paroi cylindrique à plusieurs couches :**

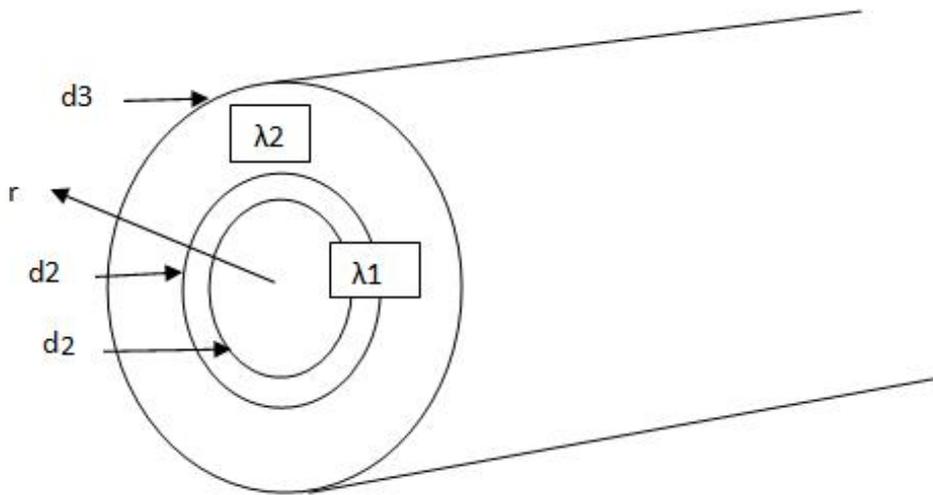


Figure 1-4 : Parois cylindrique à plusieurs couches.

Dans le cas d'une paroi composée, l'expression du débit de chaleur s'écrit :

$$W = \frac{T_1 - T_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2f_i L} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}} \quad (1.14)$$

### 2.1.6 Paroi sphérique

En régime permanent, la formule donnant le flux de chaleur pour une paroi sphérique de rayon interne  $r_i$  et de rayon externe  $r_e$  est donné par:

$$W = \frac{4f\lambda(T_i - T_e)}{\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_e}} \quad (1.12)$$

$T_i > T_e$

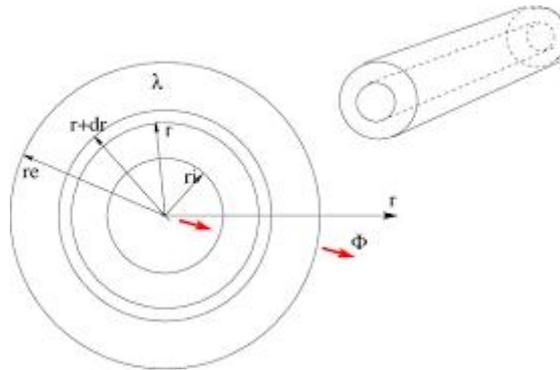


Figure 1-5 : Paroi sphérique.

La distribution de la température à l'intérieur de la paroi sphérique a une allure hyperbolique. La température, à une distance  $r$  du centre, est donnée par :

$$T = T_i - \frac{W}{4f\lambda} \left( \frac{1}{r_i} - \frac{1}{r} \right) \quad (1.15)$$

## 2.2 La convection

### 2.2.1 Définition

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

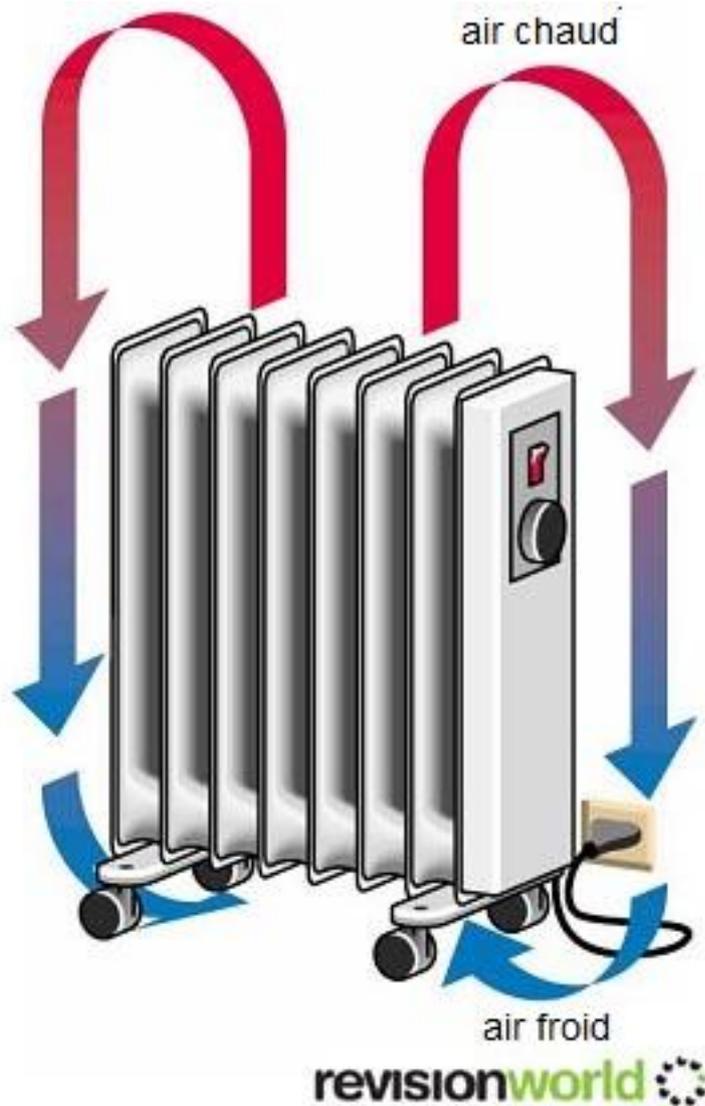


Figure 1-6 : Schéma qui illustre la convection.

Le flux de chaleur transmis par convection, entre une paroi à température  $T_p$  et un fluide à température  $T_\infty$  (Température mesurée loin de la paroi), peut s'écrire sous la forme (loi de Newton) :

$$w = hs(T_p - T_\infty) \quad (1.16)$$

Avec :

$h$  : coefficient d'échange convectif.

## 2.2.2. Rappels sur les principaux nombres sans dimension

L'étude des problèmes de transfert de chaleur par convection implique la résolution d'équations différentielles qui décrivent la mécanique des fluides, les échanges d'énergie, les transferts de masse. Ces équations sont généralement liées et difficiles à résoudre théoriquement, ce qui conduit à associer à la théorie l'expérimentation permettant de trouver les valeurs des grandeurs recherchées.

### 2.2.1. Nombre de Reynolds

$$\text{Re} = \frac{GD}{\sim} = \frac{\dots UD}{\sim} \quad (1.17)$$

Avec :

$D$  : Dimension caractéristique de la conduite : diamètre s'il s'agit d'une conduite circulaire ou diamètre hydraulique dans les autres cas :  $D_h = 4A/P$ ,  $A$  étant la section de la conduite et  $P$  le périmètre mouillé.

### 2.2.2. Nombre de Prandtl

$$\text{Pr} = \frac{\sim \times C_p}{\}} \quad (1.18)$$

Ce nombre caractérise le fluide dans un état donné :

- Pour les métaux liquides.....  $\text{Pr} = 10^{-3}$  a  $10^{-2}$ .
- Pour l'eau et l'air .....  $\text{Pr} = 2,38$  (eau).
- Pour les huiles .....  $\text{Pr} = 10^2$  a  $10^7$ .

### 2.2.3. Nombre de Nusselt

$$Nu = \frac{h \times D}{\lambda} \quad (1.19)$$

Avec :

- $h$  : coefficient local de convection thermique.  
Il caractérise le transfert de chaleur par convection.

### 2.2.4. Nombre de Péclet

$$Pe = Re \cdot Pr \quad (1.20)$$

Il caractérise la convection forcée.

### 2.2.5. Nombre de Grashof

Il caractérise le déplacement du fluide dans un phénomène de convection naturelle.

C'est un nombre adimensionnel qui caractérise la convection libre dans un fluide, il représente le rapport des forces de gravité sur les forces visqueuses.

Si la température de parois ( $T_p$ ) est constante, le nombre de Grashof s'écrit :

$$Gr = \rho \beta g (T_p - T_\infty) \frac{D^3}{\nu^2} \quad (1.21)$$

Avec :

$\beta$  : Coefficient de dilatation thermique volumique.

$$\beta = \frac{1}{T_p - T_\infty} \left( \frac{\rho_{SAT} - \rho_0}{\rho_0} \right) \quad (1.22)$$

$g$  : accélération due à la pesanteur ( $g=9.81 \text{ m/s}^2$ ).

$T_\infty$  : température de l'air loin de la paroi.

$\rho_0$  et  $\rho_{SAT}$  : masses volumiques, respectivement à  $T_p$  et  $T_\infty$ .

### 2.2.6. Nombre de Rayleigh

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (1.23)$$

C'est un nombre adimensionnel qui caractérise le transfert de chaleur au sein d'un fluide en convection libre. Selon le mode d'échange (à température de paroi constante ou à flux thermique constant) on fait intervenir dans la relation ci-avant le nombre de Grashof ou le nombre de Grashof modifié.

### 2.2.7. La convection forcée

Le mouvement résulte de la variation de la masse volumique du fluide avec la température ; cette variation crée un champ de forces gravitationnelles qui conditionne les déplacements des particules du fluide.

Dans ce cas, le coefficient de convection  $h$  est déterminé à partir de corrélations reliant le nombre de Nusselt aux nombres de Reynolds et Prandtl. Dans le cas d'une plaque plane, l'analyse du système d'équations décrivant le transfert de chaleur dans un fluide en mouvement conduit en termes d'ordre de grandeur à l'épaisseur des couches limites visqueuse et thermique.

D'où le nombre de Nusselt :

$$Nu = \frac{hx}{\lambda} = C \cdot Pr^{1/3} Re^{1/2} \quad (1.24)$$

Avec  $C$  constante qui dépend du nombre de Reynolds.

#### - Ecoulement à l'intérieur d'un tube

- Ecoulement laminaire avec  $Re < 2300$  :
  - à température de paroi uniforme .....  $Nu = 4,36$
  - à flux de chaleur uniforme.....  $Nu = 4,36$

- Ecoulement turbulent avec  $Re > 10^4$  : on utilise la correction de Dittus-Boelter.

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n \quad (1.25)$$

Avec  $n = 0,4$  si le fluide s'échauffe, et  $n = 0,3$  si le fluide se refroidit.

### • Calcul du coefficient d'échange

Pour arriver à calculer le coefficient  $h$ , il faut d'abord calculer le nombre de Reynolds ( $Re$ ) qui est donné par la relation :

$$Re = \frac{\rho \times V \times D}{\mu}$$

Puis le nombre de Prandtl donné par la relation :

$$Pr = \frac{\rho \times C_p}{\mu}$$

En fonction de  $Re$  et  $Pr$  ou de  $Gr$  et  $Pr$ , selon que la convection soit forcée ou naturelle on détermine la corrélation qui donne le nombre de Nusselt et on écrit :

$$h = \frac{Nu}{D} \quad (1.26)$$

## 2.3. Le rayonnement

### 2.3.1. Définition

Dans la transmission de chaleur par rayonnement, le transfert thermique s'effectue par des vibrations électromagnétiques qui se propagent en ligne droite sans aucun support de matière.

Le rayonnement peut être décomposé en radiations monochromatiques qui concernent une longueur d'onde déterminée. Aux températures des applications industrielles, le rayonnement est surtout constitué par de l'infrarouge.

Le flux de chaleur transmis par rayonnement par un corps d'émissivité  $\epsilon$ , porté à la température  $T$  (K) peut être exprimé par l'équation de Stephen-Boltzmann, qui s'écrit comme suit:

$$\Phi = \epsilon \cdot S \cdot T^4 \quad (1.27)$$

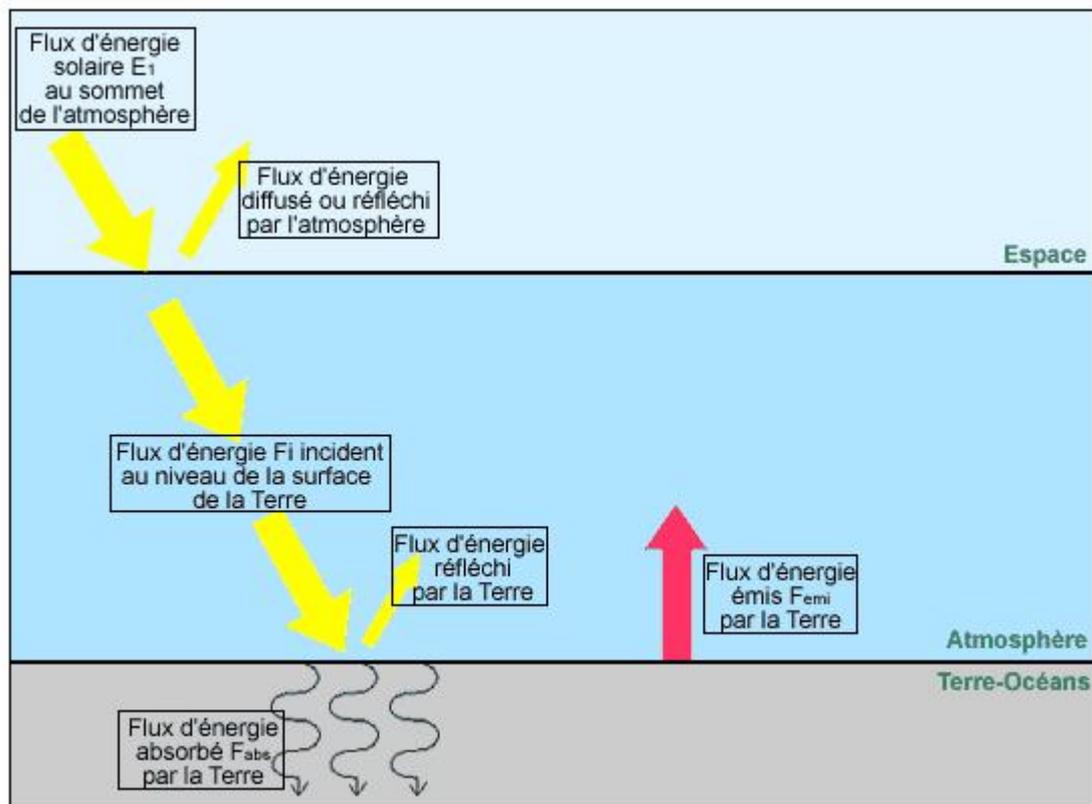


Figure 1-7 : Schéma qui illustre le rayonnement.

### 2.3.2. Propriétés du rayonnement calorifique

Lorsqu'un flux d'énergie rayonnée rencontre un corps transparent, une partie de l'énergie est absorbée, une partie est réfléchiée, une partie continue son trajet après avoir traversé le corps.

- Si toute l'énergie incidente est absorbée, le corps est appelé corps noir ou radiateur intégral.
- Si une partie de l'énergie est absorbée, mais que cette partie est constante quelle que soit la longueur d'onde de l'énergie incidente, on dit que l'on a affaire à un corps gris (dans le cas contraire, à un corps coloré).
- Si la proportion de l'énergie absorbée est indépendante de l'angle d'incidence du rayonnement reçu, on dit que le corps est mat (dans le cas contraire, on dit qu'il est poli).
- Si aucune énergie ne traverse le corps, on dit que ce dernier est opaque (le contraire de transparent).

### 2.3. Le coefficient d'échange global

Les trois modes de transfert (conduction, convection et rayonnement) ont lieu le plus souvent simultanément. On définit alors pour une surface d'échange donnée, un coefficient d'échange de chaleur global noté  $K$  par :

- Surface plane :

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_2}} \quad (1.28)$$

- Surface cylindrique :

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2f_i L} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{h_2}} \quad (1.29)$$

$h_1$  et  $h_2$  : coefficients en général de convection, parfois englobant le rayonnement.

**Conclusion**

L'étude des généralités du transfert thermique nous permettra de connaître quels sont les différents types de transfert thermique que nous aurons à étudier que ce soit pour le chauffage et climatisation ou pour l'évaluation des pertes énergétiques.



# Chapitre 2

***ISOLATION THERMIQUE  
ET INERTIE THERMIQUE***

## Isolation thermique

### Introduction

Pour avoir un confort thermique, une isolation thermique est plus que nécessaire.

En hiver, l'isolation donne une bonne sensation de confort tout en limitant la note de chauffage.

En été, le confort sera obtenu en associant les atouts de cette isolation à une forte inertie thermique de la maison, ainsi la température intérieure sera maintenue stable et la maison plus fraîche possible sans recourir à la climatisation.

En effet, une maison chauffée perd continuellement une partie de sa chaleur, les grosses fuites de chaleur s'effectuent par les surfaces : toiture, murs et vitrage. Ces points sensibles d'une habitation peuvent générer jusqu'à 60 % des déperditions en chaleur. Les joints entre les parois laissent également fuir la chaleur. Appelés « ponts thermiques », ces derniers peuvent participer de 5 à 25 % des fuites de chaleur.

Les déperditions thermiques peuvent être surfaciques, par transmission par les parois opaques et vitrage, linéiques à travers tous les angles de l'habitat et les ponts thermiques ou encore par renouvellement d'air.

## 1. Caractéristiques principales de l'isolation thermique

Dans le traitement des problèmes thermiques et énergétiques des bâtiments en rapport avec les matériaux isolants, deux principaux paramètres thermo-physiques interviennent.

### 1.1 La conductivité thermique

Il s'agit d'une donnée intrinsèque à chaque matériau, qui caractérise uniquement ses performances isolantes. Le coefficient de conductivité thermique  $\lambda$  d'un matériau caractérise sa capacité à transmettre la chaleur par conduction. Ainsi, plus  $\lambda$  est grand, plus le matériau est conducteur, et plus  $\lambda$  est petit, plus le matériau est isolant thermiquement.

### 1.2 La résistance thermique ( $R = 1/K$ ) ou coefficient de conductance $K$

La résistance thermique est le rapport de l'épaisseur d'un matériau à sa conductivité thermique ( $e/\lambda$ ). Elle s'exprime en mètre carré et en degré Celsius par watt ( $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ). Plus

R est élevée, meilleure est la performance d'isolation. Ce qui diminue les déperditions en hiver et les apports thermiques en été (transfert de chaleur par parois et vitrage). Dans un mur constitué de plusieurs couches de matériaux d'épaisseurs différentes, la relation donnant la résistance thermique s'écrit comme suit :

$$\frac{1}{K} = \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} \quad (2.1)$$

Où:

$1/h_e + 1/h_i$  : somme des coefficients d'échange superficiels externe et interne en ( $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ).

$R = 1/K$  : somme des résistances thermiques ( $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ).

En régime permanent, les coefficients d'échange superficiels prenant des valeurs conventionnels selon la position de la paroi. Ce qui n'est pas le cas pour le régime transitoire où ce coefficient tient compte des paramètres de facteurs de forme, dû à l'interaction entre toutes les surfaces internes à l'habitat avec un échange de rayonnement par infrarouge. Ils dépendent aussi des émissivités d'absorption de la voûte céleste et du sol par rapport à la surface externe les deux coefficients sont donnés en détails.

## 2. Déperditions thermiques

### 2.1 Déperditions surfaciques par transmission

L'ensemble de ces déperditions se font par conduction à l'intérieur des parois ou de vitrages, convection et rayonnement sur les surfaces interne et externe ou parois. La formule reliant ces pertes est donnée comme suit :

$$= \sum_i K_i S_i \Delta T \quad (2.2)$$

Où :

$K_i$  : coefficient de transmissions surfacique en ( $W/m^2 \cdot K$ ).

$S_i$  : surface intérieure de la paroi en ( $m^2$ ).

$T$  : ( $T_i - T_e$ ) différence de température entre l'intérieur et l'extérieur ( $^\circ C$ ).

## 2.2 Déperditions linéiques

La relation nous permettant de calculer les déperditions linéiques est donnée comme suit :

$$\Phi_l = \sum_i k_i L_i \Delta T \quad (2.3)$$

Où :

$k$  : coefficient d'échange de transmission linéique de la liaison en (W/m·K).

$L_i$  : longueur intérieure de la liaison en (m).

## 2.3 Déperditions par renouvellement d'air

On distingue deux cas de pertes par renouvellement d'air :

Celles dues au débit des infiltrations et celles des ventilations spécifiques. Toutes les deux doivent être prises en compte. Ainsi les déperditions par renouvellement d'air s'expriment comme suit :

$$w_r = \sum 0.34 q_e \Delta T_i \quad (2.4)$$

Où :

$$q_e = q_i + q_v$$

Avec :

$q_e, q_i, q_v$  : respectivement débit entrant par infiltration, débit par ventilation ( $m^3/h$ ).

## 3. Types d'isolation

Il existe trois façons pour isoler une habitation : en double cloison, isolation de l'intérieur et isolation de l'extérieur.

### 3.1 : Isolation par l'intérieur

Elle représente l'avantage d'être maîtrisée par tous les intervenants du bâtiment, mais elle est loin d'être la plus courante. Les isolants intérieurs, plus ils sont performants, plus l'influence relative de ponts thermiques s'accroît. Rappelons aussi qu'une isolation intérieure, même performante, présente toujours une faible inertie thermique.

### 3.2 : Isolation par l'extérieur

L'isolation de l'extérieur est la plus intéressante puisqu'elle présente des avantages multiples et importants :

- l'isolation extérieure permet de renforcer la protection des murs contre les dégradations du temps et les intempéries.
- Elle permet de supprimer la majorité des ponts thermiques tels que abouts de plancher ou de refends encadrement des baies (avec certaines précautions)
- Elle protège les gros œuvres contre une certaine contrainte thermique et limite les risques de condensation de la maçonnerie à l'intérieur du volume chauffé. Ceci améliore considérablement le confort thermique de l'habitation quelque soit la saison.
- Elle permet de placer les murs porteurs (lourds) du côté intérieur et donc de renforcer l'inertie thermique du logement, source de confort pour les occupants, car les murs lourds régulent la chaleur et l'humidité. En hiver et en demi-saison, ces murs intérieurs éclairés par le soleil accumuleront ces rayonnements pour la diffuser en soirée. En été, si vous ventilez bien la maison durant les heures fraîches de la nuit, ces murs lourds restitueront cette fraîcheur dans la journée.
- L'isolation par l'extérieur est beaucoup plus facile à réaliser par soi-même que l'isolation par l'intérieur, car les panneaux isolants pour l'extérieur sont légers et il suffit de les poser bien bord à bord. Il est préférable de choisir ces matériaux isolants pouvant être directement crépis. Toutefois la pose d'un crépi sur un isolant extérieur est plus technique que sur un mur maçonné.
- Elle a aussi l'avantage de ne pas modifier les surfaces habitables.

## 4. Matériaux utilisés pour la maison écologique

Dans la maison écologique, nous avons choisi une série de matériaux avec des caractéristiques bien définies pour une isolation optimale. Pour toutes les parois de la maison, la toiture, le sol, les murs et les fenêtres, l'isolation a été bien étudiée.

### 4.1 Types de matériaux

#### a. Les murs

Pour les murs, nous avons utilisé de la laine minérale entre la double murette et du polystyrène par l'extérieur (pour éliminer les ponts thermiques).

*Tableau 2-1 : Tableau des matériaux utilisés pour l'isolation des murs [08].*

Matériaux	Epaisseur (m)	Conductivité thermique (W/m.K)
Laine minérale	0.05	0.034
Polystyrène	0.1	0.038

### b. Les parois vitrées

Pour les parois vitrées, nous avons utilisé des fenêtres en PVC traité avec un double vitrage et une lame d'air avec de l'Argon (qui a une faible conductivité thermique).

*Tableau 2-2 : Tableau des matériaux utilisés pour les parois vitrées [08].*

Matériaux	Épaisseur (m)	Conductivité thermique (W/m.K)
Verre	0.1	1.5
Argon	0.01	0.017

### c. La toiture

Pour le toit, nous avons utilisé des tuiles avec de l'argile cuite, d'une conductivité thermique 1.15 W/m.K et de la mousse de polyuréthane dont  $\lambda = 0.032$  W/m.K.

*Tableau 2-3 : Tableau des matériaux d'isolation utilisés pour la toiture [08].*

Matériau	Épaisseur (m)	Conductivité thermique (W/m.K)
Tuile	0.03	1.15
Mousse de polyuréthane	0.1	0.032

#### d. Le plancher :

Pour le plancher, nous avons utilisé le liège pour bien isoler. Le liège est tiré de l'arbre chêne-liège, c'est un produit de faible densité, isolant thermique, acoustique et vibratoire bon pour l'isolation des planchers, sa conductivité thermique est de  $\lambda = 0.04 \text{ W/m.K}$ .

Tableau 2-4 : Tableau des matériaux d'isolation utilisés pour le plancher [08].

Matériau	Epaisseur (m)	Conductivité thermique (W/m.K)
Liège	0.01	0.04

## 4 : Inertie thermique

Dans les matériaux de construction couramment utilisés, l'inertie thermique d'un bâtiment se juge en première approximation par la masse interne d'un matériau mis en œuvre. Toutefois le rôle et les principaux paramètres sont énoncés comme suit :

En été, plus l'inertie thermique de l'habitation augmente, plus la température maximale atteinte est faible, et plus les variations des températures jour/nuit sont faibles. L'inertie thermique permet donc de lisser les flux thermiques et les températures extrêmes. L'utilisation des matériaux lourds contribue à donner au bâtiment une forte inertie. Elle évite les surchauffes et aide à la stabilisation de la température.

En hiver, l'inertie thermique joue également un rôle important, principalement dans le cas du chauffage intermittent. Le refroidissement est plus lent dans un local dont les parois sont lourdes. Les coupures de chauffage, visant à faire des économies d'énergie, sont d'autant moins intéressantes que la structure est plus inerte, car plus lourde.

### Les principales caractéristiques de l'inertie thermique sont :

- **La diffusivité thermique :**

La diffusivité thermique «  $a$  » exprime la vitesse à laquelle la chaleur se propage, par conduction, dans un corps. Plus la diffusivité thermique est élevée, plus le matériau

s'échauffe ou se refroidit rapidement. Tandis que, plus elle est faible, plus le front de chaleur mettra du temps à traverser l'épaisseur du matériau. La diffusivité thermique s'exprime selon l'équation suivante :

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot C} \quad (2.4)$$

Où :

a : diffusivité en (m<sup>2</sup>/s).

λ : conductivité thermique en (W/m.K).

ρ : la masse volumique en (kg/m<sup>3</sup>).

C : chaleur spécifique en (J/kg.K).

### • L'effusivité thermique :

L'effusivité thermique « b » exprime l'aptitude de la surface d'un matériau à stocker ou à restituer de la chaleur. Elle caractérise donc la capacité des matériaux à réagir plus au moins rapidement à un apport de chaleur au logement. Elle accroît avec la conductivité et la capacité thermique. Elle s'exprime en (W K<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup> s<sup>1/2</sup>) est donnée par la formule suivante :

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot C} \quad (2.5)$$

En général, pour réduire l'amplitude d'un flux thermique, les parois d'enveloppe devront présenter une faible diffusivité thermique et une forte effusivité.

Dans le contexte de la démarche bioclimatique, une inertie très lourde, associée à une bonne gestion des apports solaires (captage en hiver et protection en été) devient un critère décisif de la construction, notamment pour le confort de l'été, qu'il s'agisse des températures maximales atteintes ou des variations de températures jour/nuit.

## Conclusion

Le confort thermique, abordé dans ce chapitre, nous apprend qu'avant de réhabiliter un habitat existant, il est impérativement nécessaire d'avoir une vision globale du lieu et de conception de départ de notre habitation, notamment, le respect du concept bioclimatique, l'isolation de l'enveloppe extérieure et les matériaux de base utilisés dans la structure. Il nous apprend aussi que l'isolation par l'extérieur présente la solution la plus satisfaisante, principalement dans les régions chaudes moins pluvieuses. L'inertie thermique joue un rôle important dans l'habitat et contribue à l'isolation, puisqu'il présente un des facteurs influents par le choix de matériau avant de procéder à l'isolation.

Finalement les différents points clefs, retenus de part les travaux des auteurs cités principalement pour les régions chaudes peuvent être énumérés de la sorte :

- L'orientation sud/nord à privilégier ;
- La forme allongée dans la direction sud-ouest à privilégier à la forme carrée ;
- La compacité pour réduire la surface exposée à l'extérieur ;
- Parois lourdes pour stocker la chaleur (inertie thermique)
- Isolation de l'extérieur ;
- Limitation de la ventilation la journée pour réduire la pénétration de la chaleur à l'intérieur de la pièce ;
- Ventilation nocturne importante pour le rafraîchissement des surfaces de l'habitat ;
- Diminution des dimensions d'ouverture, juste pour assurer l'éclairage naturel ;
- L'utilisation de couleur claire pour limiter l'absorption de la chaleur ;
- Utilisation des protections solaires, (isolation, écrans, arcades et végétations ....etc.)
- Utilisation des protections contre les vents dominants amenant sable et poussières;

Enfin, les concepts bioclimatiques, l'isolation et l'inertie thermique, jouent un grand rôle dans la réhabilitation thermique et répond généralement au mode de vie de l'habitant sur sa consommation d'énergie et sur sa rentabilité.



# Chapitre 3

***ETUDE COMPARATIVE  
D'UNE MAISON  
ECOLOGIQUE ET UNE  
MAISON NON ISOLEE***

## INTRODUCTION

Dans cette partie, il s'agit de faire une étude thermique comparative entre une maison écologique, c'est à dire bien isolée, et une autre maison non isolée à forte consommation d'énergie.

Les deux maisons ont la même architecture (rez-de-chaussée, un étage, avec charpente, un garage et une terrasse).

Nous allons dresser des tableaux de matériaux constituant les parois et les planchers, ainsi que leurs propriétés et caractéristiques.

### 1. La maison non isolée

On commence avec la maison non isolée qui a une superficie de 110 m<sup>2</sup>, avec un garage de 29 m<sup>2</sup>.

#### 1.1. Le plancher

Le plancher bas de la maison est constitué de :

*Tableau 3-1 : Les matériaux composant le plancher de la maison non isolée [08].*

Couche	Epaisseur (m)	Conductivité thermique (W/m.K)
Dalle de sol	0.01	1
Mortier de pose	0.02	1.4
Chape	0.05	1.92
Dalle	0.1	1.279
Pré dalle	0.15	1.279

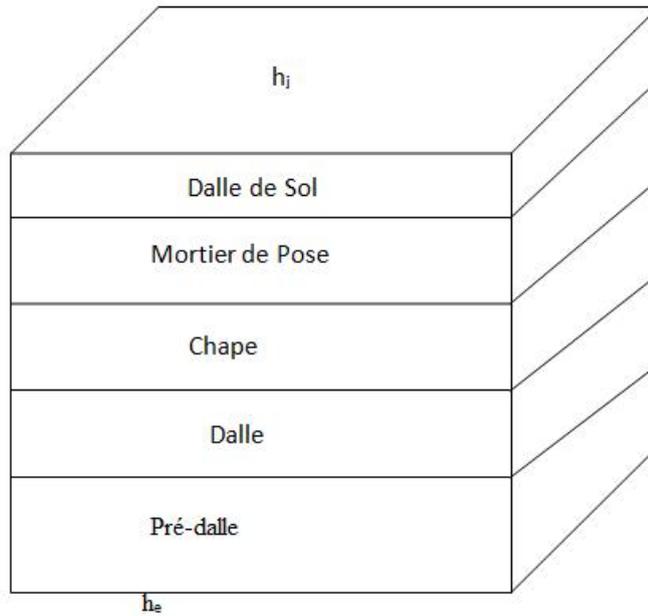


Figure 3-1 : Schéma du plancher de la maison non isolée.

### Calcul de la résistance thermique surfacique R

$$R = \frac{1}{h_i} + \underbrace{\frac{e_{d.s.}}{\lambda_{d.s.}}}_{\lambda_{d.s.}} + \underbrace{\frac{e_{m.p.}}{\lambda_{m.p.}}}_{\lambda_{m.p.}} + \underbrace{\frac{e_c}{\lambda_c}}_{\lambda_c} + \underbrace{\frac{e_d}{\lambda_d}}_{\lambda_d} + \underbrace{\frac{e_{p.d.}}{\lambda_{p.d.}}}_{\lambda_{p.d.}} + \frac{1}{h_e} \quad (3.1)$$

$$R = 0.416 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

Avec :

$h_i$ : coefficient d'échange convectif intérieur.

$h_e$ : coefficient d'échange convectif extérieur.

### Le coefficient global d'échange K

$$K = \frac{1}{R} = 2.40 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}.$$

## 1.2. Parois extérieures

Tableau 3-2 : Matériaux composant les parois extérieures de la maison non isolée [08].

Couche	Enduit ciment	Brique	Lame d'air	Brique	Plâtre
Conductivité Thermique (W/m.K)	1.2	0.78	0.24	0.78	0.35
Epaisseur (m)	0.02	0.1	0.05	0.1	0.03

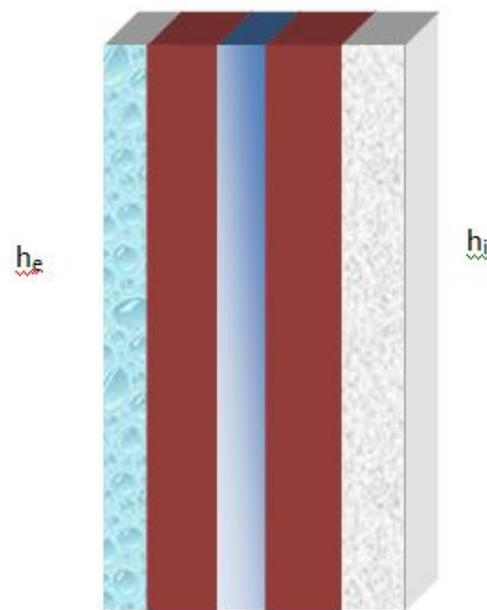


Figure 3-2 : Schéma des parois (murs) de la maison non isolée.

**Calcul de la résistance thermique surfacique R**

$$R = \frac{1}{h_i} + \frac{e_{e.c}}{\lambda_{e.c}} + \frac{e_b}{\lambda_b} + \frac{e_{l.a}}{\lambda_{l.a}} + \frac{e_b}{\lambda_b} + \frac{e_p}{\lambda_p} + \frac{1}{h_e} \quad (3.2)$$

$$R = 0.756 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$K = \frac{1}{R}$$

$$K = 1.32 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

**1.3. Plancher haut du garage qui donne sur la terrasse**

Tableau 3-3 : Les matériaux composant le plancher du garage de la maison non isolée [08].

Couche	Epaisseur (m)	Conductivité thermique (W/m.K)
Dalle de sol	0.01	1
Mortier	0.02	1.4
Béton	0.06	1.3
Hourdis	0.16	0.69
Crépi ciment	0.02	1.1

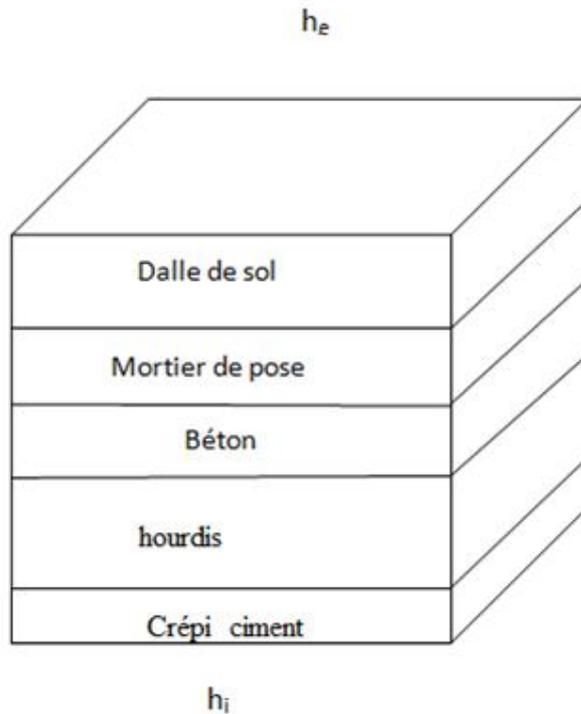


Figure 3-3 : Schéma du plancher du garage de la maison non isolée.

### Calcul de la résistance thermique surfacique R

$$R = \frac{1}{h_i} + \frac{e_{d.s}}{\} _{d.s}} + \frac{e_{m.p}}{\} _{m.p}} + \frac{e_b}{\} _b} + \frac{e_h}{\} _h} + \frac{e_{c.c}}{\} _{c.c}} + \frac{1}{h_e} \quad (3.3)$$

$$R = 0.66 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$K = \frac{1}{R} = 1.5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

### 1.4. Plancher haut

Le plancher haut de la maison est constitué de deux charpentes de surfaces, l'une est de  $148.67 \text{ m}^2$  et une autre de  $21.4 \text{ m}^2$ .

Tableau 3-4 : Les matériaux composant le plancher haut de la maison non isolée [08].

Couche	Épaisseur (m)	Conductivité thermique (W/m.K)
Argile cuite	0.03	1.15
Lame d'air	0.05	0.24
BA 13	0.013	0.27

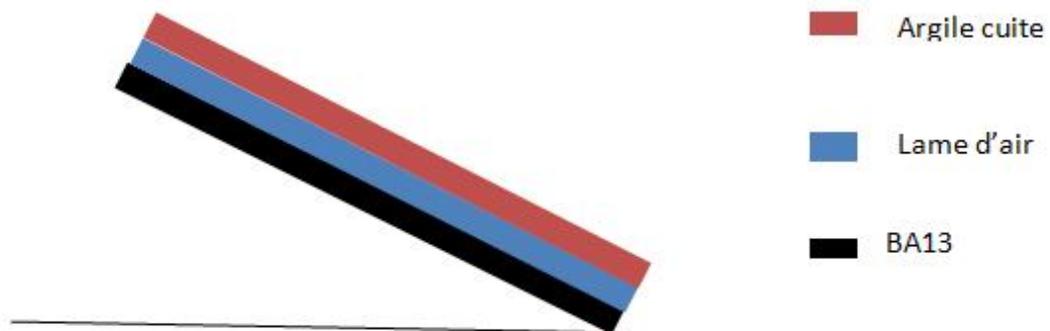


Figure 3-4 : Schéma du plancher haut de la maison non isolée.

### Calcul de la résistance thermique surfacique $R$

$$R = \frac{1}{h_i} + \frac{e_{a.c.}}{\lambda_{a.c.}} + \frac{e_{l.a.}}{\lambda_{l.a.}} + \frac{e_{BA13}}{\lambda_{BA13}} + \frac{1}{h_e} \quad (3.4)$$

$$R = 0.46 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$K = \frac{1}{R} = 2.17 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

## 1.5 Bilan estival et hivernal

Nous avons vu sur les tableaux précédents, les différents matériaux composant les parois avec les épaisseurs et leurs conductivités thermiques respectives. Nous avons également calculé la résistance thermique des parois de la maison et les coefficients de transmission.

### a. Bilan hivernal:

Pour le bilan hivernal nous avons la température de base moyenne qui est de 6 °C pour la région de Tizi-Ouzou, donnée par les services de météorologie de Tizi-Ouzou et la température de confort est prise égale à 20 °C.

**Le flux de transmission par les murs est donné par la relation :**

$$Q_{\text{mur}} = K \times S \times (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}) \times (1+z) \quad (3.5)$$

Le flux de transmission par les fenêtres et portes :

$$Q_{\text{portes et fenetres}} = K \times S \times (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}) \times (1+z) + \sum(al) (R.H) (1+Z_c) \quad (3.6)$$

Avec :

$$z = z_a + z_u + z_h$$

$$z_a + z_u = 0.07 \quad (\text{ATLAS SOLAIRE D'ALGERIE ET [03] LA METEOROLOGIE}).$$

$z_h$  : Coefficient de correction tenant compte de l'orientation,

$a$  : 2 : perméabilité du verre,

$l$  : infiltration par les joints des portes ou les fenêtres.

### b. Bilan estival :

Le flux total :

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{extern}} + Q_{\text{interne}} \quad (3.7)$$

Avec :  $T_{\text{ext}} = 1.5$  °C une marge de correction

$$Q_{\text{extern}} = K \times S \times (T_{\text{ext}} - T_{\text{int}} + 1.5 \text{ °C}), \quad \text{donnée par les services de métrologie)$$

$$\text{Apports par ensoleillement} = G \times S$$

Avec :

$G$  = moyenne du flux sur les vitrages.

$$\text{Apports par la façade Nord} = 143 \text{ W/m}^2$$

Apports par la façade Ouest = 283 W/m<sup>2</sup> (ATLAS SOLAIRE DE L'ALGERIE [03].

$$\text{Apports par la façade Sud} = 325 \text{ W/m}^2 \quad \text{Michel Capderou, édition 1973)}$$

interne = apports par éclairage = puissance de la lampe × Nombre de lampes

$$- \text{ Apports par les occupants} = A \times C \times s \quad (3.7)$$

150 kcal/h = 174W pour une personne inactive.

200 kcal/h = 230W pour une personne active.

$C$  : Durée d'occupation des lieux.

$N$  : Nombre d'occupants.

$$- \text{ Apports des machines} = 0.86 \times p_m \times N \times C_c$$

Tapez une équation

$P_m$  : Puissance de la machine,  $N$  : Nombre de machine,  $C_c$  : Rendement de la machine.

Et avec une température de base extérieure de 33 °C, fournie par les services de météorologie de Tizi-Ouzou, et une température de confort fixée à 22°C.

## 2. La maison écologique

Maintenant, nous allons faire le même travail tout en reprenant le plan de la maison et en procédant à des modifications sur l'isolation de la maison que ce soit sur les murs ou sur les planchers et sur les parois vitrées tout en prenant en compte de l'aspect économique et de la disponibilité de ces matériaux.

Nous allons présenter les matériaux utilisés et leurs caractéristiques thermiques.

### 2.1 Parois vitrées

Nous avons utilisé des fenêtres et portes fenêtres en PVC traité avec un double vitrage avec de l'Argon injecté entre les deux verres d'un coefficient de transmission  $1.5 \text{ W/m}^2.\text{K}$ .

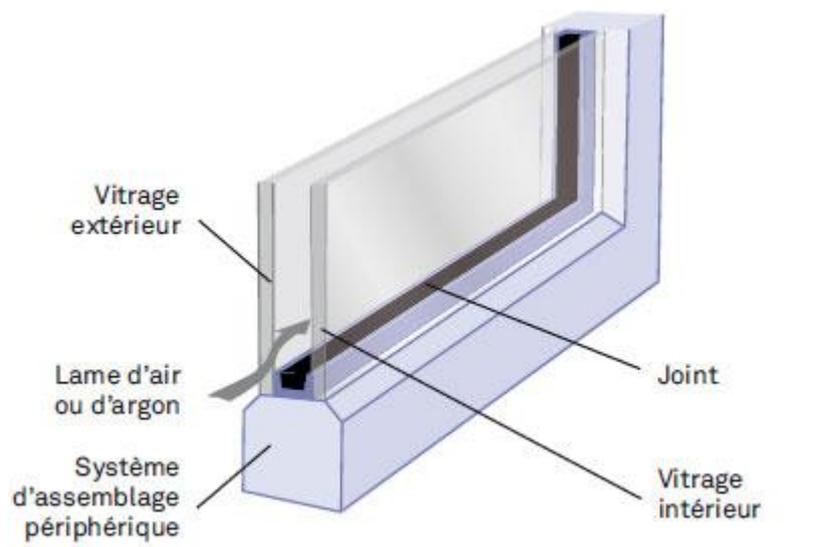


Figure 3-5 : Schéma des fenêtres et portes-fenêtres de la maison écologique.

## 2.2 Plancher bas

Pour le plancher bas, nous avons utilisé une pré-dalle suivie d'une dalle, ensuite nous avons isolé avec du liège, de la chape un mortier de pose et pour finir la dalle de sol.

Tableau 3.5 : Les matériaux composant le plancher bas de la maison isolée [08].

Couche	Epaisseur (m)	Conductivité thermique (W/m.K)
Dalle de sol	0.01	1
Mortier de pose	0.02	1.4
Chape	0.07	1.92
Liège	0.1	0.04
Dalle	0.10	1.27

Pré dalle	0.15	1.279
-----------	------	-------

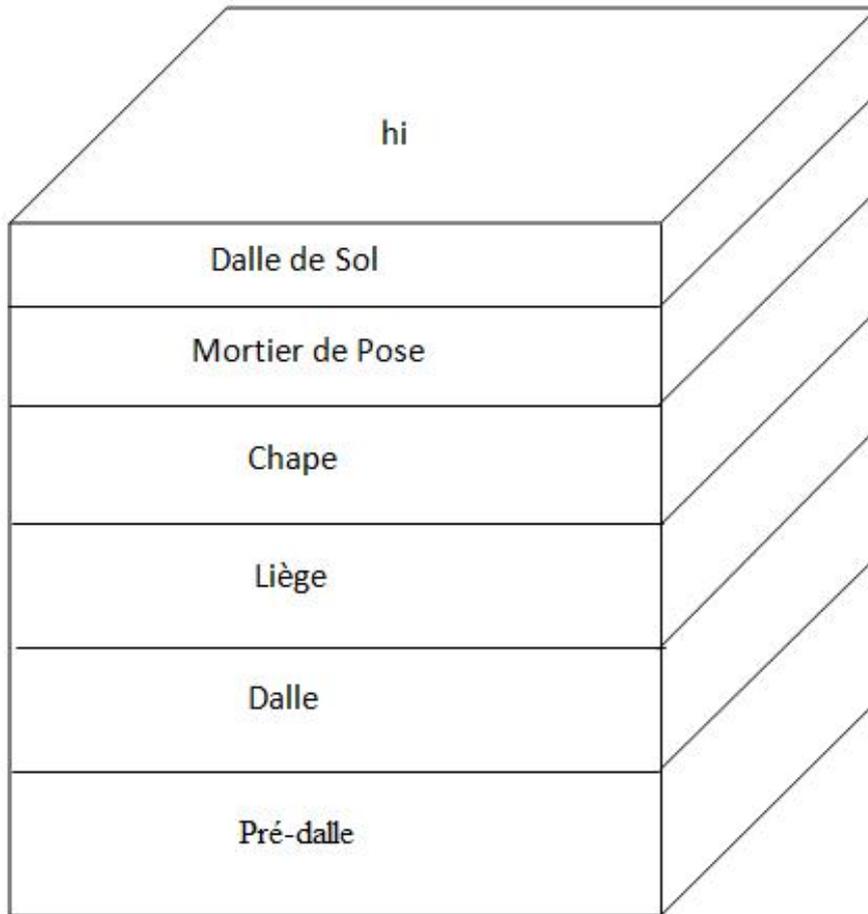


Figure 3-6 : Schéma du plancher de la maison écologique.

### Calcul de la résistance thermique R du plancher bas

$$R = \frac{1}{h_i} + \frac{e_{d.s}}{\lambda_{d.s}} + \frac{e_{m.p}}{\lambda_{m.p}} + \frac{e_c}{\lambda_c} + \frac{e_l}{\lambda_l} + \frac{e_d}{\lambda_d} + \frac{e_{p.d}}{\lambda_{p.d}} + \frac{1}{h_e} \quad (3.8)$$

$$= 2.93 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$K = \frac{1}{R} = 0.34 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

## 2.3 Les murs

Les murs sont composés d'une double murette en brique avec de la laine minérale entre les deux murettes, des plaques de polystyrènes comme isolant par l'extérieur et un mortier pour supprimer les ponts thermiques, recouverts de plaques de BA13 par l'intérieur.

Tableau 3-6 : Les matériaux composant les murs de la maison non isolée [08].

Couche	BA 13	Brique	Laine minérale	Brique	Polystyrène	Mortier
Epaisseur (m)	0.013	0.1	0.05	0.1	0.1	0.02
Conductivité Thermique (W/m.K)	0.27	0.78	0.034	0.78	0.038	0.45

### Les parois avec isolation :

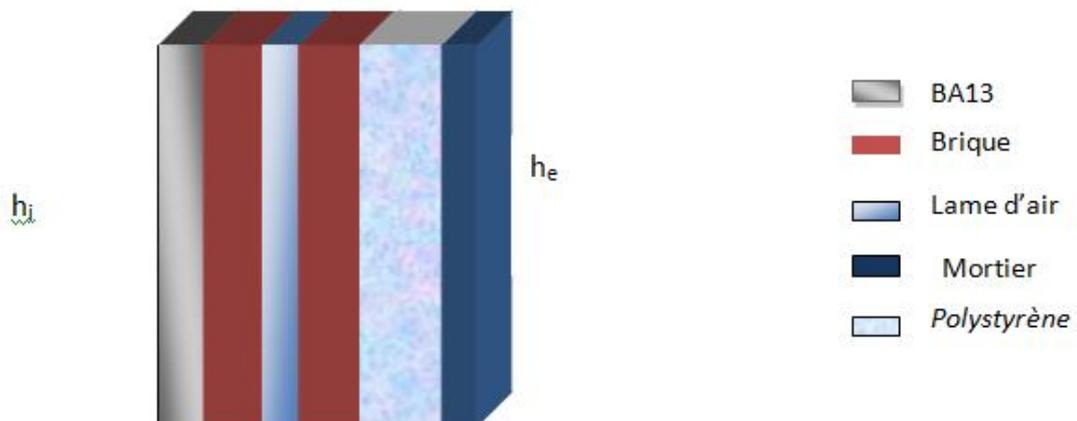


Figure 3-7 : Schéma des murs de la maison écologique.

**Calcul de la résistance thermique surfacique  $R_{pb}$** 

$$R = \frac{1}{h_i} + \frac{e_{ba13}}{\lambda_{ba13}} + \frac{e_b}{\lambda_b} + \frac{e_{l.m.}}{\lambda_{l.m.}} + \frac{e_b}{\lambda_b} + \frac{e_p}{\lambda_p} + \frac{e_m}{\lambda_m} + \frac{1}{h_e}$$

$$R = 4.66 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$K = \frac{1}{R} = 0.21 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

**2.4 Plancher haut du garage**

Tableau 3-7 : Les matériaux composant le plancher haut de la maison isolé [08].

Couche	Epaisseur (m)	Conductivité thermique (W/m.K)
Dalle de sol	0.01	1
Mortier	0.02	1.4
Chape	0.05	1.9
Liège	0.01	0.04
Béton	0.06	1.3
Hourdis	0.16	0.69
Crépi	0.02	1.1

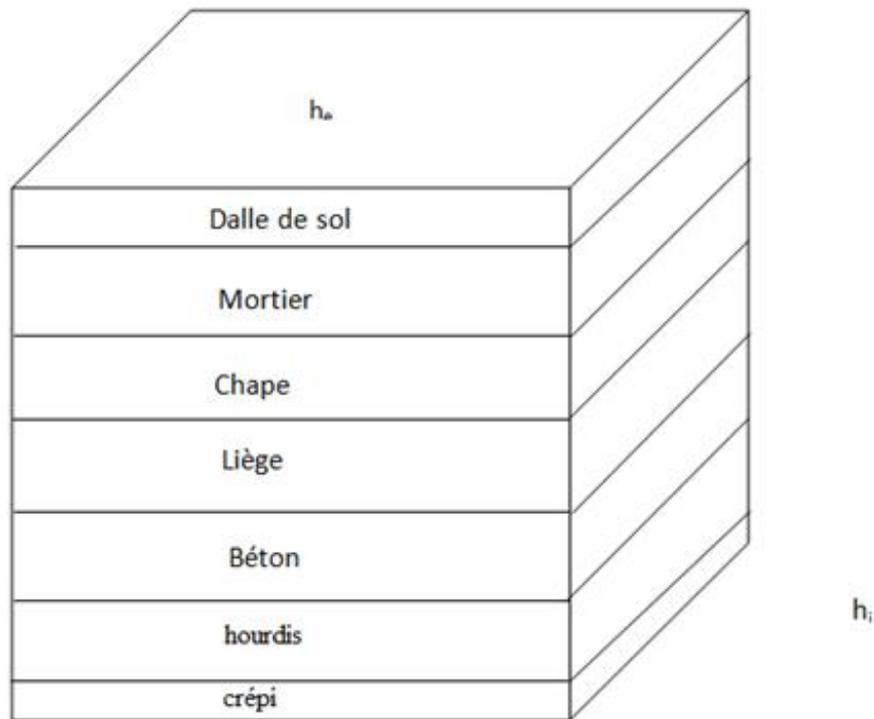


Figure 3-8: Schéma du plancher de la maison écologique.

### Calcul de la résistance thermique surfacique $R_{ph}$

$$R = \frac{1}{h_i} + \frac{e_{d.s}}{\} _{d.s}} + \frac{e_m}{\} _m} + \frac{e_c}{\} _c} + \frac{e_l}{\} _l} + \frac{e_b}{\} _b} + \frac{e_h}{\} _h} + \frac{e_{crepie}}{\} _crepie} + \frac{1}{h_e} \quad (3.9)$$

$$R = 3.18 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$K = \frac{1}{R} = 0.31 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

## 2.5 Charpente

Tableau 3-8 : Les matériaux composant la charpente de la maison isolée [08].

Couche	Epaisseur (m)	Conductivité thermique (W/m.K)
Argile cuite	0.03	1.15
Lame d'air	0.05	0.24
Feuille de contre plaqué	0.005	0.2
Mousse de polyuréthane	0.1	0.032
BA.13	0.013	0.27

Charpente avec isolation :

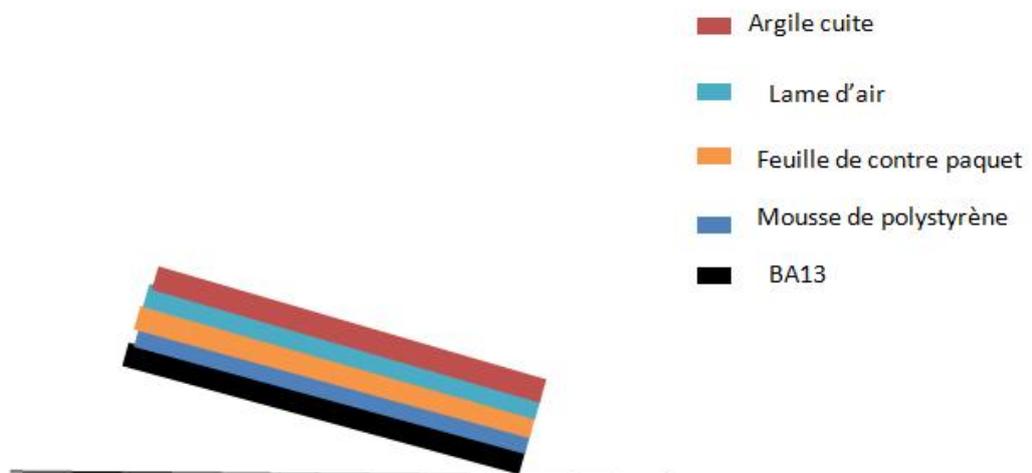


Figure 3-9 : La charpente de la maison écologique.

### Calcul de la résistance thermique surfacique $R_c$

$$R = \frac{1}{h_i} + \frac{e_{a.c}}{\lambda_{a.c}} + \frac{e_{l.a}}{\lambda_{l.a}} + \frac{e_{c.p}}{\lambda_{c.p}} + \frac{e_{m.p}}{\lambda_{m.p}} + \frac{e_{ba13}}{\lambda_{ba13}} + \frac{1}{h_e} \quad (3.10)$$

$$R = 3.61 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

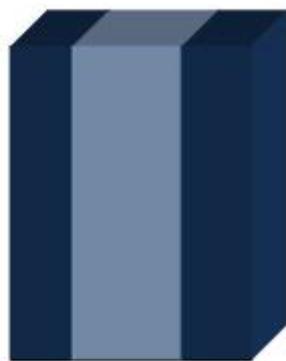
$$K = \frac{1}{R} = 0.27 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

## 2.6 Toiture vitrée

- Pour la toiture vitrée de 3 m<sup>2</sup> de surface on a utilisé du verre armé en double vitrage pour que la lumière puisse entrer et qu'elle puisse isoler la chaleur.

Tableau 3-9 : Les matériaux composant la toiture vitrée de la maison isolée [08].

Couche	Verre armé	Lame d'air	Verre armé
Epaisseur (m)	0.01	0.05	0.01
Conductivité Thermique (W/m.K)	1.1	0.24	1.1



■ Verre armé

■ Lame d'air

Figure 3.10 : Schéma des parois vitrées de la toiture.

**Calcul de la résistance thermique surfacique R :**

$$R = \frac{1}{h_i} + \frac{e_{\text{verre}}}{\lambda_{\text{verre}}} + \frac{e_{l.a}}{\lambda_{l.a}} + \frac{e_{\text{verre}}}{\lambda_{\text{verre}}} + \frac{1}{h_e} \quad (3.11)$$

$$R = 0.194 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$$

$$K = \frac{1}{R} = 5.12 \text{ W}/\text{m}^2.\text{K}$$

**3. Etude thermique de la maison non isolée (bilan estival)****3.1 Parois et plancher bas**

-	Longueur (m)	Largeur (m)	Hauteur (m)	Surface (m <sup>2</sup> )	Surface Vitree (m <sup>2</sup> )	Flux par transmission			
						Surface	K	T	Flux
						Nette (m <sup>2</sup> )	(W/m <sup>2</sup> .°C)	(°C)	
Mur ext S	11.4	-	2.96	33.74	3.96	29.78	1.32	12.5	491.37
Mur ext E	9.5	-	2.96	28.12	2.07	26.05	1.32	12.5	439.39
Mur ext O	9.5	-	2.96	28.12	1.28	26.84	1.32	12.5	442.26
Mur ext N	11.4	-	2.06	33.74	5.9	27.84	1.32	12.5	459.6
Plancher bas	-	-	-	109.84	-	109.84	2.4	12.5	3295.2

**Apports par transmission des parois et plancher bas du RDC : = 5127.6 W.**

**3.2 Parois de l'étage**

Mur ext S	11.4	-	3.06	34.88	3.96	30.92	1.32	12.5	510.18
Mur ext N	11.1	-	3.06	33.96	0.64	33.32	1.32	12.5	549.78
Mur ext O	11.1	-	3.06	33.96	2.6	31.36	1.32	12.5	516.62
Mur ext N	11.4	-	3.06	34.88	2.2	32.68	1.32	12.5	539.22
Plancher bas	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Apports par transmission des parois de l'étage : = 2115.8 W.**

**3.3 Garage**

Mur ext S	4	-	2.96	11.84	2.28	9.56	1.32	4.5	-
Mur ext E	5.4	-	2.96	15.98	-	15.98	1.32	4.5	94.92
Mur ext O	5.4	-	2.96	15.98	1.32	14.66	1.32	4.5	87.08
Mur ext N	0.70	-	2.96	2.07	-	2.07	1.32	4.5	12.29
Porte ext N	3.3	2.8	-	9.24	-	9.24	5.8	4.5	241.16
Fenêtre Ext O	1.2	1.1	-	3.32	-	1.32	5.22	4.5	31.00
Plancher bas	6.3	4.6	-	28.98	-	28.98	2.4	4.5	312.98
Plancher haut	6.3	4.6	-	28.98	-	28.98	1.5	4.5	195.6

**Apports par transmission du garage : = 975 W.**

### 3.4 Portes et fenêtres

Fenêtre	Longueur	Largeur	Surface	Nombre	Surface nette	-	K	T	
F ext S	1.2	1.1	1.32	6	7.92	-	5.22	12.5	516.78
F ext E	1.2	1.1	1.32	1	1.32	-	5.22	12.5	86.13
F ext E	0.8	0.8	0.64	1	0.64	-	5.22	12.5	41.76
F ext E	0.34	0.34	0.12	1	0.12	-	5.22	12.5	7.83
F ext O	1.2	1.1	1.32	3	3.96	-	5.22	12.5	258.39
F ext O	0.8	0.8	0.64	4	2.56	-	5.22	12.5	167.04
F ext N	1.2	1.1	1.32	1	1.32	-	5.22	12.5	86.13
Porte ext N	2.20	1	2.20	1	2.2	-	5.8	12.5	121.22
Porte ext O	2.20	0.94	2.07	1	2.07	-	5.8	12.5	150.07
Porte ext N	2.20	1.04	2.29	1	2.29	-	5.8	12.5	166.02

**Apports par transmission des portes et des fenêtres de la maison : = 1601.4 W.**

### 3.5 Plancher haut

Plancher Haut 1	-	-	148.67	1	148.67	-	2.17	12.5	4032.67
Plancher Haut 2	-	-	21.4	1	21.4	-	2.17	12.5	580.47

**Apports par transmission des planchers hauts : = 4613.2 W.**

Le flux total  $_{total} = 14432.9 \text{ W}$ .

- Et le flux total avec ponts thermiques :

$$14432.925 \times 1.2 = 17319.5 \text{ W}$$

### 3.6 Apports par ensoleillement

$$= G \times S$$

- Pour la salle à manger et le séjour, nous avons 3 fenêtres (1.2×1.1) de surface 1.32 m<sup>2</sup>

$$2 \text{ verticales orientation Sud : } = 2.64 \times 325 = 858 \text{ W}$$

$$1 \text{ verticale orientation Ouest : } = 1.32 \times 283 = 373.56 \text{ W}$$

Une porte verticale de surface 2.068 m<sup>2</sup> (2.20×0.90) orientation Ouest :

$$= 2.068 \times 283 = 585.2 \text{ W}$$

- La cuisine a 2 fenêtres (1.2×1.1) de surface 1.32 m<sup>2</sup>

$$\text{Une verticale orientation Sud : } = 1.32 \times 325 = 429 \text{ W}$$

- Le hall a 2 fenêtres (0.8 × 0.8) de surface 0.64 m<sup>2</sup> :  $= 2 \times 0.64 \times 283 = 362.24 \text{ W}$

- La chambre (1) a une fenêtre verticale orientation Sud (1.2×1.1) de surface 1.32 m<sup>2</sup> :  
 $= 1.32 \times 325 = 429 \text{ W}$

- La chambre (2) et le bureau ont 2 fenêtres verticales orientation Sud (1.2× 1.1) de surface 1.32 m<sup>2</sup> :  $= 2 \times 1.32 \times 325 = 858 \text{ W}$

- La cage d'escaliers a 2 fenêtres (0.8×0.8) de surface 0.64 m<sup>2</sup> verticales orientation Ouest :  $= 2 \times 0.64 \times 283 = 362.24 \text{ W}$

- Le bureau a une fenêtre verticale orientation ouest :  $= 1.32 \times 283 = 373.56 \text{ W}$

- La chambre (3) a une fenêtre de surface S = 1.32 m<sup>2</sup> verticale orientation ouest :  
 $= 1.32 \times 283 = 373.56 \text{ W}$

$$_{total} = 5043.4 \text{ W}$$

$$_{externe} = 5043.3 + 17319.5 = 22362.8 \text{ W}$$

### 3.7 Apports dus aux occupants

$$Q_0 = A \times c \times s \times n$$

150 kcal/h = 174 W pour une personne inactive.

200 kcal/h = 230 W pour une personne active.

C=1 on maximise pour une durée d'occupation des lieux de 24h.

Nombre d'occupant n= 4.

$$P_0 = 4 \times 174 = 696 \text{ W.}$$

### 3.8 Apports dus à l'éclairage

Chaque surface a une ampoule classique de 70 W.

Nous avons 16 lampes, donc

$$P_0 = 16 \times 70 = 1120 \text{ W}$$

### 3.9 Apports dus aux appareils électriques

$$P_0 = 0.86 \times p_m \times n \times c_c$$

$$\text{Téléviseurs : } n=2, \quad p_m=100\text{W}, \quad c_c=0.96, \quad = 0.86 \times 175 \times 2 \times 0.99 = 297.99 \text{ W.}$$

$$\text{Ordinateurs : } n=2, \quad p_m=100\text{W}, \quad c_c=0.96, \quad = 165.12 \text{ W.}$$

$$\text{Réfrigérateur : } n=1, \quad p_m=200\text{W}, \quad c_c=0.99, \quad = 170.28 \text{ W.}$$

$$P_{\text{tot}} = 633.39 \text{ W}$$

$$P_{\text{int}} = 2449.39 \text{ W}$$

$$P_{\text{estival}} = P_{\text{int}} + P_{\text{ext}} = 22362.82 + 2449.39 = 24812.21 \text{ W}$$

## 4. Bilan estival de la maison écologique

Paroi Extérieur Local	Longueur (m)	Largeur (m)	Hauteur (m)	Surface (m <sup>2</sup> )	Surface Vitre (m <sup>2</sup> )	Surface Nette (m <sup>2</sup> )	K W/m <sup>2</sup> .K	T (°C)	(W)
ME –Sud	11.40	-	2.96	33.74	3.96	29.78	0.21	12.5	78.17
ME –Est	9.50	-	2.96	28.12	2.07	26.63	0.21	12.5	69.90
ME -Ouest	9.50	-	2.96	28.12	16.96	11.16	0.21	12.5	29.29
ME-Nord	11.40	-	2.96	33.74	5.90	27.84	0.21	12.5	73.08
Parois Vitrées	5.30	-	2.96	15.68	2.06	13.62	1.5	12.5	255.35
Planchers Bas	-	-	-	109.84	-	109.84	0.34	12.5	466.80
-	<b>Apports par transmissions des parois et plancher R.D.C : = 972.6 W.</b>								
ME-Sud	11.40	-	3.06	34.88	3.96	30.92	0.21	12.5	81.17
ME-Est	11.10	-	3.06	33.96	0.64	33.32	0.21	12.5	87.46

ME-Ouest	11.10	-	3.06	33.96	2.60	31.36	0.21	12.5	83.32
ME-Nord	11.40	-	3.06	34.88	8.32	26.56	0.21	12.5	69.72
Parois Vitrées	2	-	3.06	6.12	-	6.12	1.5	12.5	114.70
<b>Apports par transmission des parois d'étage : = 435.4 W.</b>									
ME -Sud	4.00	-	2.96	11.84	2.28	9.56	0.21	4.5	-
ME-Est	5.40	-	2.96	15.98	-	15.98	0.21	4.5	15.10
Me-Ouest	5.40	-	2.96	15.98	1.32	14.66	0.21	4.5	13.85
ME-Nord	0.70	-	2.96	2.07	-	2.07	0.21	4.5	1.95
Porte E-N	3.30	2.80	-	9.24	-	9.24	2.38	4.5	98.96
Fenêtre O	1.20	1.10	-	3.32	-	1.32	1.5	4.5	8.90
Plancher Bas	6.30	4.60	-	28.98	-	28.98	0.34	4.5	44.32
Plancher h	6.30	4.60	-	28.98	-	28.98	0.31	4.5	40.42

Pour le portail, c'est la porte extérieure nord, nous avons utilisé du bois traité avec une conductivité thermique  $\lambda = 0.16 \text{ W/m}^2.\text{K}$  donc  $K = 2.38 \text{ W/m}^2.\text{K}$

**Apports par transmission du garage : = 223.5 W.**

Porte Fenêtre	Longueur (m)	Largeur (m)	Surface (m <sup>2</sup> )	Nombre	Surface Nette (m <sup>2</sup> )	K (W/m <sup>2</sup> .K)	T (°C)	(W)
FE-Sud	1.20	1.10	1.32	6	7.92	1.5	12.5	148.5
FE-Est	1.20	1.10	1.32	1	1.32	1.5	12.5	24.75
FE-Est	0.30	0.80	0.64	1	0.64	1.5	12.5	12.00
FE-Est	0.34	0.34	0.12	1	0.12	1.5	12.5	2.25

FE-O	1.20	1.10	1.32	2	2.64	1.5	12.5	49.5
FE-O	0.80	0.80	0.64	4	2.56	1.5	12.5	48.00
FE-N	1.20	1.10	1.32	1	1.32	1.5	12.5	24.75
FE-N	2.20	1.00	2.20	1	2.20	1.5	12.5	31.35
PE-O	2.20	0.94	2.07	1	2.07	1.5	12.5	20.06
PE-N	2.20	1.04	2.29	1	2.29	1.5	12.5	42.93

**Apports par transmission des portes et des fenêtres de la maison : = 404.1 W.**

- Maintenant, nous allons calculer les apports de la toiture sachant que nous avons 2 charpentes, une de surface  $S_1 = 148 \text{ m}^2$  et l'autre de surface  $S_2 = 21.4 \text{ m}^2$ . Sur cette deuxième, on place une vitre en verre armée de  $3 \text{ m}^2$  pour la lumière.

-	Longueur (m)	Largeur (m)	Surface ( $\text{m}^2$ )	Surface Nette ( $\text{m}^2$ )	K ( $\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$ )	T ( $^{\circ}\text{C}$ )	(W)
Plancher Haut vitrée	-	-	3.00	3.00	5.12	12.5	192.00
Plancher haut (1)	-	-	184.67	148.67	0.27	12.5	501.76
Plancher Haut (2)	-	-	18.40	18.40	0.27	12.5	62.10

**Apport par transmission du plancher haut : = 755.9 W.**

L'apport total  $_{\text{total}} = 2791.4 \text{ W}$

- **Apports par ensoleillement**

$$= G \times S$$

On utilise un double vitrage avec de l'Argon comme isolation des portes et fenêtres avec du PVC traité  $U = 1.5 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  (U : flux de transmission)

Avec des persiennes en PVC pour ne pas laisser la lumière entrer.

On estime à 30% l'apport par ensoleillement par rapport à la maison non isolée

$$\text{Donc } 30\% = 1513 \text{ W}$$

$$\text{Apports externes} = 1513.02 + 2791.39 \text{ W} = 4304.41 \text{ W}$$

- **Apports internes :**

$$\text{Apports dus aux occupants } q_o = A \times C \times s \times n.$$

$$150 \text{ kcal/h} = 174 \text{ W par personne inactive.}$$

$$200 \text{ kcal/h} = 230 \text{ W par personne active.}$$

$N = 4$ ,  $C = 1$  on maximise pour une durée d'occupation de 24h.

$$q_o = 4 \times 1 \times 174 = 696 \text{ W}$$

- **Apports dus à la lumière :**

Chaque surface avec une lampe de 9W et nous avons 16 lampes :

$$q_e = 16 \times 9 = 144 \text{ W}$$

- **Apports dus aux appareils électriques :**

$$m = 0.86 \times P_m \times N \times C_c$$

$$\text{Téléviseurs : } N = 2, \quad P_m = 175 \text{ W}, \quad C_c = 0.99 = 297.99 \text{ W}$$

$$\text{Ordinateurs : } N = 2, \quad P_m = 100 \text{ W}, \quad C_c = 0.96 = 165.12 \text{ W}$$

$$\text{Réfrigérateur : } N = 1, \quad P_m = 200 \text{ W}, \quad C_c = 0.99 = 170.28 \text{ W}$$

$$m = 633.39 \text{ W}$$

$$q_{\text{interne}} = 1473.39 \text{ W}$$

$$P_{\text{estival}} = P_{\text{int}} + P_{\text{ext}} = 1473.39 + 4304.41 = 5777.8 \text{ W}$$

Maintenant on dresse le bilan hivernal pour la maison isolée (écologique)

Avec une température moyenne de 6 °C (Agence de météorologie de Tizi-Ouzou)

T° moyenne du sol 10 °C.

T° confort 20 °C (donnée universelle).

### **Calcul du coût d'électricité consommée par la maison non isolée**

- Coût de la climatisation =  $17.319 \text{ kW} \times 10 \times 90 \times 4.5 = 70\,141.00 \text{ D.A.}$

17.319 kW : Flux estival, 10 : Nombre d'heures de climatisation par jours,

90 : Nombre de jours de climatisation dans l'année, 4.5 D.A : Coût du kWh (SONELGAZ).

- Coût du chauffage =  $17.579 \text{ kW} \times 12 \times 90 \times 4.5 = 85\,433.00 \text{ D.A.}$

17.579 kW : Flux hivernal, 12 : Nombre d'heures de chauffage par jour,

90 : Nombre de jours de chauffage dans l'année.

- coût de la consommation des équipements de la maison =  $3 \text{ kWh/j} \times 365 \times 4.5$   
 $= 4\,927.00 \text{ D.A}$

365 : Nombre de jours de l'année, 3 kWh/j : Consommation journalière d'énergie.

- consommation totale annuelle est de : 160 511.00 D.A



# Chapitre 4

***DIMENSIONNEMENT DES  
PANNEAUX HYBRIDES  
(PV/T)***

## Introduction

Dans ce chapitre nous décrivons en premier lieu le principe de fonctionnement du système hybride (PV/T), ainsi que les caractéristiques principales, et la présentation des équipements qu'il faut pour une installation photovoltaïque, et également le coût de l'installation (PV/T).

### 1. Le principe du capteur solaire hybride (PV/T)

Egalement appelé capteur solaire mixte ou capteur PV/T – pour photovoltaïque et thermique, le panneau solaire hybride permet de produire à la fois de l'électricité et de la chaleur. Ses deux faces sont utilisées : côté soleil, tout fonctionne comme sur n'importe quel panneau photovoltaïque, et les cellules produisent de l'électricité au contact du rayonnement solaire. Côté intérieur, le fluide en écoulement chauffe au contact des parois du panneau solaire, bien sûr, mais aussi celle produite par les capteurs photovoltaïques au-dessus de lui.



*Figure 4-1 Capteur hybride monocristallin photovoltaïque thermique (PV/T).*

#### 1.1.1 Le solaire hybride, pourquoi?

Les panneaux photovoltaïques standards ont une production optimale d'électricité à une température d'environ 20 °C et perdent en efficacité à mesure qu'ils s'échauffent.

L'ajout d'un circuit hydraulique sous le panneau photovoltaïque permet de profiter de deux

avantages : d'une part ce circuit permet de refroidir le panneau photovoltaïque et de maintenir un meilleur rendement électrique; d'autre part la chaleur dégagée par le panneau peut être utilisée pour le préchauffage de l'eau chaude sanitaire au lieu d'être dissipée dans l'air et ainsi diminuer les coûts de chauffage de cette eau.

Ainsi, les capteurs PV/T permettent de produire à la fois de l'électricité et de la chaleur avec une surface plus compacte et homogène de panneaux solaires.

### **1.1.2 Le capteur solaire hybride : la solution optimisation**

Nous le savons tous, les cellules photovoltaïques produisent de l'électricité. Mais elles produisent aussi de la chaleur : dans un système classique, non seulement cette chaleur est perdue, mais en plus elle diminue le rendement des cellules photovoltaïques, qui deviennent fainéantes quand la température grimpe. Dans un capteur solaire hybride, le fluide qui circule dans la partie thermique absorbe la chaleur créée, et refroidit donc les cellules photovoltaïques. Ainsi, leur rendement est augmenté.

<b>VOLTHER</b> hybrid collectors		<b>Power Volt</b>		BRD patent 20 2008 010.7
				EU patent EP 06023884
Dimensions	1601 X 828 X 80 mm			
Weight	24.4 kg			
P (W) Nominal power	180			
Imp (A) Nominal current	5,2			
Isc (A) Short circuit current	5,8			
Vmp (V) Nominal voltage	36,5			
Voc (V) Open circuit voltage	45,2			
Glazing	PV Glass			
Absorber surface (PV)	Mono - crystalline			
Absorber surface (T)	Copper			
Test Pressure	20 bar	Max. Operation Pressure	10 bar	
Sealing	Aluminium & EPDM & Silicone			
Production Year - Serial	2011	110312036		
 <b>SOLIMPEKS</b> SOLAR ENERGY SYSTEMS CORP.		KONSAN Özel Org. San. Ve Tic. Mhk. Hilal Sk. No.20 42300 Karatay/Konya - TURKEY <a href="http://www.solimpeks.com">http://www.solimpeks.com</a> e-mail: <a href="mailto:info@solimpeks.com">info@solimpeks.com</a> TEL: +90.332.444 06 02 FAX: +90.332.444 06 08 Made in Turkey		

Figure 4-2 : Fiche signalétique de panneaux solaires hybrides.

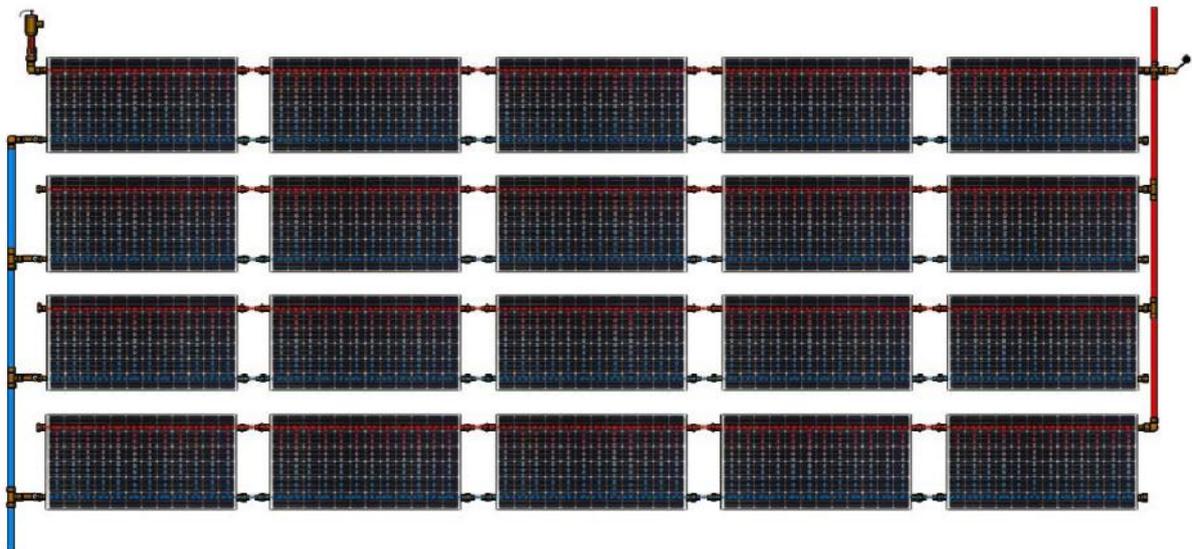


Figure 4-3 : Champ de panneaux solaires hybrides.

## 2. Le principe de l'effet photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance

vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension inférieure à 1 volt.

Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un champ photovoltaïque. La connexion en série des cellules permet d'augmenter facilement la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant. Le câblage série/parallèle est donc utilisé pour obtenir globalement un générateur PV aux caractéristiques souhaitées.

### 2.1. La cellule photovoltaïque

#### 2.1.1 Définition d'une cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- d'une fine couche semi-conductrice (matériau possède une bande interdite, qui joue le rôle de la barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- d'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- d'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.

### 2.1.2 Le Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir d'une jonction PN (figure 4-4) au silicium (diode). Pour obtenir du silicium dopé N, on ajoute du phosphore. Ce type de dopage permet au matériau de libérer facilement des électrons (charge -).

Pour obtenir du silicium dopé P, on ajoute du bore. Dans ce cas, le matériau crée facilement des lacunes électroniques appelées trous (charge +).

La jonction PN est obtenue en dopant les deux faces d'une tranche de silicium. Sous l'action d'un rayonnement solaire, les atomes de la jonction libèrent des charges électriques de signes opposés qui s'accumulent de part et d'autre de la jonction pour former un générateur électrique.

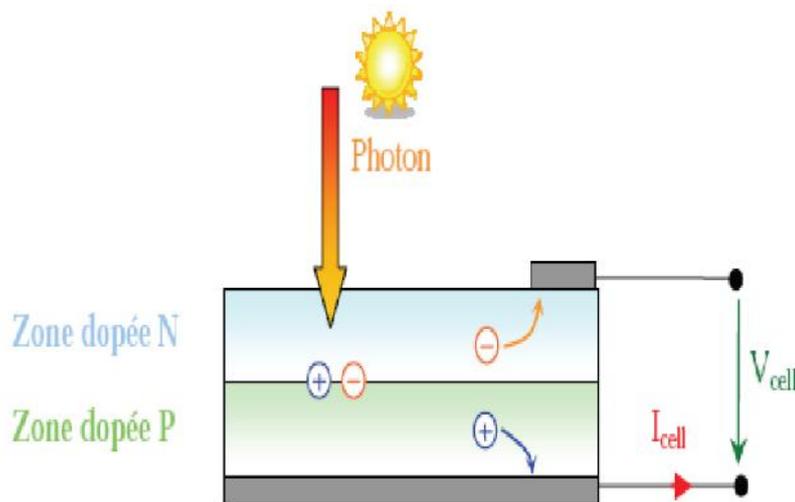


Figure 4-4: Principe de fonctionnement d'une cellule solaire [09].

### 2.1.3. Le module photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque ou module (figure 4-5) est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et /ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électrique désirées tels que la puissance, le courant de court circuit et la tension en circuit ouvert, d'une protection contre les intempéries sous forme de vitre et de stratifié, d'une protection contre les surtensions sous forme d'une ou plusieurs diodes by-bas et d'un dispositif de branchement.



*Figure 4-5: Module photovoltaïque.*

#### **2.1.4. Le champ photovoltaïque**

Le champ photovoltaïque (figure 4-6) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.



*Figure 4-6: Champ photovoltaïque.*

## 2.2. Le matériau de base de la cellule photovoltaïque

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

- **Silicium monocristallin**

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

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

- **Le silicium multi cristallin (poly-cristallin)**

Le silicium multi cristallin (poly-cristallin) est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée (figure 4-7). A elle seule, elle représente près de 50% du marché. Ces cellules sont obtenues par couplage de cristaux de silicium, ce qui rend sa structure hétérogène, Son rendement est légèrement inférieur au silicium monocristallin, il est compris entre 10 et 14% selon les fabricants. En revanche sa fabrication est beaucoup plus simple, les coûts de production sont donc plus faibles.



(a)



(b)

Figure 4-7 : Cellule monocristallin(a) et multi cristallin (b).

- **Le silicium amorphe**

Le silicium intégré dans les cellules a-SI n'a pas fait l'objet d'une cristallisation (figure 4-8). Ses atomes sont donc agencés sans réelle organisation, ce qui leur permet de mieux capter la lumière (par rapport au silicium cristallin). Problème : les charges générées ont plus de difficultés pour se déplacer à cause de la désorganisation de la matière, ce qui se traduit par un mauvais coefficient de conversion. Par conséquent, leur rendement est faible.

La désorganisation atomique a d'autres conséquences : les électrons de valence des atomes de Si ne forment pas toujours des liaisons covalentes au sein du semi-conducteur. Il apparaît alors des liaisons pendantes qui peuvent agir sur les propriétés électroniques du matériau. Pour limiter ce phénomène, les couches de silicium sont régulièrement passivées avec de l'hydrogène (a-Si : H). Des atomes d'hydrogène établissent des liaisons avec les électrons restés libres, et réduisent ainsi le nombre de liaisons pendantes.



*Figure 4-8: Cellule amorphe.*

### **3. Paramètres électriques du module photovoltaïque**

Les différents paramètres caractérisant un module photovoltaïque sont la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ), le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ), la puissance maximale  $P_{max}$ , le facteur de forme FF et le rendement.

Ils sont extraits des caractéristiques courant-tension  $I(V)$ , permettant de comparer différents modules éclairés dans des conditions identiques.

### 3.1 Rendement

Le rendement énergétique d'un module PV est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par le module  $P_{max}$  ( $I_{max}$ ,  $V_{max}$ ) et la puissance solaire. Il est donné par :

$$\frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{max}V_{max}}{P_{inc}} \quad (4 - 1)$$

Avec  $P_{inc}$  qui est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale du module PV. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

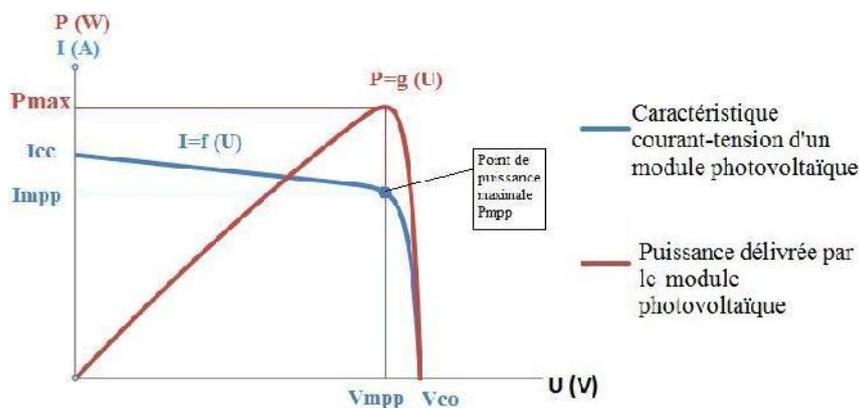


Figure 4-9 : Caractéristiques courant-tension d'un module photovoltaïque [09].

### 3.2 Regroupement des cellules

- **Regroupement des cellules en série**

Une association de ( $N_s$ ) cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). L'équation résume les caractéristiques électriques d'une association série de ( $N_s$ ) cellules.

$$V_{coNs} = N_s * I_{co} ; I_{cc} = I_{ccNs} \quad (4 - 2)$$

$V_{coNs}$  : La somme de la tension en circuit ouvert de  $N_s$  cellules en série.

$I_{ccNs}$  : Courant de court-circuit de  $N_s$  cellule en série.

- **Regroupement des cellules en parallèle**

Une association parallèle de ( $N_p$ ) cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en

parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants.

L'équation résume les caractéristiques électriques d'une association parallèle de ( $N_p$ ) cellules :

$$- I_{ccNp} = N_p * I_{cc} ; V_{co} = V_{coNp} \quad (4 - 3)$$

-  $I_{ccNp}$  : La somme des courants de court-circuit de ( $N_p$ ) cellules en parallèle.

-  $V_{coNp}$  : La tension du circuit ouvert de ( $N_p$ ) cellules en parallèle.

- **Regroupement des cellules (série et parallèle)**

On utilise généralement ce type d'associations pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. La caractéristique d'un groupement de deux modules solaires est représentée ci-dessous, ce qui peut être généralisé sur une gamme de  $N_s$  modules solaires en série. Ce genre de groupement augmente le courant. Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque.

### Schéma simplifié d'un system PV

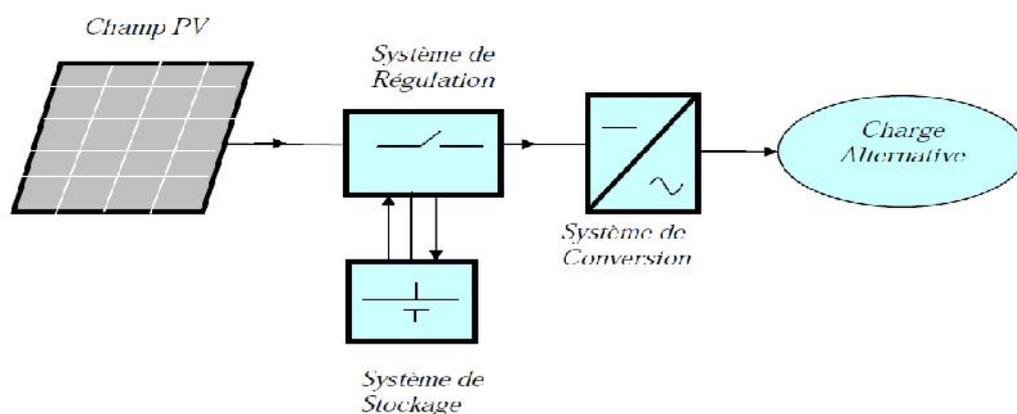


Figure 4-10: Schéma simplifié d'un system PV [09].

### 3.3 Système de stockage

#### 3.3.1 Les batteries

Les batteries sont des ensembles de cellules électrochimiques (qui convertissent l'énergie chimique en énergie électrique) connectées en série. Ces cellules électrochimiques ne sont pas des cellules photovoltaïques, dont le principe de fonctionnement est complètement différent. Les cellules de batteries se composent de deux électrodes (ou plaques) émergées dans une solution d'électrolyte. Lorsqu'un circuit se crée entre les électrodes, un courant circule, provoqué par les réactions chimiques réversibles entre les électrodes et l'électrolyte dans la cellule. Certaines cellules ne peuvent pas être rechargées. Ce sont des batteries sèches ou primaires. D'autres se rechargent indéfiniment, ce sont les batteries secondaires ou batteries d'accumulateurs. Lors de la charge, l'énergie électrique fournie par le générateur électrique est stockée dans les cellules sous forme d'énergie chimique. Lors de la décharge l'énergie chimique emmagasinée est retirée de la batterie et convertie en énergie électrique. Les types de batteries d'accumulateurs rechargeables et plus répandus au monde sont les batteries au plomb (plomb-acide), lithium-ion, nickel-hydrure métallique et au nickel cadmium.

#### 3.3.2 Les types de batteries

- **Batteries nickel-hydrure métallique, cadmium-nickel et lithium-ion :**

Ce type de batteries sont semblables les unes aux autres et différentes des batteries au plomb courantes, en ce sens qu'elles sont scellées, portables, ne demandent aucun entretien et servent à alimenter les petits appareils (on les appelle aussi batteries de poche). Elles fonctionnent par réaction chimique entre une électrode positive et une électrode négative baignant dans un électrolyte. Chaque élément nicad (nickel-cadmium) ou à hydrure métallique a une tension d'environ 1.3 V (de 3.3 à 4.0 V par élément pour les batteries lithium ion).

En règle générale, le coût de ces trois types de batteries par unité de stockage est plus élevé que celui des batteries au plomb, pas étonnant donc que la plupart des concepteurs de systèmes PV choisissent les batteries au plomb, cependant ces trois types de batteries

présentent aussi des avantages que les concepteurs de systèmes PV de faible puissance ne doivent pas ignorer.

Les batteries au nickel-cadmium et aux hydrures métalliques acceptent une décharge complète sans risque de dommage pour les éléments et peuvent rester plus longtemps faiblement chargées aussi fonctionnent sur des plages de températures plus larges que les batteries au plomb, leur durée de vie dépasse celle de la plupart des types de batteries au plomb.

### **3.3.3 Système de régulation**

- **Le Régulateur de charge**

Cet élément sert à augmenter la durée de vie des accumulateurs tout en atteignant les rendements les plus élevés possible, en adaptant de façon optimale l'électricité produite par le générateur photovoltaïque (tension et courant de charge) et destinée à la charge des accumulateurs.

Les régulateurs de charge assurent principalement les tâches suivantes :

- Protection d'accumulateur contre les décharges profondes, limitation de la tension de charge terminale (protection contre les surcharges), prévention de la décharge des batteries pendant la nuit dans les résistances internes du générateur photovoltaïque.
- Adaptation du comportement de la charge au type d'accumulateur, (particulièrement important pour les accumulateurs gel).
- Protection contre les inversions de pôles.
- Protection contre les surcharges et le court-circuit.
- Affichage de la fonction de charge instantanée ainsi que du courant et de tension.

### **3.3.4 Système de conversion**

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ PV et la charge (sans stockage avec charge en continu, il portera le nom de convertisseur continu), soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu alternatif).

A l'onduleur est généralement associé un redresseur qui réalise la transformation du courant alternatif en courant continu et dont le rôle sera de charger les batteries et d'alimenter le circuit en continu de l'installation en cas de longue période sans soleil.

### 3.3.5 La charge

La charge est l'équipement électrique alimenté par le système peut être de type continu comme des équipements de télécommunication, le pompage d'eau, ou de type alternatif dans les cas d'usage domestique (maison solaire), ce cas nécessite un onduleur.

## 4. Installation des panneaux

Pour installer les panneaux solaires dans un site, il est nécessaire de vérifier les conditions suivantes :

### 4.1 Disposition des panneaux

Avant d'installer les panneaux d'une installation photovoltaïque, il faut tout d'abord localiser le site d'emplacement. Une fois la localisation faite on peut faire l'orientation.

#### Les coordonnées géographiques

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent de repérer un point sur la terre.

- **La longitude (L)**

C'est l'éloignement par rapport au méridien de Greenwich, mesurée en degrés. Elle est comptée positivement vers l'Est et négativement vers l'Ouest, à partir du méridien Greenwich.

- **La latitude ( $\varnothing$ )**

C'est l'éloignement d'un point sur la surface de la terre par rapport à l'équateur, mesuré en degrés (mesurée à partir du centre de la terre), permettent de repérer la distance angulaire d'un point quelconque à l'équateur.

Elle varie de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  dans l'hémisphère nord et de  $0^\circ$  à  $90$  dans l'hémisphère sud.

- **L'altitude (Z) :**

C'est l'altitude d'un point correspondant à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (au niveau de la mer :  $Z = 0$ ), elle est exprimée mètre.

- **L'orientation des panneaux**

L'installation des modules peut se faire sur un toit si son orientation et son inclinaison sont bonnes ou à même le sol pour peu que l'endroit soit bien dégagé, aéré (10 cm d'espace sous les modules est vivement conseillé) et protégé. On les place habituellement avec la pente vers l'équateur (vers le sud dans l'hémisphère nord). L'inclinaison des panneaux n'est pas critique. On la prend en général égale à la latitude, avec une tolérance de  $15^\circ$ . La hauteur maximale du soleil variant au cours de l'année, on choisira une inclinaison supérieure ou inférieure à la latitude suivant que les besoins sont les plus importants lorsque la course du soleil est basse (éclairage, besoins importants en hiver dans l'hémisphère nord) ou haute (irrigation...).

Toutefois, l'inclinaison des modules devrait rester supérieure à  $10^\circ$  pour assurer l'auto nettoyage lors des pluies.

Les structures doivent être solides, fixées au sol, pour résister à des vents d'au moins de 150 km/h. De plus, elles doivent être fiables dans le temps, elles doivent utiliser un matériau de bonne fiabilité (outre l'aluminium anodisé, la visserie inox et la visserie inviolable).

- **Fixation des panneaux**

La fixation des panneaux doit assurer correctement les fonctions suivantes :

- Maintient de l'orientation.
- Résistance contre le vent et les autres intempéries.
- Résistance contre les agressions mécaniques.
- Protection contre les salissures, et agressions venant du sol.

## 4.2 Installation des éléments de la batterie

- **L'utilisation de la batterie peut présenter des dangers :**

Risque d'explosion, dégagement de gaz toxiques (brouillard d'acide sulfurique).

En outre, leur durée de vie et le bon fonctionnement de toute l'installation dépend aussi bien des conditions d'installation que d'exploitation. Compte tenu de cela, l'installation de ces éléments doit être effectuée avec un grand soin.

Ils doivent être installés dans un local approprié à l'abri des intempéries, surtout quand le produit de la capacité par la tension de décharge est supérieur à 1000 V. Ce local doit satisfaire à certaines exigences, qui sont les suivantes :

- D'être bien ventilé pour garantir la circulation des gaz.
- D'être à une température proche de 25 °C, pour assurer le bon fonctionnement des éléments.

- **Les interrupteurs-disjoncteurs CC :**

Ces appareils doivent être en mesure d'assurer, sur commande manuelle ou par défaut (masse, court-circuit), le sectionnement complet du circuit électrique côté courant continu en charge (c'est-à-dire sous tension), ce qui signifie qu'ils doivent être capables de supprimer totalement l'arc électrique produit à l'ouverture (ce qui peut ne pas être le cas des interrupteurs-disjoncteurs à courant alternatif pourtant encore couramment utilisés dans les installations solaires en site isolé).

- **Position et calibrage :**

L'interrupteur-disjoncteur CC du champ solaire : il se place à l'entrée « solaire » du régulateur. Il doit être calibré à une valeur légèrement supérieure à l'intensité de court-circuit du panneau ou du champ solaire. Il n'a pas de fonction de sécurité, puisqu'il ne réagira pas à la mise en court-circuit des panneaux, mais par contre est très utile pour couper l'alimentation solaire lors des contrôles ou de la maintenance.

L'interrupteur-disjoncteur CC du régulateur : il se place à la sortie « batterie » du régulateur, et protège celui-ci contre le courant de la batterie en cas de défaut. Il doit être calibré à la même valeur que l'intensité maximale à la sortie « consommateur », mais peut, s'il n'y a pas

de consommateur connecté à cette sortie, être calibré à la même valeur que l'interrupteur-disjoncteur d'entrée du régulateur.

L'interrupteur-disjoncteur CC des consommateurs : se place à la sortie « consommateurs » du régulateur et permet d'isoler le circuit consommateur en cas de défaut, d'intervention ou de maintenance, sans couper en même temps la charge solaire de la batterie.

- **Le fusible CC :**

Celui-ci est destiné à protéger l'entrée CC du convertisseur. Bien souvent, ces derniers possèdent déjà un fusible interne, mais peu accessible, et comme il n'est pas recommandé d'ouvrir ces appareils en cas de défaut, il vaut mieux placer un fusible externe à l'entrée CC [17]. Il doit être calibré à la valeur maximale du courant d'entrée, exprimé en Ampère (A) du convertisseur, soit  $I(A) = P(W) / U(V)$ .

## **5. Etude et dimensionnement d'un système photovoltaïque**

Dans la présente partie nous avons présenté les différentes étapes de la conception d'installations solaires photovoltaïques non raccordées au réseau. Il faut absolument avant d'acheter et installer les équipements photovoltaïques, faire un plan de l'installation. Sinon, les équipements risquent d'être inadaptés, moins efficaces, et plus coûteux qu'escomptés. Les cinq estimations proposées permettent de concevoir des installations solaires. Elles ne proposent pas de recettes à appliquer mécaniquement mais des guides conçus comme des aides à la compréhension du processus de planification et de conception. En prenant une maison écologique (R+1) qui est située au boulevard CHABANE Ahcene, TIZI-OUZOU

### **Présentation du site :**

Le site d'implantation du système photovoltaïque se situe dans la Wilaya de Tizi-Ouzou et précisément au lieu dit boulevard CHABANE Ahcene

Localisation du site :

Wilaya : Tizi-Ouzou.

Site : maison écologique (R+1).

Lieu : boulevard chabane ahcene.

Latitude : 36° 42 Nord.

Longitude : 4° 03 Est.

Température ambiante min : +5°.

Température ambiante max : +40°.

## 5.1 Bilan énergétique de la maison

Tableau 4-1 : La consommation journalière en énergie de la maison.

Appareils	Nombre	Puissance unitaire (W)	Puissance (W)	Durée d'utilisation (h)	Energie (Wh/j)
Lampes	7	5	35	2	70
Lampes	7	7	63	2	126
Lampes	2	15	30	2	60
TV	2	70	140	3	420
PC	1	100	100	2	200
Réfrigérateur	1	75	75	12	900
Climatiseur 18000 BTU	1	-	-	-	1500
Climatiseur 12000 BTU	1	-	-	-	920
Machine à laver	1	649	649	1	649
Cuisinière	1	120	120	4	480
					5325

Pour le choix des appareils, nous avons pris en considération l'aspect économique pour l'énergie ainsi que pour les prix d'achat, on a choisi la marque Brandt pour leur disponibilité ainsi que leur rendement et leur consommation.

- **Lampes L.E.D** : c'est des lampes qui produisent de la lumière en consommant moins d'énergie.
- **Télévision L.E.D** : c'est un téléviseur haute technologie qui ne consomme pas beaucoup d'énergie.
- **Réfrigérateur** : de marque Brandt, économe de classification A<sup>+</sup>.
- **Climatiseur** : de marque Brandt économe de classification A.
- **Cuisinière** : de marque Brandt de classification A<sup>++</sup>.
- **Machine à laver** : de marque Brandt de classification A<sup>+++</sup>.

#### **Utilisation de la lumière du jour :**

Comme on a fait dans notre maison écologique, on a utilisé le double vitrage avec l'Argon à l'intérieur, sur la moitié de la façade du rez-de-chaussée (RDC), et aussi pour le première étage à côté du bureau, et sur la toiture au niveau du hall, la solution que l'on propose pour réduire la consommation d'énergie et de profiter de cette lumière du jour.

## **5.2 Dimensionnement photovoltaïque**

Dans cette maison, nous avons deux grandes installations PV. On est donc obligé de faire deux installations. La première pour la climatisation. La deuxième pour les autres appareils et équipements de la maison.

### 5.2.1 Dimensionnement de la climatisation

Nous allons calculer la puissance d'entrée de l'onduleur :

$$P_o = \frac{C_j}{R_o} \quad (4 - 4)$$

Avec :

$P_o$  : Puissance d'entrée de l'onduleur.

$C_j$  : consommation journalière des deux climatiseurs.

$R_o$  : Rendement de l'onduleur.

Calcul de la puissance d'entrée de régulateur :

$$P_r = \frac{C_j}{R_r} \quad (4 - 5)$$

Avec :

$P_r$  : Puissance d'entrée de régulateur.

$R_r$  : Rendement de régulateur.

Calcul de l'énergie produite :

$$E_p = \frac{C_j}{R_o \times R_r} \quad (4 - 6)$$

$E_p$  : Énergie produite.

Calcul de la puissance crête :

$$P_C = \frac{E_P}{K \times E_{\min}} \quad (4 - 7)$$

$E_{\min}$  : Le rayonnement solaire global journalier minimal reçu sur le plan des modules.

$K$  : Facteur tenant compte des diverses considérations qui affectent le rendement de l'installation.

Calcul du nombre de modules :

$$N_m = \frac{P_c}{P_{cm}} \quad (4 - 8)$$

Avec :

$N_m$  : Nombre de modules.

$P_{cm}$  : Puissance crête d'un module.

Calcul de la surface totale des modules :

$$S_t = N \times S_m$$

Avec :

$S_t$  : Surface totale des modules en  $m^2$ .

$S_m$  : Surface d'un seul module en  $m^2$ .

Avec un angle de déclinaison de la charpente de la maison de  $36^\circ$ .

### 5.2.2 Dimensionnement de la batterie de stockage

Le choix de la tension de travail du système est :

La tension de travail est choisie selon la valeur de la puissance crête de la manière suivante :

- Pour  $P_c < 150W_c$  implique  $U = 12V$ .

- Pour  $150W_c < P_c < 1000W_c$  implique  $U = 24V$ .

- Pour  $P_c > 1000W_c$  implique  $U = 48V$ .

La capacité utile de la batterie est :

$$C = \frac{C_J \times N_J}{P_f \times R_b} \quad (4 - 9)$$

Avec :

$N_J$  : Le nombre de jours d'autonomie du système.

$P_f$  : Décharge de batterie.

$R_b$  : rendement de la batterie.

Détermination du nombre d'éléments batteries en série :

On donne le nombre d'éléments batteries en série par la relation :

$$N_{bs} = \frac{U}{U_b} \quad (4 - 10)$$

Avec :

$U_b$  : Tension de l'élément batterie donnée par le constructeur en V.

Détermination du nombre d'éléments batteries en parallèle :

Le nombre de branches d'éléments en parallèle :

$$N_{bp} = \frac{C_u}{C_e} \quad (4 - 11)$$

Avec :

$C_e$  : Capacité d'un élément batterie donné par le constructeur exprimée en (Ah).

Détermination du nombre total d'éléments batteries

Le nombre total d'éléments batteries est donné par :

$$N_b = N_{bp} \times N_{bs} \quad (4 - 12)$$

- **Choix du régulateur :**

La régulation de charge sera dimensionnée pour une installation sous une tension de charge U

et un courant :  $I_{max} = P_c / U$  (A) (4 - 13)

**Les critères pour choisir son régulateur solaire :**

Pour choisir notre régulateur solaire, il faut prendre en considération 3 éléments principaux :

- **La tension maximum en circuit ouvert de vos panneaux :** Les régulateurs acceptent des plages de tension plus ou moins larges.
- **La tension minimum pour charger les batteries.**
- **Le courant maximum du régulateur :** Le courant du régulateur (exprimé en ampères) doit être supérieur à l'intensité du courant de court-circuit des panneaux solaires aux quels il est relié. Cette donnée est indiquée sur la notice de chaque panneau. Il est préférable de prendre en plus une marge de sécurité de 10 % à 20 %.

- **Choix de l'onduleur :**

Le choix de l'onduleur à utiliser sera fait selon ses caractéristiques, qui conviennent à alimenter l'installation considérée. Dans notre cas on a :

- La tension d'entrée qui correspond à la tension du système mis en place U (48V) et à la demande d'électricité D (Wh/j).
- La tension de sortie doit correspondre à la tension d'alimentation des charges utilisées, notre installation a besoin de 220/230 VAC pour son fonctionnement normal.

- **Câblage du système :**

Pour assurer le bon fonctionnement d'un système photovoltaïque autonome, il reste les derniers éléments à prendre en considération lors de la phase de notre dimensionnement, il s'agit du câblage qui assure les liaisons entre les différents éléments de la centrale et leurs protections.

- **Propriétés des câbles :**

Tout câble électrique a une résistance qui est donnée par la formule suivante :

$$R = \frac{\rho L}{S} \quad (4 - 14)$$

Avec :

L : La longueur du câble en m.

S : La section du câble en  $\text{mm}^2$ .

$\rho$  : La résistivité du matériau conducteur en  $\mu\Omega \cdot \text{m}$ .

Les protections électriques sont constituées de :

Disjoncteur.

Fusible.

Mise à la terre.

### a. Dimensionnement des deux climatiseurs

Premièrement, on ajoute une marge de sécurité de 20% de la consommation journalière des deux climatiseurs.

On donne

$$K = 0.65; \quad R_o = 93\%; \quad R_r = 95\%; \quad U_I = 48 \text{ V}; \quad U_M = 45,2 \text{ V}; \quad S_M = 1,1 \text{ m}^2$$

$$N_j = 2 \text{ jours}; \quad p_f = 70\%; \quad R_b = 97\%; \quad U_b = 12 \text{ W}; \quad P_{cm} = 150 \text{ W}; \quad E_{min} = 6.5$$

La consommation journalière :  $C_j = 2420 + 20\%$ ,  $C_j = 2904 \text{ Wh/j}$ .

- Onduleur :  $P_o = 3122,6 \text{ Wh/j}$ .
- Régulateur :  $P_r = 3056,8 \text{ Wh/j}$ .
- Énergie produite :  $E_p = 3300 \text{ Wh/j}$ .
- Puissance crête :  $P_c = 781,9 \text{ W}$ .
- Nombre de modules :  $N_m = 4$  modules.

f- Nombre de modules en séries :  $\frac{U_l}{U_m} = 1$  module en série.

g- Capacité des batteries :  $C = 8297,14$  Wh.

En A h :  $C_u = \frac{C}{U_l} = 172,85$  A h.

h- Nombre de batteries en série :  $N_{bs} = \frac{U_l}{U_b} = 4$

i- Nombres de batteries en parallèle :  $N_{bp} = \frac{C_u}{C_e} = 1$ .

j- Nombre total de batteries :  $N_{bt} = 4$  batteries.

Tableau 5-2 : Tableau de dimensionnement de la climatisation.

Dimensionnement	Paramètres	Climatisation	Type de matériel	
<b>Générateur</b>	Ep (Wh/j)	3300	Panneau momo 190W/45,2V (SOLIMPEKS)	
	Pc (Wc)	781,9		
	Npt	4		
	Nps	1		
	Npp	4		
	Stp (m2)	5,2		
	Surface nécessaire de champ (m <sup>2</sup> )	toiture		
<b>Stockage</b>	C (Wh)	8297,14	Batteries Gel 200Ah/12v (Victron Energy)	
	Cu (Ah)	172,85		
	Nbs	4		
	Nbp	1		
	Ntb	4		
<b>Régulateur</b>	Un (V)	150	Régulateur MPPT 150V/100A (Victron Energy)	
	In (A)	200		
	Pn (W)	3000		
	Rr (%)	95		
<b>Onduleur</b>	Uno (V)	48	Onduleur Phoenix 48V/5KVA (Victron Energy)	
	Pn (VA)	3000		
	Ro (%)	93		
<b>Câblages</b>	Sections (mm <sup>2</sup> )	Panneaux	6	(Victron Energy)
		Batteries	25	

		Régulateur		
		Onduleur	25	
		Charge	4	
<b>Protection</b>	Fusibles (A)	Panneaux	100	(Victron Energy)
		Batteries	200	
		Régulateur		
		Onduleur	100	
	Disjoncteurs (A)	Coté panneaux	30	
		Coté charge	30	
	Section de câble de Mise à la terre	Coté panneaux	6	
		Coté charge	6	

### B. Dimensionnement des équipements et appareils de la maison :

On ajoute une marge de sécurité de 20% de la consommation journalier des équipements.

On donne :

$$K = 0.65; \quad R_o = 93\%; \quad R_r = 95\%; \quad U_I = 48 \text{ V}; \quad U_M = 45,2 \text{ V}; \quad S_M = 1,1\text{m}^2$$

$$N_j = 2 \text{ jours}; \quad p_f = 70\%; \quad R_b = 97\%; \quad U_b = 12 \text{ V}; \quad P_{cm} = 150 \text{ W}; \quad E_{min} = 6.5.$$

a- la consommation journalier :  $C_j = 2905 + 20\%$ ,  $C_j = 3486 \text{ Wh/j}$ .

b- onduleur :  $P_o = 3748,4 \text{ Wh/j}$ .

c- régulateur :  $P_r = 3669,5 \text{ Wh/j}$ .

d- énergie produite :  $E_p = 3961,4 \text{ Wh/j}$ .

e- puissance crête :  $P_c = 938,7 \text{ W}$ .

f- Nombre de modules :  $N_m = 5$  modules.

g- Nombre de modules en series :  $\frac{U_I}{U_m} = 1$  module en série.

h- Capacité des batteries :  $C = 9960 \text{ Wh}$ .

$$\text{En A h : } C_u = \frac{C}{U_I} = 207,5 \text{ A h.}$$

i- Nombre de batteries en série :  $N_{bs} = \frac{U_I}{U_b} = 4$ .

j- Nombre de batteries en parallèle :  $N_{bp} = \frac{C_U}{C_e} = 1.$

k- Nombre total de batteries :  $N_{bt} = 4$  batteries.

Tableau 5-3 : Tableau de dimensionnement des équipements de la maison.

Dimensionnement	Paramètres		Equipements	Type de matériel
<b>Générateur</b>	Ep (Wh/j)		3961,4	Panneau mono 150W/45,2V (SOLIMPEKS)
	Pc (Wc)		938,7	
	Npt		5	
	Nps		1	
	Npp		5	
	Stp (m2)		6,5	
	Surface nécessaire de champ (m²)		toiture	
<b>Stockage</b>	C (Wh)		9960	Batteries Gel 200Ah/12v (Victron Energy)
	Cu (Ah)		207,5	
	Nbs		4	
	Nbp		1	
	Ntb		4	
<b>Régulateur</b>	Un (V)		150	Régulateur MPPT 150V/100A (Victron Energy)
	In (A)		200	
	Pn (W)		3000	
	Rr (%)		95	
<b>Onduleur</b>	Uno (V)		48	Onduleur Phoenix 48V/5KVA (Victron Energy)
	Pn (VA)		3000	
	Ro (%)		93	
<b>Câblages</b>	Sections (mm²)	Panneaux	6	(Victron Energy)
		Batteries	25	
		Régulateur		
		Onduleur	25	
		Charge	4	
<b>Protection</b>	Fusibles (A)	Panneaux	100	(Victron Energy)
		Batteries	200	
		Régulateur		
		Onduleur	100	
	Disjoncteurs (A)	Côté panneaux	30	
		Côté charge	30	
		Section du câble de	Côté	

	mise à la terre	panneaux	
		Côté charge	6

**Schéma du système**

La figure ci-dessous montre la constitution du système photovoltaïque autonome [09] :

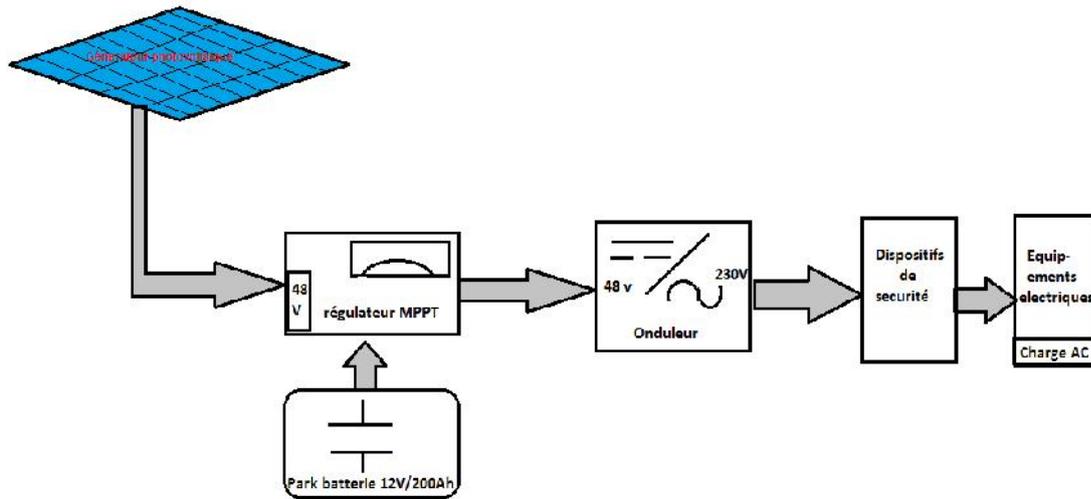


Figure 4– 11: Schème de l'installation photovoltaïque autonome [09].

**6. Principe du système thermique**

La partie capteur thermique (absorbeur ou "concentrateur"... ) récupère l'énergie calorifique envoyée par le soleil (notamment le rayonnement infrarouge habituellement perdu sous forme de chaleur dispersée par le panneau) via un fluide caloporteur (air ou eau/glycol, injecté par une pompe dont le fonctionnement est alimenté par l'électricité).

## 6.1. Types de cuves de stockage

La cuve de stockage d'eau est généralement cylindrique, horizontale ou verticale. Elle peut également être sphérique. La forme de cette cuve ou de ce ballon est dépendante des capteurs thermiques mis en place pour une application donnée. Une vue de cette cuve de stockage est présentée ci-après.

Cette cuve est calorifugée par un matériau isolant (polyuréthane expansé, laine de verre, laine de roche).

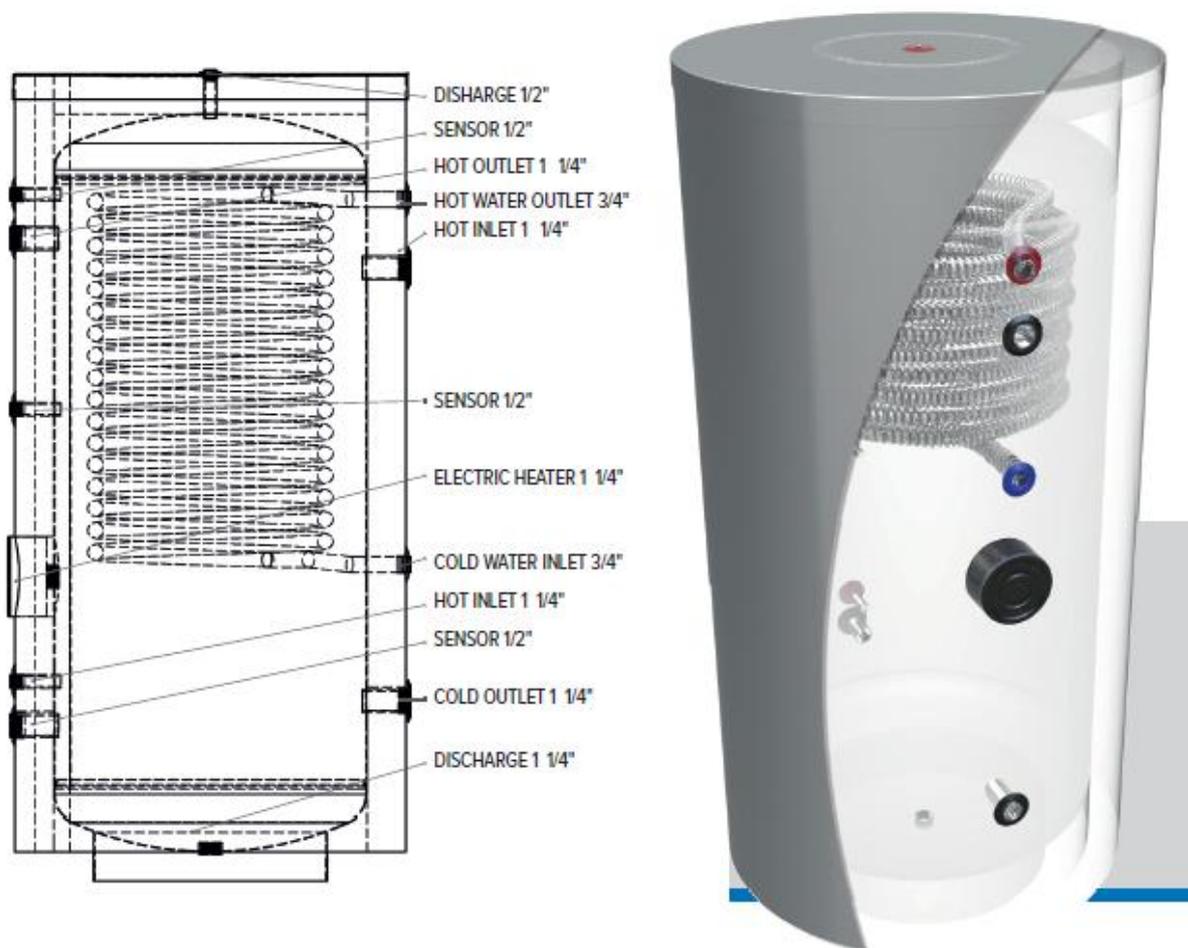


Figure 4-12 : Cuve de stockage.

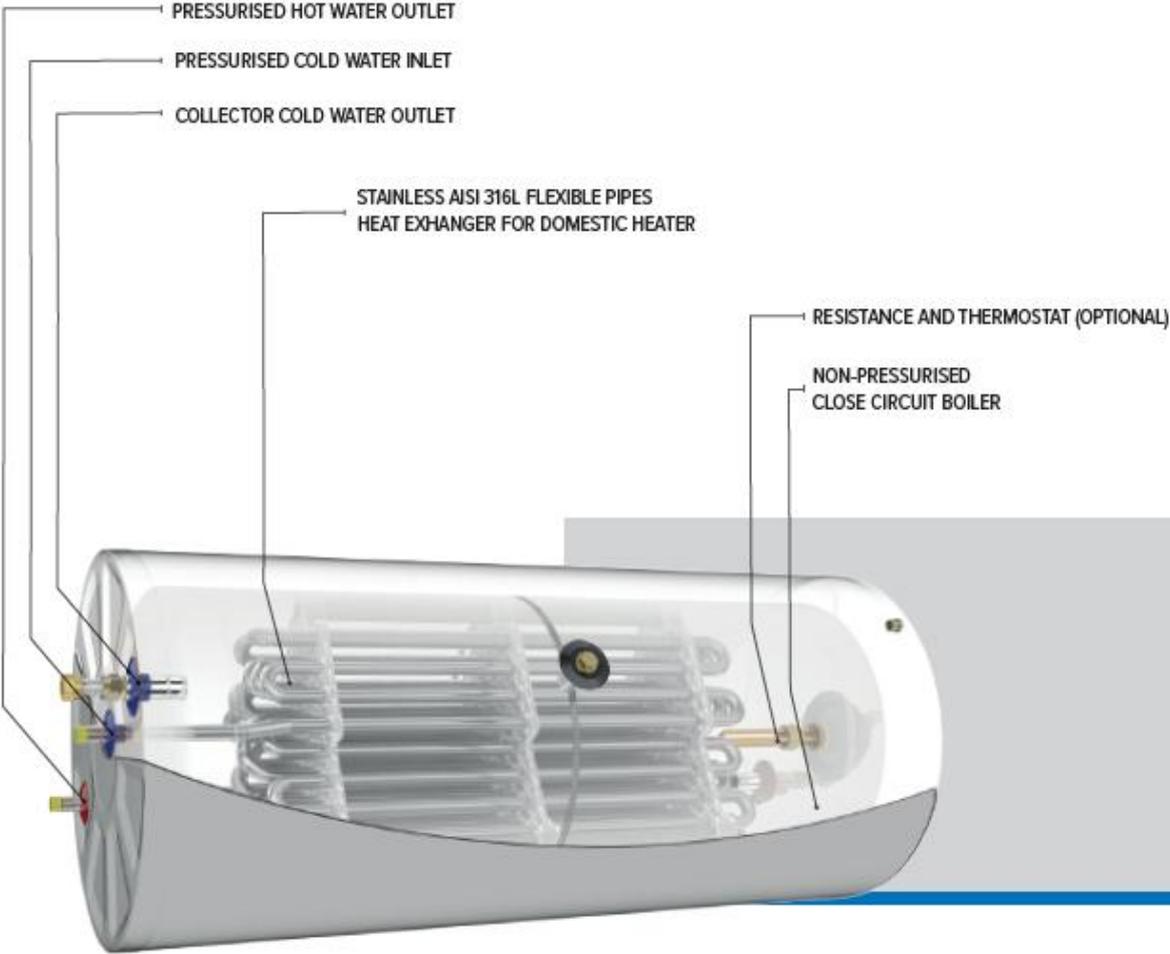


Figure 4-13 : Schéma explicite de la cuve.

## 7. Estimation du cout de l'installation

Le tableau suivant présente le nombre et le cout d'éléments constituant ce système, sachant qu'on a choisi tous les éléments de la marque (VICTRON ENERGY) :

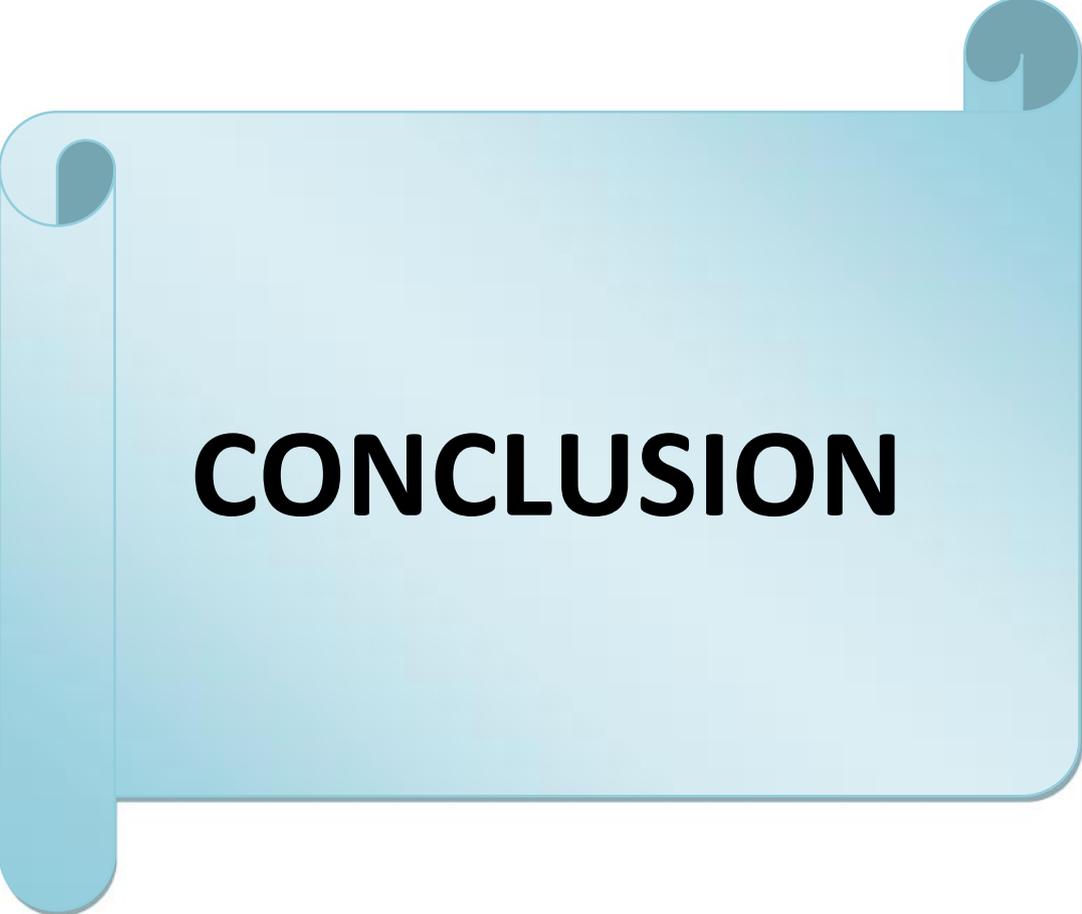
*Tableau 4-4 : Estimation du cout de l'installation.*

Elément	Nombre	Prix unitaire (D.A.)	Coût en (D.A.)
Panneau	9	50 000	450 000
Batterie	8	54 000	432 000
Régulateur	2	72 000	144 000
Onduleur	2	91 000	182 000
Disjoncteur	2	3 200	6 400
Fusible	4	500	2 000
mise à la terre	2	2 200	4 400
Cuve de stockage	1	12000	12000

**Total = 1 232 800,00 D.A.**

## Conclusion

Le dimensionnement des panneaux hybrides (PV/T) nous a permis de définir la puissance que l'on a besoin pour le bon fonctionnement de la maison ainsi que le coût d'électricité à économiser grâce à l'énergie solaire



**CONCLUSION**

### Conclusion

Cette étude est une comparaison globale entre une maison non isolée et une maison écologique non isolée, qui vise à établir clairement les différences des coûts entre les diverses méthodes de construction, et dépense en énergie. L'étude permet également une analyse précise de ce que recouvrent les différents prix, pour permettre à tout un chacun de faire ses choix en toute connaissance de cause.

La principale critique qui revient de manière récurrente contre la construction écologique concerne son coût : « j'aimerais construire une maison très efficace, mais je n'ai pas les moyens ». L'objectif de cette étude est de vérifier ce qu'il en est vraiment en détaillant précisément combien coûte la construction, et ce que cachent les prix. Nous avons ainsi réalisé un comparatif multicritère entre une maison conventionnelle « classique » et une maison à basse consommation d'énergie.

Le coût global de l'isolation de notre maison est estimé à 600 000.00 DA des différents matériaux d'isolation.

Et le coût de l'installation hybride (PV/T) autonome est de 1 232 800.00 D.A, ce qui nous fera économiser une facture annuelle de 160 501.00 D.A d'électricité, ce qui nous permettra de rentabiliser notre investissement après une période de 8 ans.

Ainsi, on peut conclure que, grâce à de nombreuses techniques et à l'utilisation de certaines énergies renouvelables, la consommation énergétique dans l'habitat est réellement optimisée bien que cela comporte des inconvénients notamment le coût de certaines installations. L'exploitation d'un système d'isolation performant vise également à réduire les émissions en dioxyde de carbone et les factures des foyers. La maison écologique s'inscrit donc dans le cadre du développement durable et représente un atout majeur pour préserver notre planète de la pollution et de l'inéluctable avancée vers la surconsommation d'énergie. Cependant, nous pouvons nous demander si l'utilisation de ces énergies constitue un espoir pour les générations futures, même si les matériaux utilisés sont parfois eux-mêmes polluants.

***DIMENSIONNEMENT DES  
PANNEAUX HYBRIDES  
(PV/T)***

## Tableau des matériaux

Matériaux	Conductivité thermique (W/m.K)
Polystyrène	0.038
Mousse de polyuréthane	0.032
Laine minérale	0.034
BA.13	0.27
Liège	0.040
hourdis	0.69
Béton	1.3
Crépis	1.1
Chape	1.92
Mortier	0.45
Dalle de sol	1
Brique	0.78
Pré dalle	1.279
Dalle	1.279
Mortier de pose	1.4
Lame d'air	0.24
Argile cuite	1.15
Plâtre	0.35
Enduit ciment	1.2
Crépis ciment	1.1

*Izdatelstvo Standartov, conductivité thermique des gaz et des liquides et solides, Edition Moscow 1978.*

## Bibliographie

- [01] : Christian Pessey, Chauffage et climatisation l'aménagement de la maison, édition La Maison Rustique 1994.
- [02] : J.F. Sacadura, Initiation aux transferts de thermique, 2<sup>e</sup> édition Dunod 1993.
- [03] : Michel Capderou, Atlas Solaire De L'Algérie, Tome 2, édition office des publications universitaires 1986.
- [04] : B. Eyglunet, Hermes Lavoisier, Manuel de thermique, 2<sup>e</sup> édition revue et augmentée 2000.
- [05] : Règlement thermique des bâtiments d'habitation, règle de calcul de déperditions calorifique. (Centre nationale d'étude et de recherche intégrée du bâtiment).
- [06] : William D. Callister. J.r, Science et génie des matériaux, édition Modulo 2002.
- [07] : Jean-Pierre Moya, Isolation thermique durable des bâtiments existants, édition le Moniteur 2017.
- [08] : Izdatelstvo Standartov, conductivité thermique des gaz et des liquides et solides, édition Moscow 1978.
- [09] : Anne Labouret – Michel Villos, Energie Solaire Photovoltaïque, série Environnement et sécurité, 3<sup>e</sup> édition Dunod 2006.
- [10] : Anne Labouret et A.L, cellules solaires, les bases de l'énergie photovoltaïque, collection ETSF, 4<sup>e</sup> édition Dunod 2005.
- [11] : Installations photovoltaïques autonomes, Guide pour le dimensionnement et la réalisation, Pacer, Office fédérale questions conjoncturelles, coopération suisse au développement, 1999.
- [12] : Jean-Paul Louineau, Guide pratique du solaire photovoltaïque, dimensionnement, installation et maintenance, 2<sup>e</sup> édition Obser'ER 2005.
- [13] : Lalovic B. A. hybrid amorphous silicon photovoltaic and thermal solar collector. Sol Cells Volum19 Issue2 1986-1987.
- [14] : Touafek.k., Haddadi. M., Malek. A., Bendaikha-Touafek.W., étude thermique d'un capteur hybride photovoltaïque thermique (PV/T) à air recouvert destine au chauffage d'habitation. Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11 N°1, pp. 153-165,2006.
- [15] : Audrey Delnatte, Waltrui Huysmans. Les systèmes photovoltaïques en toiture : état de l'art, 2008.