



**Université Abderrahmane Mira de Bejaïa**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie Electrique**

**Filière : énergie renouvelable**

**Spécialité : énergie renouvelable en électrotechnique**



---

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

---

En vue de l'obtention du master en électrotechnique

### **Thème**

Etude et dimensionnement d'une maison à  
énergie solaire



#### **Réalisé par :**

Mr. IHAMMOUCHEN Syphax

Mr. BAHLOUL Islam

#### **Dirigé par :**

Mme REKIOUA .DJ

#### **Membre de jury :**

Mr TAMALOUZT

Mme MOKRANI

# Remerciements

*Avant de présenter ce travail, nous tenons à remercier Allah le tout puissant pour nous avoir donné beaucoup de patience et de courage pour réaliser ce travail en cette période de crise sanitaire difficile.*

*Nous tenons à présenter nos sincères remerciements et notre profonde reconnaissance à notre promotrice Madame REKIOUA DJAMILA pour l'appui scientifique, son orientation, travailler à ses côtés est un plaisir, merci d'avoir accepté d'être notre encadreuse.*

*Qu'elle veuille bien trouver ici l'expression de notre reconnaissance pour sa patience, sa disponibilité, ses conseils et son aide, qui nous ont permis de réaliser ce travail dans les meilleures conditions.*

*Notre respect s'adresse aux membres du jury qui nous feront l'honneur d'apprécier ce travail.*

*Nous tenons à présenter tout notre respect à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation du primaire jusqu'au cycle universitaire.*

# Dédicaces

*Je dédie ce travail accompagné d'un profond amour :*

*A celle qui m'a arrosé de tendresse et d'espoirs, à la source d'amour incessible, à la mère des sentiments fragiles qui ma bénie par ses prières,*

*'Femma' ... ma chère mère.*

*A mon support dans ma vie, qui m'a appris, m'a supporté et ma dirigé vers la gloire ... mon cher père.*

*A mes chères frères et sœurs, pour leur grand amour et soutien qu'ils trouvent ici l'expression de ma haute gratitude.*

*A tous mes amis, Ahmed, AË, Athmen, Facin et Foubā*

*Sans oublier Nawel, Nami et Nahina.*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer mes respects, ma reconnaissance et mon profond amour.*

*Quisse dieu vous préserver et vous procurer santé et bonheur.*

*Syphax*

# Dédicaces

Personne ne peut prétendre avoir acquis les connaissances qui lui ont permis d'arriver au plus haut niveau d'étude, sans le soutien incontestable de sa famille, de tous ceux qui lui ont, de près ou de loin, prêté un instant d'attention.

En somme, je tiens à dédier ce modeste travail :

A Yemma, ma source de vie, tout ce que je peux t'offrir ne pourra exprimer l'amour et la reconnaissance que je te porte, en témoignage, je t'offre ce modeste travail pour te remercier pour tes sacrifices et pour l'affection dont tu m'as toujours entouré pendant toutes ces longues années.

A Vava, mon suprême exemple, et l'épaule solide, à qui je dois beaucoup, aucune dédicace ne saurait exprimer mes sentiments, que dieu te procure santé et longue vie.

A ma défunte grande mère et ma deuxième mère, Tima, qui nous a quittés un certain vendredi voilà 8ans, tu resteras a jamais gravée dans nos cœurs ;

A mes deux frères Amazigh et Samy;

A mes ami(e)s;

# Table des matières

Introduction générale .....	1
<b>I Généralités sur l'énergie solaire .....</b>	<b>4</b>
I.1 Introduction .....	4
I.2 Le soleil : source d'énergie.....	4
I.3 Systèmes de coordonnées .....	5
I.3.1 Coordonnées terrestres .....	5
I.3.2 Coordonnées équatoriales .....	6
I.3.3 Coordonnées horizontales .....	6
I.4 Caractéristiques du rayonnement solaire .....	7
I.4.1 Constante solaire .....	7
I.4.2 Composition du rayonnement solaire.....	7
I.4.3 Types de rayonnement solaire.....	8
I.5 Application de l'énergie solaire.....	9
I.5.1 Système photovoltaïque .....	9
I.5.2 Système solaire thermique (Photo-thermique).....	17
I.6 Conclusion.....	20
<b>II Etude et dimensionnement de l'installation solaire .....</b>	<b>22</b>
II.1 Introduction .....	22
II.2 Présentation du système étudié.....	22
II.2.1 La maison d'implantation.....	22
II.2.2 Gisement solaire .....	24
II.3 Dimensionnement de l'installation solaire photovoltaïque .....	25
II.3.1 Evaluation du besoin journalier.....	25
II.3.2 Dimensionnement des principaux composants du système PV .....	28
II.3.3 Devis quantitatif .....	41
II.3.4 Schéma de l'installation photovoltaïque .....	42
II.4 Dimensionnement de l'installation solaire thermique .....	43
II.4.1 Présentation du système étudié .....	43
II.4.2 L'évaluation des besoins journaliers .....	44
II.4.3 Dimensionnement des composants de l'installation thermique .....	45
II.4.4 Schéma de l'installation solaire thermique .....	49
II.4.5 Devis quantitatif .....	50

II.5	Schéma globale de l'installation (photovoltaïque-thermique).....	50
II.6	Conclusion .....	51
<b>III</b>	<b>Etude technico-économique de l'installation solaire .....</b>	<b>54</b>
III.1	Introduction .....	54
III.2	Application et analyse technico-économique pour le système photovoltaïque.....	54
III.2.1	Choix des panneaux photovoltaïques .....	54
III.2.2	Choix des batteries de stockage .....	56
III.2.3	Choix des éléments restants de l'installation PV .....	57
III.2.4	Devis total du système photovoltaïque.....	57
III.3	Application et analyse technico-économique pour le système solaire thermique .....	58
III.3.1	Choix des panneaux .....	58
III.3.2	Choix de ballon de stockage.....	59
III.3.3	Choix de la tuyauterie .....	59
III.3.4	Devis total du système solaire thermique.....	60
III.4	Devis global de toute l'installation solaire (Photovoltaïque-Thermique) .....	60
III.5	Devis total de l'installation solaire (réalisée) .....	61
III.5.1	Devis de l'installation PV réalisée .....	61
III.5.2	Devis total de l'installation solaire thermique (réalisée).....	62
III.5.3	Devis global de toute l'installation solaire (réalisée).....	62
III.6	Devis estimatifs : cas où la maison est raccordée au réseau public (électricité-gaz naturel).....	63
III.6.1	Raccordement au réseau électrique BT/aérien .....	63
III.6.2	Raccordement au réseau du gaz naturel .....	65
III.6.3	Devis total du raccordement au réseau public (électricité-gaz naturel) .....	67
III.7	Comparaison entre le coût du raccordement au réseau et celui de l'installation solaire 68	
III.8	Conclusion .....	68
	<b>Conclusion générale .....</b>	<b>70</b>
	<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>72</b>
	<b>Annexes .....</b>	<b>74</b>

## Liste des figures

<b>Figure I.1.</b> Le soleil. ....	4
<b>Figure I.2.</b> Coordonnées terrestres. ....	5
<b>Figure I.3.</b> Repérage de la position du soleil (hauteur et azimut). ....	6
<b>Figure I.4.</b> Coordonnés horizontales. ....	7
<b>Figure I.5.</b> La répartition spectrale du rayonnement solaire. ....	8
<b>Figure I.6.</b> Types de rayonnement solaire. ....	8
<b>Figure I.7.</b> Les différents composants d'une installation photovoltaïque. ....	9
<b>Figure I.8.</b> Structure basique d'une cellule solaire. ....	9
<b>Figure I.9.</b> Dopage de semi-conducteur. ....	10
<b>Figure I.10.</b> Principe de fonctionnement d'une cellule PV. ....	11
<b>Figure I.11.</b> Types de cellules photovoltaïques. ....	12
<b>Figure I.12.</b> Symbole électrique de l'onduleur. ....	13
<b>Figure I.13.</b> Onduleur central. ....	13
<b>Figure I.14.</b> Onduleur string. ....	14
<b>Figure I.15.</b> Onduleur multi-string. ....	14
<b>Figure I.16.</b> Les circuits et appareillages de protection au niveau du champ. ....	16
<b>Figure I.17.</b> Protection au niveau du régulateur de charge. ....	16
<b>Figure I.18.</b> Protection au niveau du système de stockage. ....	17
<b>Figure I.19.</b> Chauffe-eau solaire à thermosiphon. ....	18
<b>Figure I.20.</b> Type de chauffe-eau solaire à circulation forcée. ....	19
<b>Figure II.1.</b> Vue de face, gauche et droite de la maison sous 'SketchUp'. ....	23
<b>Figure II.2.</b> Plan de la toiture disponible. ....	23
<b>Figure II.3.</b> Région de Béjaïa. ....	24
<b>Figure II.4.</b> Histogramme de l'irradiation globale moyenne mensuelle. ....	25
<b>Figure II.5.</b> Montage des modules dans le sens de la longueur (6 x 8). ....	33
<b>Figure II.6.</b> Différentes parties de transport de l'énergie électrique. ....	39
<b>Figure II.7.</b> Système de raccordement des composants de l'installation PV. ....	41
<b>Figure II.8.</b> Schéma de l'installation photovoltaïque sous 'SketchUp'. ....	42
<b>Figure II.9.</b> Les principaux composants d'un chauffe-eau solaire. ....	43
<b>Figure II.10.</b> Schéma d'installation du chauffe-eau solaire individuel (CESI). ....	44
<b>Figure II.11.</b> Panneau solaire thermique verticale. ....	47

<b>Figure II.12.</b> Ballon de stockage d'ECS à double échangeur du type 'Regulus' R2DC 300.	48
<b>Figure II.13.</b> Schéma de l'installation solaire thermique sous 'SketchUp'.	50
<b>Figure II.14.</b> Schéma globale de l'installation (photovoltaïque-thermique) sous 'SketchUp'.	51
<b>Figure III.1.</b> Devis total de l'installation photovoltaïque en pourcentage.	58
<b>Figure III.2.</b> Devis total de l'installation solaire thermique en pourcentage.	60
<b>Figure III.3.</b> Devis total de l'installation globale en pourcentage.	61
<b>Figure III.4.</b> Devis total de l'installation globale en pourcentage.	62
<b>Figure III.5.</b> Devis estimatif total du raccordement au réseau électrique en pourcentage.	64
<b>Figure III.6.</b> Devis estimatif total du raccordement au réseau du gaz naturel en pourcentage.	66
<b>Figure III.7.</b> Devis estimatif total du raccordement au réseau du gaz naturel en pourcentage.	67
<b>Figure III.8.</b> Comparaison entre le coût du raccordement au réseau public et de l'installation solaire.	68



## Liste des tableaux

<b>Tableau II.1.</b> Irradiation globale moyenne mensuelle ainsi les températures moyennes mensuelles. ....	24
<b>Tableau II.2.</b> Caractéristiques des différents composants du système de pompage. ....	26
<b>Tableau II.3.</b> Résultats de dimensionnement du système de pompage.....	27
<b>Tableau II.4.</b> Consommation moyenne journalière .....	28
<b>Tableau II.5.</b> Récapitulatif des résultats de l'évaluation du besoin journalier.....	28
<b>Tableau II.6.</b> Caractéristiques du module photovoltaïque SUNTECH STPO80S-12/Bb .....	30
<b>Tableau II.7.</b> Tension du champ en fonction de sa puissance crête.....	30
<b>Tableau II.8.</b> Résultats de dimensionnement du GPV.....	31
<b>Tableau II.9.</b> Dimensions de la toiture et le module photovoltaïque.....	32
<b>Tableau II.10.</b> Résultats du dimensionnement selon la surface.....	32
<b>Tableau II.11.</b> Caractéristiques de la batterie choisie. ....	34
<b>Tableau II.12.</b> Résultats du dimensionnement du système de stockage. ....	34
<b>Tableau II.13.</b> Les caractéristiques techniques de l'onduleur SMA SB 3600 TL-RPC. ....	37
<b>Tableau II.14.</b> Résultat de dimensionnement de l'onduleur SB 3600TL-RPC .....	38
<b>Tableau II.15.</b> Résultat corrigé de dimensionnement de l'onduleur.....	38
<b>Tableau II.16.</b> Résultats du dimensionnement des câbles .....	40
<b>Tableau II.17.</b> Récapitulatifs de dimensionnement des différents composants de l'installation PV.....	41
<b>Tableau II.18.</b> Ratios de consommation moyenne d'eau chaude à 60 °C .....	44
<b>Tableau II.19.</b> Quelques données nécessaires au dimensionnement. ....	46
<b>Tableau II.20.</b> Caractéristiques techniques du capteur solaire thermique .....	47
<b>Tableau II.21.</b> Résultat d'évaluation du volume de ballon de stockage. ....	47
<b>Tableau II.22.</b> Tableau regroupant les étapes du dimensionnement du panneau solaire thermique.....	48
<b>Tableau II.23.</b> Résultats du dimensionnement de la tuyauterie. ....	49
<b>Tableau II.24.</b> Résultats des calculs reliés au système de montage.....	49
<b>Tableau II.25.</b> Devis quantitatif des composants du chauffe-eau solaire. ....	50
<b>Tableau III.1.</b> Prix des panneaux monocristallins .....	54
<b>Tableau III.2.</b> Prix des panneaux photovoltaïques polycristallins.....	55
<b>Tableau III.3.</b> Devis estimatif total des différents type de PV .....	56
<b>Tableau III.4.</b> Coût des différents batteries proposées. ....	56

<b>Tableau III.5.</b> Étude comparative entre les trois batteries proposées. ....	57
<b>Tableau III.6.</b> Prix du régulateur ainsi que celui de l'onduleur .....	57
<b>Tableau III.7.</b> Devis du système de câblage. ....	57
<b>Tableau III.8.</b> Devis estimatif total de l'installation photovoltaïque.....	57
<b>Tableau III.9.</b> Devis estimatif de différents panneaux solaires thermiques.....	58
<b>Tableau III.10.</b> Devis total du panneau solaire thermique.....	59
<b>Tableau III.11.</b> Devis estimatif du ballon de stockage proposé. ....	59
<b>Tableau III.12.</b> Devis estimatif de la tuyauterie. ....	59
<b>Tableau III.13.</b> Devis total de l'installation solaire thermique. ....	60
<b>Tableau III.14.</b> Devis total de l'installation globale. ....	60
<b>Tableau III.15.</b> Devis total de l'installation PV.....	61
<b>Tableau III.16.</b> Devis total de l'installation globale. ....	62
<b>Tableau III.17.</b> Coût du transport de l'énergie électrique pour une longueur de 400m. ....	63
<b>Tableau III.18.</b> Coût du branchement au réseau électrique. ....	63
<b>Tableau III.19.</b> Devis estimatif de la consommation électrique pour une période de 15 ans. ....	64
<b>Tableau III.20.</b> Devis estimatif total du raccordement au réseau électrique. ....	64
<b>Tableau III.21.</b> Coût du transport du gaz naturel pour une longueur de 400m. ....	65
<b>Tableau III.22.</b> Coût du branchement au réseau électrique. ....	65
<b>Tableau III.23.</b> Coût estimatif de la consommation électrique pour une période de 15 ans ..	66
<b>Tableau III.24.</b> Devis estimatif total du raccordement au réseau électrique BT/aérien. ....	66
<b>Tableau III.25.</b> Devis total du raccordement au réseau public. ....	67

# Nomenclature

## Abréviations

AC	Alternatif curant (courant alternatif)
BR	Boite de Raccordement
CESI	chauffe-eau solaire individuel
DC	Direct curant (courant continu)
ECS	Eau chaude sanitaire
HMT	Hauteur manométrique totale
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PV	Photovoltaïque
PWM	Pulse Width Modulation
STC	Conditions d'essais standard (Standard Test Conditions)

## Symboles

$B_j$	Besoin journalier en énergie électrique	[Wh/j]
$C_{bat}$	Capacité de la batterie	[Ah]
$C_p$	Capacité thermique de l'eau	[Wh/kg.K°]
$E_c$	Énergie consommée journalière par un type d'appareil (Wh/j)	[Wh/j]
$E_j$	Énergie calorifique journalière	[kWh/j]
$E_s$	Ensoleillement	[W/m <sup>2</sup> ]
$g$	Accélération de la pesanteur	[m/s <sup>2</sup> ]
$G_s$	Énergie apportée par le soleil	[kWh/m <sup>2</sup> ]
$h$	Hauteur manométrique totale	[m]
$I_B$	Courant admissible	[A]
$I_{mpp}$	Courant au point de puissance maximum	[A]
$I_{cc}$	Courant de court-circuit.	[A]
$j_{aut}$	Nombre de jours d'autonomies	
$L$	longueur du câble	[m]

$N_{ch}$	Nombre de chaines photovoltaïques	
$N_e$	le nombre d'heures équivalent d'ensoleillement	
$N_M$	Nombre maximal de modules par rangée	
$N_R$	Nombre maximal de rangées	
$N_{pv}$	Nombre de panneaux photovoltaïques	
$N_{pv\_serie}$	Nombre de panneaux série	
$N_{pv\_para}$	Nombre de panneaux shunt	
$N_{pvs\_min}$	Nombre minimale de modules en séries pour lequel le tracker fonctionne	
$N_{pvs\_max}$	Nombre maximale de modules en séries pour lequel le tracker fonctionne	
$N_{bat}$	Nombre totale de batteries	
$P$	Nombre de personnes	
$PDD$	profondeur de décharge de la batterie	[%]
$P_{hyd}$	Puissance hydraulique	[W]
$P_c$	Puissance crête du panneau photovoltaïque	[W]
$P_{ch}$	Puissance unitaire de l'appareil	[W]
$P_{méc}$	Puissance mécanique	[W]
$P_{élé}$	Puissance électrique de la machine Asynchrone	[W]
$Q$	Débit volumique	[m <sup>3</sup> /s]
$R$	Résistance électrique	[ $\Omega$ ]
$S$	Section du câble	[mm <sup>2</sup> ]
$t_{EC}$	Température d'eau chaude	[°C]
$t_{EF}$	Température d'eau froide	[°C]
$t_{ST}$	Température de stockage (souhaitée)	[°C]
$V_{ch}$	Tension du champ photovoltaïque	[V]
$V_{pv}$	Tension délivrée par un panneau photovoltaïque	[V]
$V$	volume de stockage d'eau	[m <sup>3</sup> ]
$V_{batt}$	Tension de la batterie	[V]
$V_{co}$	Tension de circuit ouvert	[V]
$V_{max}$	Tension maximale délivrée par les modules	[V]

$V_{ST,min}$	Volume minimal du ballon de stockage	[L]
$V_P$	Consommation journalière d'eau chaude par personnes	[L]

### Lettre grecque

$\rho$	Masse volumique du fluide	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\tau_p$	Temps de pompage.	[h]
$\epsilon$	Chute de tension	[%]
$\rho$	Résistivité électrique du matériau	[ $\Omega.m$ ]
$\beta$	Facteur de forme	
$\eta_b$	Rendement de la batterie.	
$\eta_p$	Rendement de la pompe.	
$\eta_{ond}$	Rendement de l'onduleur	

## Résumé

La plus grande ressource d'énergie techniquement accessible sur la planète est disponible dans la région nord-africaine. Nous allons étudier plus particulièrement l'énergie solaire qui permet de générer deux types d'énergie : électrique et thermique qui sont indispensables dans le quotidien des êtres humains c'est pour cela nous allons dimensionner une installation photovoltaïque afin de répondre aux besoins en électrification et en eau (pompage solaire) d'un habitat, et une autre pour couvrir le besoin en eau chaude sanitaire à l'aide d'un chauffe-eau solaire.

Une importance particulière est en train d'être accordée à la construction des habitats autonomes surtout dans les pays industrialisés. Ceci pour plusieurs causes qui peuvent être principalement résumées, d'une part, en la croissance accrue de la demande mondiale en énergie conventionnelle et ses problèmes d'approvisionnement, et d'autre part, en l'élévation de son coût et la pollution qu'elle provoque.

Le soleil peut fournir de l'énergie propre qui favorise un développement durable.

**Mots clés :** énergie solaire, énergie photovoltaïque, énergie thermique, chauffe-eau solaire habitat autonome, dimensionnement, technico-économique

## Abstract

The largest technically accessible energy resource on the planet is available in the North African region. We are going to study more particularly solar energy which makes it possible to generate two types of energy: electric and thermal one which are essential in the daily life of human beings. Thus, we have to design a photovoltaic installation in order to meet the needs in electrification and in water (solar pumping) for a home, and a photothermal installation to cover needs for domestic hot water

Particular importance is given to the construction of autonomous houses especially in industrialized countries, this for several causes which can be mainly summarized, on the one hand, in the increased growth of the world demand for conventional energy and its consequences supply problems, and on the other hand, in the increase in its cost and the pollution it causes.

The sun can provide clean energy that promotes sustainable development.

**Keywords:** solar energy, photovoltaic energy, photothermal energy, autonomous housing, sizing, solar water heater, technico-economic



---

# Introduction générale

---



## Introduction générale

Début 2020, le coronavirus « Covid-19 » responsable d'une pandémie meurtrière a mis le monde dans une crise sanitaire sans précédent.

Dans le cadre de la lutte contre cette pandémie dévastatrice, les gouvernements ont établi des protocoles sanitaires stricts afin de limiter sa propagation, le confinement des populations est parmi les mesures prises dans ces protocoles, ce qui a engendré une mise à l'arrêt des économies mondiales avec un effet collatéral, une réduction spectaculaire de la pollution et l'effet de serre dans le globe terrestre. Ce sont des conséquences indirectes, mais positives de cette pandémie, cette expérience nous pousse à se poser certaines questions :

Est-ce qu'il est grand temps de basculer de l'utilisation des énergies fossiles polluantes, émettrices des gaz à effet de serre, vers l'utilisation des énergies renouvelables non polluantes pour la production de l'énergie ? Notre consommation énergétique est-elle raisonnable ?

L'énergie est l'élément vital de l'économie pour tous les pays, la production de l'énergie est un défi pour les années à venir, vu la croissance démographique et l'épuisement des gisements énergétiques fossiles qui sont les sources de la totalité de l'énergie mondiale produite.

Les ressources renouvelables figurent comme une solution prometteuse sans compétition pour la production d'une énergie durable, propre et sans risquer l'avenir de l'humanité. Elles sont issues du soleil, du vent, de la biomasse, de l'eau ou de la chaleur de la terre. Et à la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables proviennent de sources inépuisables et à différentes filières technologiques et la filière étudiée dans ce mémoire est l'énergie solaire avec ses deux types : photovoltaïque et thermique.

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :[1]

- ✓ 1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- ✓ 1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- ✓ 1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- ✓ 1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- ✓ 1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- ✓ 1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.



Notre travail a pour but, de faire l'étude et dimensionnement d'une installation solaire destinée à couvrir les besoins énergétiques d'un habitat isolé. A cet égard, et afin de réussir ce travail :

Nous allons d'abord présenter quelques notions et généralités sur l'énergie solaire, ainsi que ses différentes méthodes d'exploitation, ce qui est l'objet du premier chapitre.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude et dimensionnement de l'installation solaire, cette dernière est divisée en deux sous-installations, la première est une installation photovoltaïque la deuxième est une installation solaire thermique dédié au chauffage d'eau, où nous allons présenter différentes techniques de dimensionnement.

Le dernier chapitre est réservé à l'étude technico-économique pour les composants de l'installation solaire, une étude qui va nous aider à estimer le coût de l'installation ainsi que la combinaison la plus économique des éléments de l'installations.

Et nous terminons ce travail avec une conclusion générale, dont on a énuméré certaines recommandations et quelques perspectives pour les futurs travaux dans ce domaine.



---

# Chapitre I

## Généralités sur l'énergie solaire

---



# I Généralités sur l'énergie solaire

## I.1 Introduction

L'énergie émise par le soleil sur la surface de la terre est collectée et convertie soit en énergie thermique (conversion photo-thermique), soit en électricité (conversion photovoltaïque) puis utilisée et éventuellement stockée.

Ce premier chapitre traite des généralités sur l'énergie solaire commençant par la définition de la source d'énergie arrivant au capteur solaire qui est le composant de base de toute installation solaire. Il contient deux parties, la première est réservée à la présentation de certaines notions astrophysiques, géométriques et énergétiques. La deuxième est réservée à l'application de l'énergie solaire, deux principales applications citées dans ce travail : une pour la production de l'énergie électrique appelée « énergie photovoltaïque » et une autre pour la production de l'énergie calorifique nommée « énergie photo-thermique ».

## I.2 Le soleil : source d'énergie

Le soleil est une sphère de plasma (matière complètement ionisée), dont la masse est  $2 \times 10^{30} \text{ Kg}$ , soit 332 500 fois la masse de la terre. C'est le siège de réactions thermonucléaires et exothermiques transformant des noyaux d'hydrogène (protons) en noyaux hélium (deutons) avec une émission d'énergie qui donne naissance à un rayonnement électromagnétique reparti sur un très large spectre de longueurs d'onde comprises entre  $10^{-10}$  et  $10^4$  mètres. La terre reçoit une puissance de  $1.35 \text{ kW/m}^2$  et sa distance moyenne au soleil est  $1,496 \times 10^8 \text{ Km}$ . [2]

Au départ, la température dégagée au niveau du noyau est de 15 à 20 millions  $^{\circ}\text{C}$  n'est plus que de  $50^{\circ}\text{C}$  à son arrivée sur notre globe.

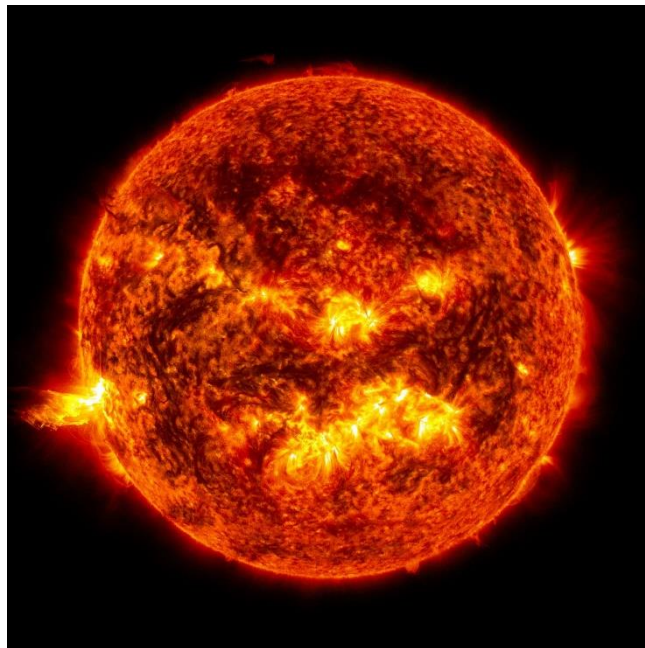


Figure I.1. Le soleil.

L'énergie solaire qui se manifeste principalement par la chaleur diffusée vers la terre, se propage de trois façons différentes (conduction, convection et rayonnement)

### I.3 Systèmes de coordonnées

#### I.3.1 Coordonnées terrestres

Tout point de la surface terrestre peut être repéré par deux coordonnées principales, à savoir sa latitude  $\phi$  et sa longitude  $L$ , et une coordonnée auxiliaire qui est l'altitude  $Z$ . L'ensemble de ces coordonnées appelées coordonnées terrestres : [3]

##### a) La latitude $\phi$

La latitude est une coordonnée géographique représentée par une valeur angulaire, expression de la position d'un point sur Terre, au nord ou au sud de l'équateur qui est le plan de référence. Elle est comptée de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  positivement dans l'hémisphère nord et négativement dans l'hémisphère sud.[3]

##### b) La longitude $L$

La longitude d'un lieu correspond à l'angle formé par deux plans méridiens (passant par l'axe des pôles), l'un étant pris comme origine (méridien de Greenwich  $0^\circ$ ) et l'autre déterminé par le lieu envisagé. On affecte le signe (+) aux méridiens situés à l'est de l'origine, et du signe (-) aux méridiens situés à l'ouest. [4]

##### c) L'altitude $Z$

Correspond à la distance verticale entre un point et une surface de référence.[3]

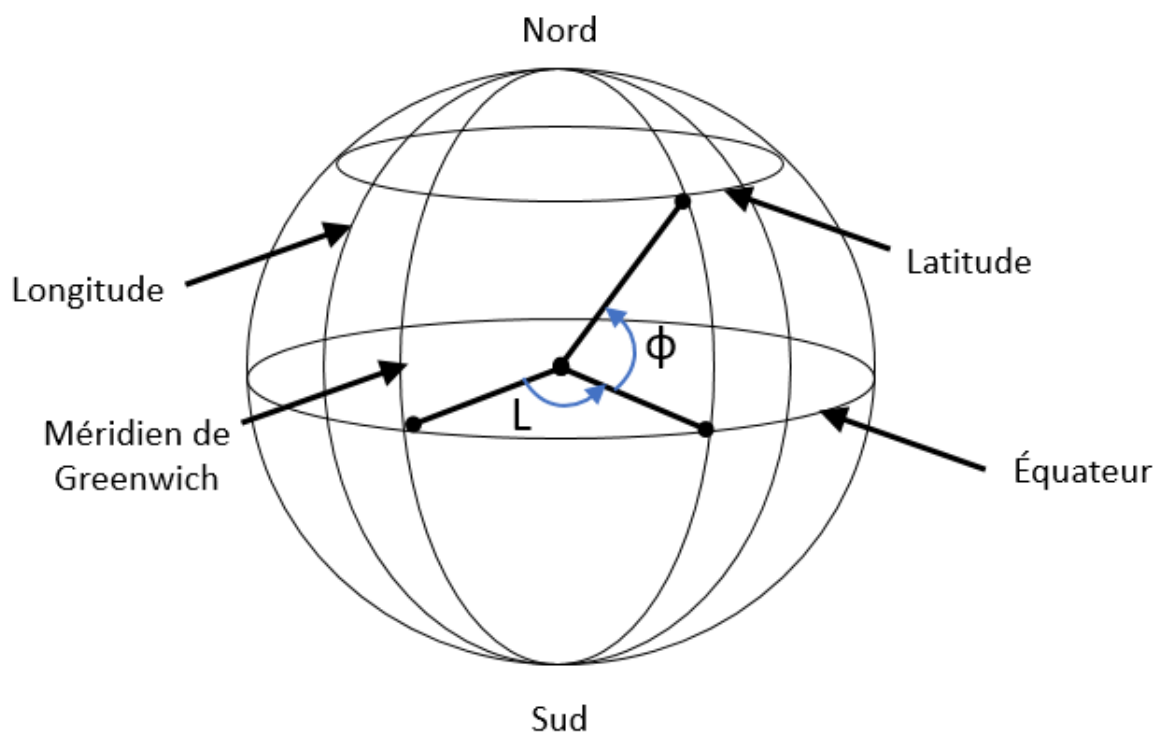


Figure I.2. Coordonnées terrestres.

### I.3.2 Coordonnées équatoriales

Dans Le repère équatorial, la position du soleil dans le ciel est repérée par deux coordonnées, la déclinaison  $\delta$  et l'angle horaire  $\omega$ . [5]

#### a) La déclinaison $\delta$

C'est l'angle que forme la direction du soleil avec le plan équatorial. Elle est donnée par la relation suivante : [6]

$$\delta = 23,45 \times \sin [0,980 \times (n - 81)] \quad (\text{I.3})$$

Tel que :

$n$  : correspond au numéro du jour de l'année à partir du 1<sup>er</sup> janvier

#### b) L'angle horaire $\omega$

Correspond à l'angle formé entre la projection du soleil sur le plan équatorial à un moment donné et la projection du soleil sur ce même plan au midi solaire. Il est donné par la relation suivante : [7]

$$\omega = 15 \times (\text{TSV}-12) \quad (\text{I.4})$$

Avec :

TSV : temps solaire vrai.

### I.3.3 Coordonnées horizontales

Le repère horizontal est un repère qui prend comme origine le lieu de situation de l'observateur et comme plan de référence le plan de l'horizon astronomique. Dans ce repère, la position d'un astre dans l'espace peut être repérée par ses coordonnées horizontales à savoir la hauteur du soleil  $h$  et son azimut  $\alpha$ . [5]

Dans ce système de coordonnées le soleil est repéré par sa hauteur  $h$ , son azimut  $\alpha$  et l'horizon astronomiques comme plan de référence.

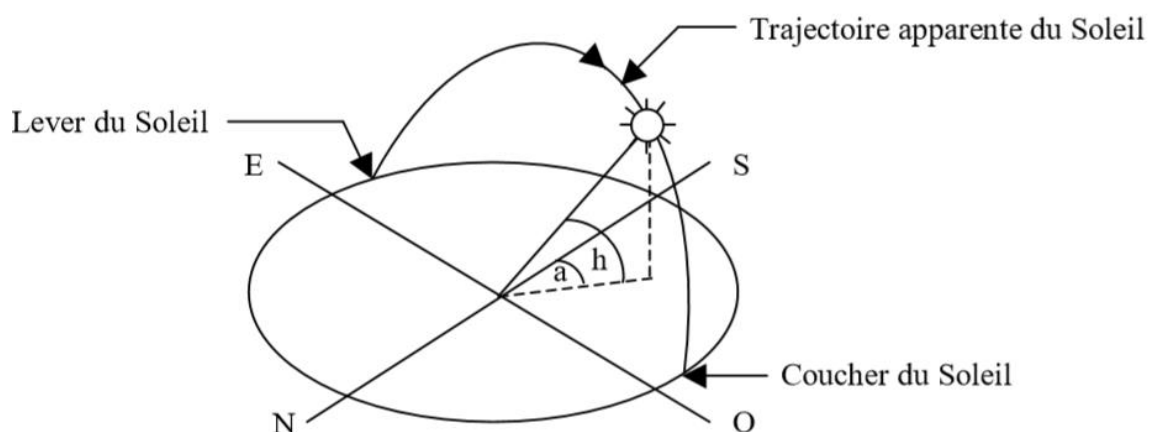


Figure I.3. Repérage de la position du soleil (hauteur et azimut).

#### a) La hauteur du soleil $H$

C'est l'angle que fait la direction de l'astre solaire avec sa projection sur le plan horizontal. Il vaut  $0^\circ$  au lever et coucher astronomiques du soleil, et à  $90^\circ$  à midi temps

solaire vrai. La hauteur du soleil varie à chaque instant de la journée et de l'année selon la relation suivante :

$$\sin H = \sin \varphi \times \sin \delta + \cos \varphi \times \cos \delta \times \cos \omega \quad (\text{I.5})$$

### b) L'azimut du soleil $\alpha$

C'est l'angle entre la projection de la direction du soleil et la direction du Sud. Les azimuts varient de  $0^\circ$  à  $360^\circ$  de l'ouest vers l'est. Ils sont donnés par la formule suivante

$$\sin \alpha = \frac{\cos \delta \times \sin \omega}{\sin H} \quad (\text{I.6})$$

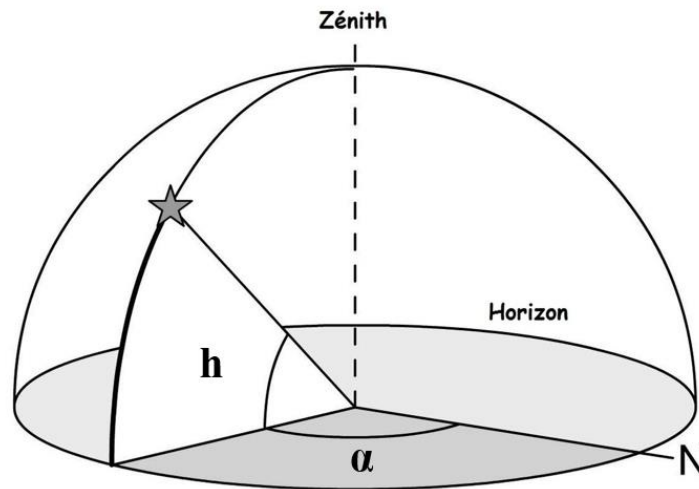


Figure I.4. Coordonnées horizontales.

## I.4 Caractéristiques du rayonnement solaire

### I.4.1 Constante solaire

C'est le flux solaire moyen reçu par une surface plane orientée perpendiculairement aux rayons solaires en dehors de l'atmosphère terrestre. Cette constante est estimée à environ  $1353 \text{ W/m}^2$  qui varie peu dans le temps et l'espace. [2]

### I.4.2 Composition du rayonnement solaire

Lors du passage de l'irradiation solaire à travers l'atmosphère, certaines modifications de ses propriétés se produisent. En effet, elle subit une diffusion et une absorption par les gaz et les composants de l'atmosphère (molécules d'air, vapeur d'eau, ozone, etc.). Le spectre solaire s'étend des plus petites longueurs d'ondes (rayons gamma) vers les grandes ondes radioélectriques.[8]

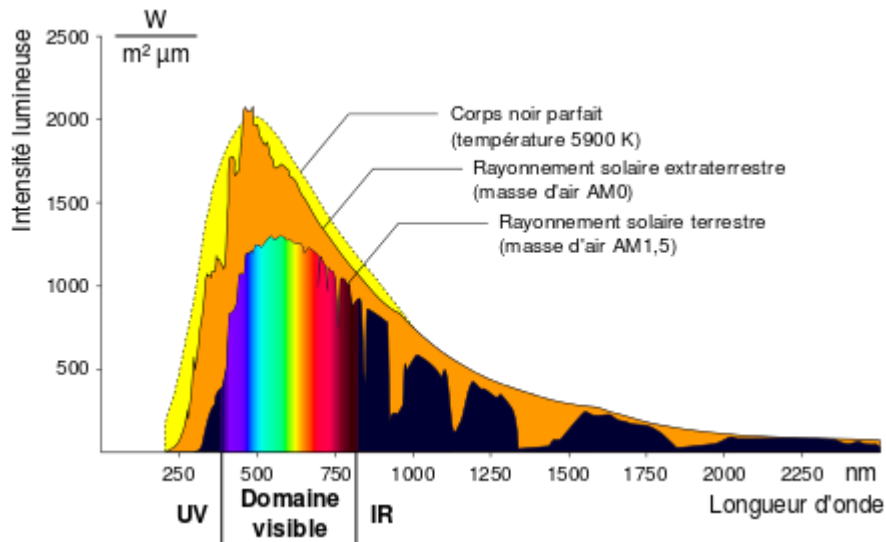


Figure I.5. La répartition spectrale du rayonnement solaire.

### I.4.3 Types de rayonnement solaire

L'atmosphère terrestre ne transmet pas au sol la totalité du rayonnement solaire qu'elle reçoit. De ce fait le rayonnement solaire peut se décomposer en plusieurs catégories définies comme suites : [9]

- ✓ **Le rayonnement direct** : est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications.
- ✓ **Le rayonnement diffus** : est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.
- ✓ **Le rayonnement réfléchi** : C'est la fraction du rayonnement incident diffusée ou réfléchi par le sol et les nuages. Ce terme étant généralement réservé au sol, c'est une valeur moyenne de leur réflectance pour le rayonnement considéré et pour tous les angles d'incidences possible. Par définition ; le corps noir possède un albédo nul.

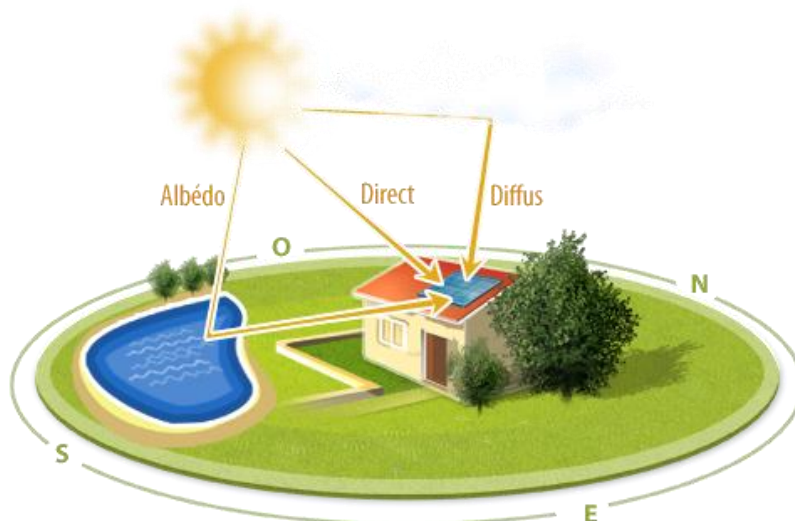


Figure I.6. Types de rayonnement solaire.

## I.5 Application de l'énergie solaire

Dans le domaine de l'industrie solaire, on distingue deux types majeurs de l'utilisation de l'énergie solaire, le premier pour créer de l'énergie électrique c'est à dire le photovoltaïque et le deuxième pour générer de l'énergie thermique c'est à dire le photo-thermique.

### I.5.1 Système photovoltaïque

Un système photovoltaïque autonome est généralement constitué des éléments suivants :

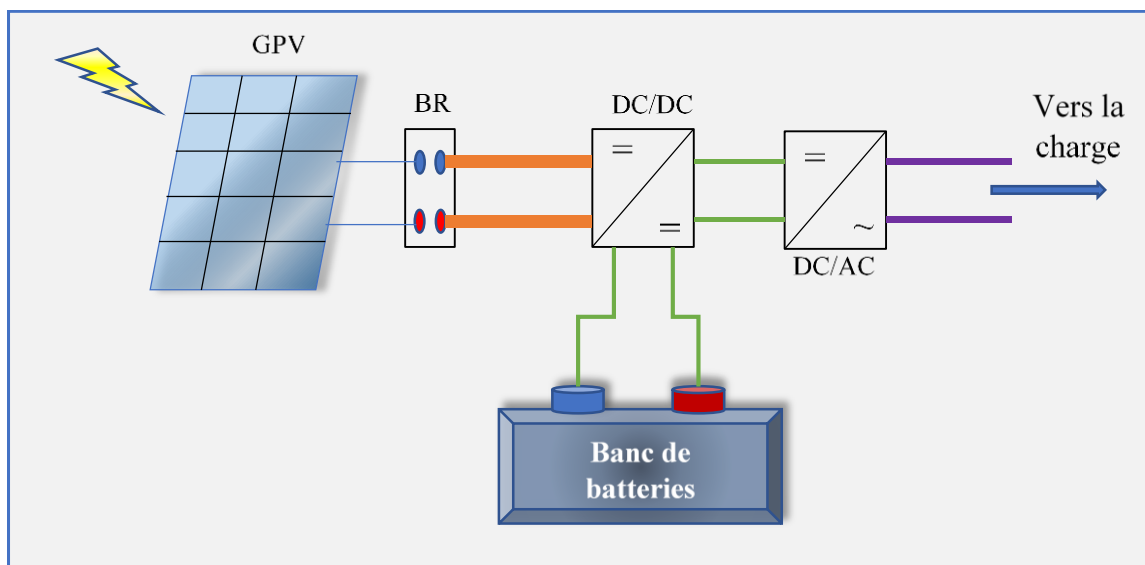


Figure I.7. Les différents composants d'une installation photovoltaïque.

#### I.5.1.1 Générateur PV, cellule PV

##### I.5.1.1.1 Définition

La cellule photovoltaïque (photopile) est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie solaire lumineuse en énergie électrique. La figure ci-après illustre les différents composants (couches) d'une cellule photovoltaïque.

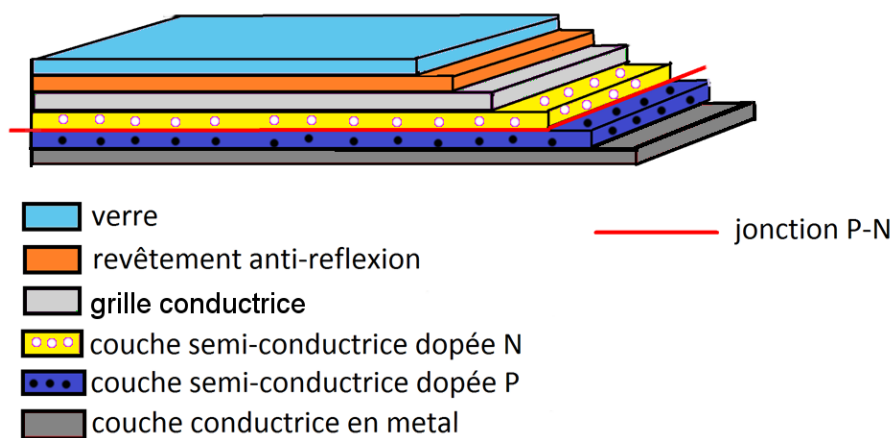


Figure I.8. Structure basique d'une cellule solaire.



Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3V et 0.7V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule. [10]

### I.5.1.1.2 Conversion photovoltaïque

#### a) Semi-conducteur

Les matériaux semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité électrique est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Le germanium, le silicium se sont des exemples de matériaux semi-conducteurs qui existent dans la nature. [9]

#### b) Le dopage de semi-conducteur

Pour créer un courant électrique et augmenter la conductivité des semi-conducteurs on y introduit des impuretés, ce procédé est appelé dopage.

Un matériau semi-conducteur est composé principalement de deux couches, l'une présentant un excès d'électrons (dite dopée de type n) et l'autre un déficit en électrons (dopée de type p). Lors de la mise en contact des deux semi-conducteurs, on remarque que dans la région N les électrons qui sont près du plan de jonction diffusent vers le côté P ; chaque électron qui passe de N vers P donne naissance à une charge positive fixe (ion positif). Le même phénomène se reproduit dans la région P où chaque trou qui passe de P vers N laisse une charge négative fixe (ion négatif). Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. [11]

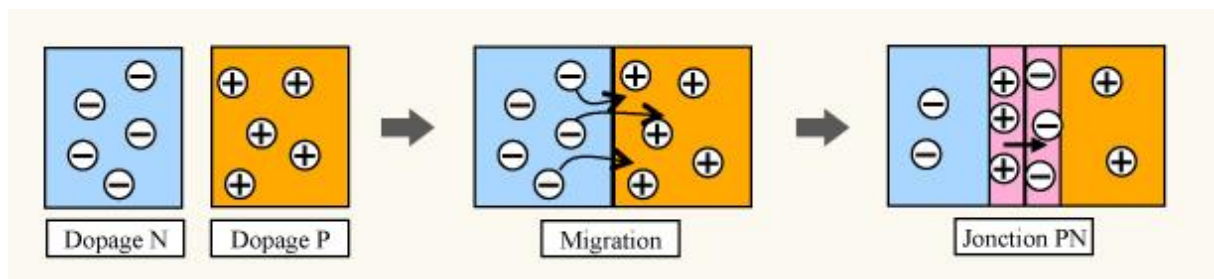
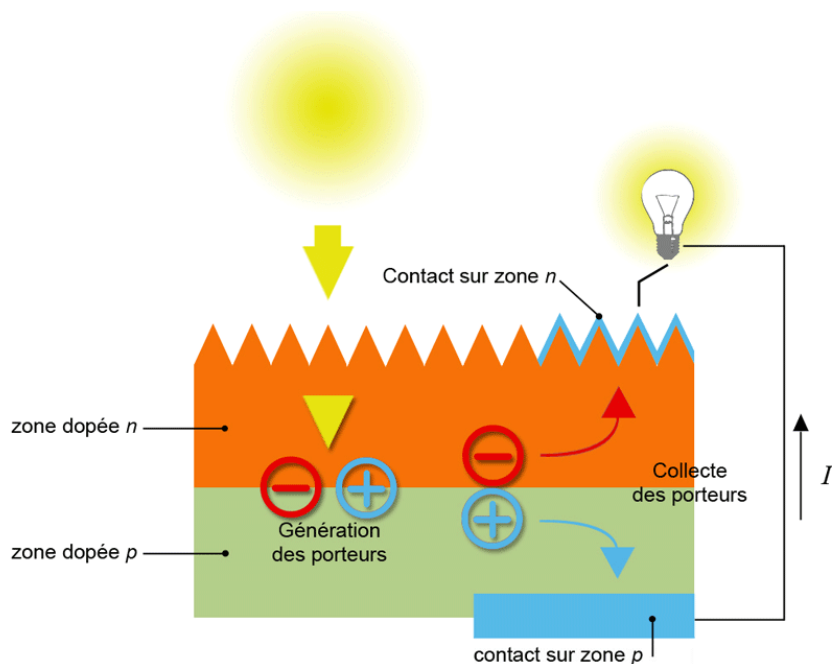


Figure I.9. Dopage de semi-conducteur.

### I.5.1.1.3 Effet photovoltaïque

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photovoltaïque, c'est-à-dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charges (électrons et trous) dans un matériau. Lorsqu'un semi-conducteur est illuminé avec un rayonnement de longueur d'onde appropriée (l'énergie des photons doit être au moins égale à celle du gap énergétique du matériau), l'énergie des photons absorbée permet des transitions électroniques depuis la bande de valence vers la bande de conduction du semi-conducteur, générant ainsi des paires électrons-trous, qui peuvent contribuer au transport du courant (photoconductivité) par le matériau lorsqu'on le polarise.

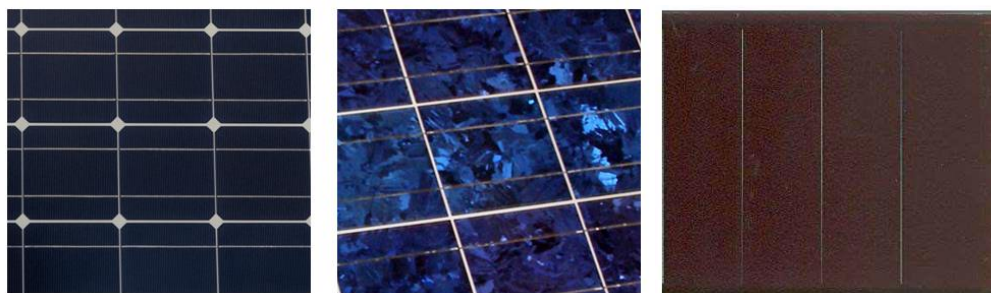
Si on illumine maintenant une jonction PN représenté sur la figure (I.9), les paires électrons-trous qui sont créés dans la zone de charge d'espace de la jonction sont immédiatement séparées par le champ électrique qui règne dans cette région, et entraînées dans les zones neutres de chaque côté de la jonction. Si le dispositif est isolé, il apparaît une différence de potentiel aux bornes de la jonction (photo tension), s'il est connecté à une charge électrique extérieure, on observe le passage d'un courant alors qu'on n'applique aucune tension au dispositif. C'est le principe de base d'une cellule photovoltaïque. [12]



**Figure I.10.** Principe de fonctionnement d'une cellule PV.

Ils existent de nombreux types de cellules qui se différencient par les matériaux utilisés pour les construire :

- a) **Cellule en silicium monocristallin** : Les cellules monocristallines sont les plus commercialisées offrant un bon rendement électrique compris entre 10% et 17%. [13]
- b) **Cellule en silicium Polycristallin** : Les cellules polycristallines ont un rendement électrique compris entre 11% et 15%. [13]
- c) **Cellule amorphe** : Les cellules au silicium amorphe sont des cellules à couche mince, elles sont fabriquées en déposant une fine couche de silicium sur un support, le verre par exemple. Ces cellules ont des rendements compris entre 5 à 7%. [14]



Monocrystalline

Polycristalline

Amorphe

**Figure I.11.** Types de cellules photovoltaïques.

### I.5.1.2 Batterie de stockage

Le stockage d'énergie dans les systèmes photovoltaïques s'effectue exclusivement à l'aide des batteries d'accumulateurs.

Dans un système photovoltaïque, la batterie remplit trois fonctions importantes :

- ✓ **Autonomie** : une batterie permet de répondre aux besoins de la charge en tout temps même la nuit ou par temps nuageux.
- ✓ **Courant de surcharge** : une batterie permet de fournir un courant de surcharge pendant quelques instants, c'est-à-dire un courant plus élevé que celui que peut fournir le champ PV.
- ✓ **Stabilisation de la tension** : une batterie permet de fournir une tension constante, en éliminant les écarts de tension du champ PV et en permettant aux appareils un fonctionnement à une tension optimisée.

#### I.5.1.2.1 Types d'accumulateurs

Plusieurs types d'accumulateurs sont en vente sur le marché :

- Les Accumulateurs au plomb acide
- Les Accumulateurs au Nickel – Cadmium
- Les Accumulateurs NiMH (Nickel-Métal-Hydrure)
- Les Accumulateurs Li-ion (Lithium-ion)

#### I.5.1.2.2 La durée de vie d'une batterie solaire

La durée de vie d'une batterie solaire s'évalue selon le nombre de cycles de charge/décharge qu'elle est capable de supporter. Car il s'agit d'une donnée basée sur un niveau de décharge et sur des conditions atmosphériques données. Elle dépend aussi de la technologie utilisée : plomb ouvert, AGM, GEL. On peut estimer les durées de vie suivantes pour les différents types de batteries à décharge lente. [15]

- ✓ Batterie solaire au plomb ouverte : 400 à 500 cycles
- ✓ Batterie solaire AGM (Absorbed Glass Mat) : 600 à 700 cycles
- ✓ Batterie solaire GEL : 800 à 900 cycles
- ✓ Batterie solaire GEL Long Life : 600 à 2400 cycles

### I.5.1.3 L'onduleur

Un onduleur est un appareil électronique permettant de générer un courant alternatif à partir d'un courant continu de l'énergie photovoltaïque issue d'un panneau solaire.

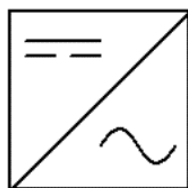


Figure I.12. Symbole électrique de l'onduleur.

#### I.5.1.3.1 Types d'onduleur

Il existe trois types d'onduleur à utiliser dans cette technologie :

- **Onduleur autonome** : conçu généralement pour les sites isolés (ou installations autonomes)
- **Onduleur connecté** : La connexion se fait via un onduleur qui convertit le courant continu en courant alternatif et assure également la synchronisation avec le réseau en tension et en fréquence.
- **Onduleur hybride** : Bien connu sous le nom 'onduleurs intelligents', c'est une nouvelle génération d'onduleur dédiée aux applications d'énergie renouvelable pour l'autoconsommation et en particulier pour les panneaux solaires photovoltaïques.

#### I.5.1.3.2 Système de configuration

Il existe trois configurations (architectures) : [16]

- **Onduleur central** : cette configuration assure la conversion DC/AC, et permet aussi de connecter une grande quantité de modules au réseau via un onduleur dit central. Les modules photovoltaïques connectés en série forment des chaînes (dites aussi string). Ces derniers sont connectés en parallèle, par l'intermédiaire de diodes afin d'atteindre une puissance élevée (figure II.13). [16]

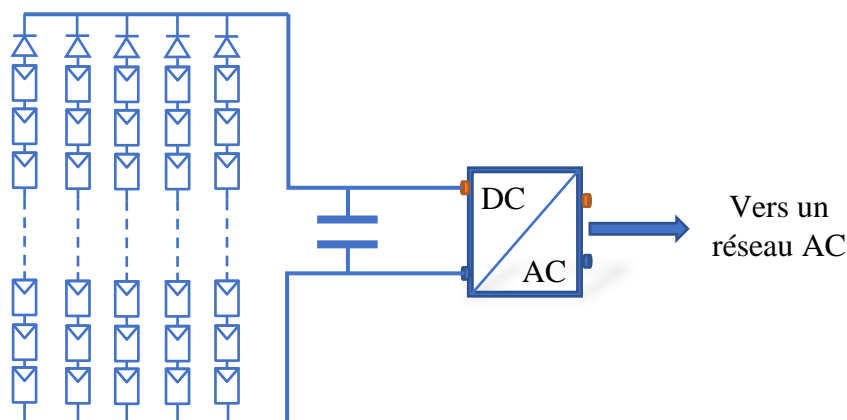


Figure I.13. Onduleur central.

- **Onduleur String** : cette configuration ne se diffère pas trop de la précédente. L'onduleur string est une sorte d'onduleur central minimiser, où le nombre de chaînes connectées à l'onduleur string est réduit en une seule chaîne. (Figure I.14) [16]

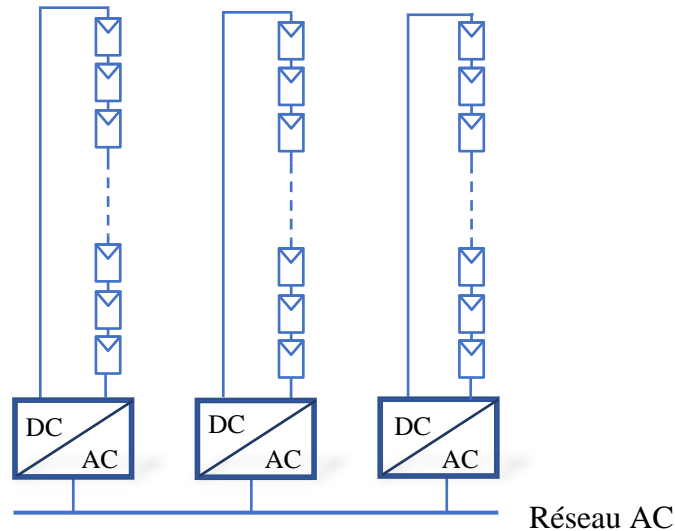


Figure I.14. Onduleur string.[16]

- **Onduleur multi-string** : l'onduleur multi-string est en quelque sorte une combinaison de deux configurations « centralisées et string ». Chacune des chaînes est équipée de son propre convertisseur DC-DC. Les différents courants sortant des chaînes sont d'abord synchronisés avant qu'ils soient transformés via l'onduleur en courant alternatif (Figure I.15). L'avantage de cette technique, est qu'elle nous permet de contrôler chacune des chaînes séparément.[16]

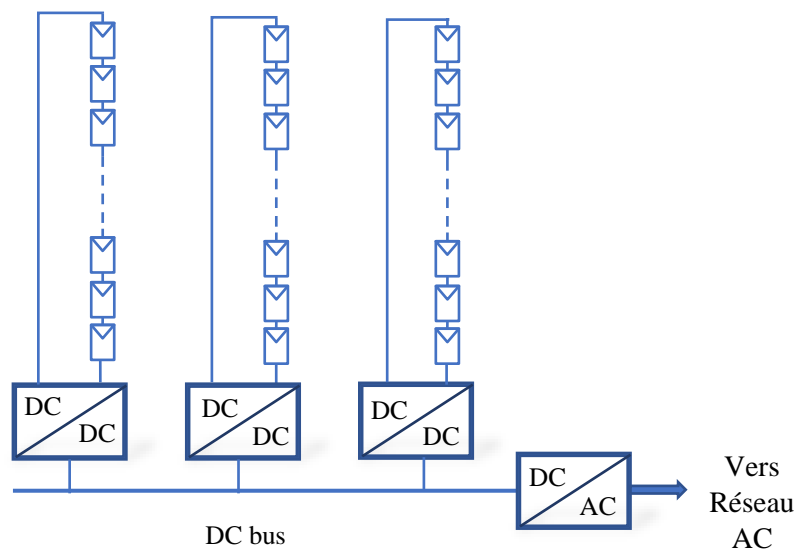


Figure I.15. Onduleur multi-string.

### **I.5.1.4 Régulateur de charge**

Le régulateur de charge est associé à un générateur photovoltaïque, il a pour rôle, entre autres, de contrôler la charge de la batterie, de limiter sa décharge et même stabiliser la tension dans le circuit de charge, sa fonction est primordiale car elle a un impact direct sur la durée de vie de la batterie.

#### **I.5.1.4.1 Types de régulateurs**

##### **A. Régulateurs PMW (Pulse Width Modulation)**

Ce type désigne les régulateurs de base, qui ont uniquement pour rôle d'adapter la tension des panneaux, ils sont donc idéals pour les petites installations (inférieures à 150W) du fait de leur faible coût, pour un chargeur/contrôleur PWM, la tension de sortie du générateur photovoltaïque sera presque égale à la tension des batteries, ainsi elle sera inférieure à la tension  $V_{mpp}$ , Par conséquent, l'énergie totale disponible ne sera pas utilisée pour charger les batteries. [17]

##### **B. Régulateurs de charge MPPT**

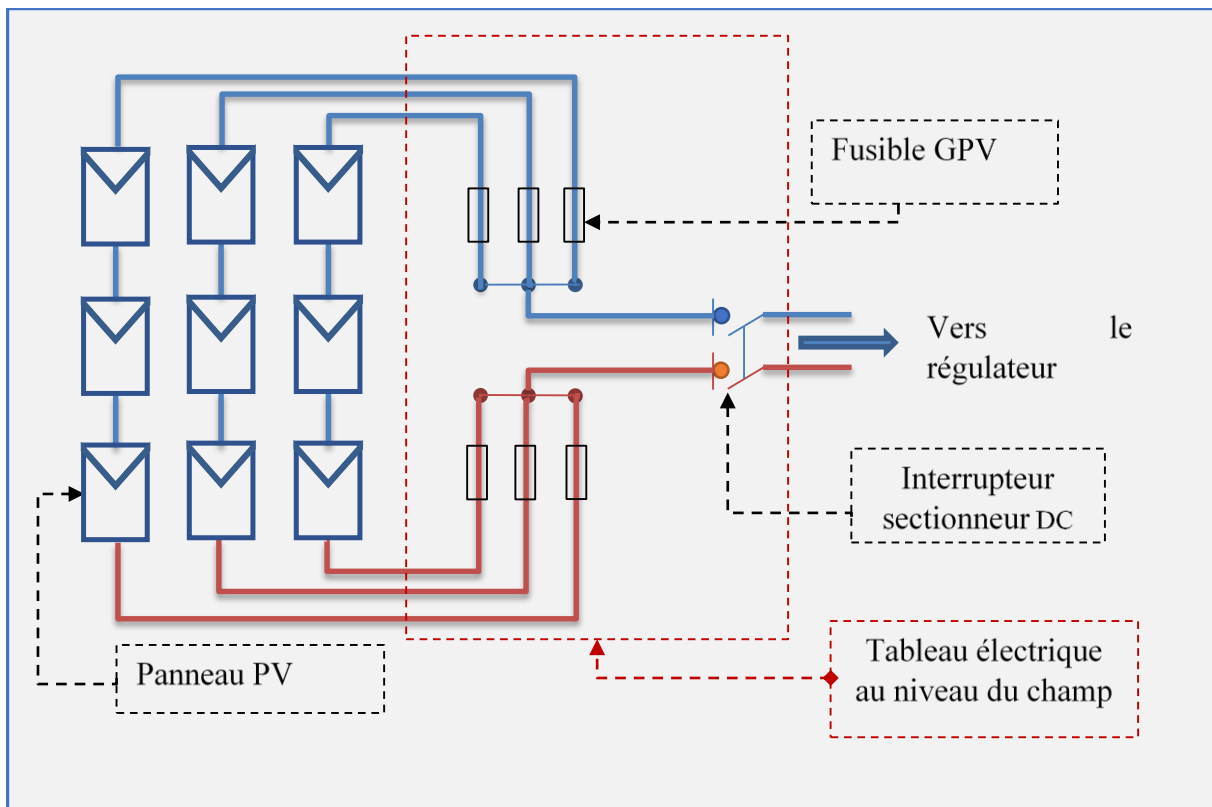
Grâce à leur microprocesseurs et algorithmes de charges plus perfectionnés sont les régulateurs les plus performant à l'heure actuelle, quand un chargeur/contrôleur MPPT est utilisé, la tension produite en sortie du panneau photovoltaïque sera obtenue en fonction de la  $P_{max}$  et sera régulée au travers du convertisseur DC/DC pour charger les batteries à la tension idéale. [18]

### **I.5.1.5 Protections électriques dans les systèmes photovoltaïques**

Comme tous les systèmes électriques, les systèmes photovoltaïques nécessitent une protection avec les différents appareillages contre les différents défauts électriques (court-circuit, surtension, surcharge...). L'appareillage électrique se situe entre la production et l'utilisation de l'énergie électrique, il assure le contrôle de l'énergie transportée par les canalisations. Concernant les systèmes photovoltaïques on doit insérer des protections au niveau :

##### **A. Protection au niveau du champ photovoltaïque**

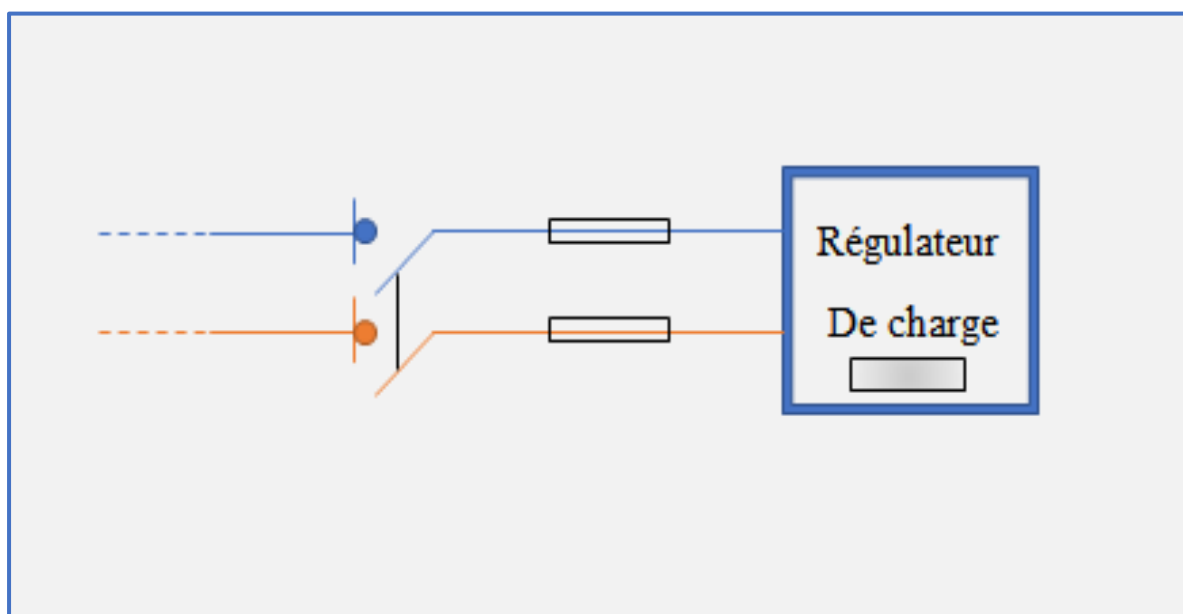
Dans le côté du champ, on insère des fusibles au niveau des deux polarités, négatif et positif. Pour veiller sur la protection du générateur PV, et un interrupteur-sectionneur pour pouvoir déconnecter le champ photovoltaïque pour effectuer des travaux (remplacement d'un panneau ou d'un fusible), l'ensemble d'appareillage de protection sera mis dans un tableau électrique, le schéma ci-dessous présente le circuit et les appareillages de protection au niveau du champ :



**Figure I.16.** Les circuits et appareillages de protection au niveau du champ.

### B. Protection au niveau du régulateur

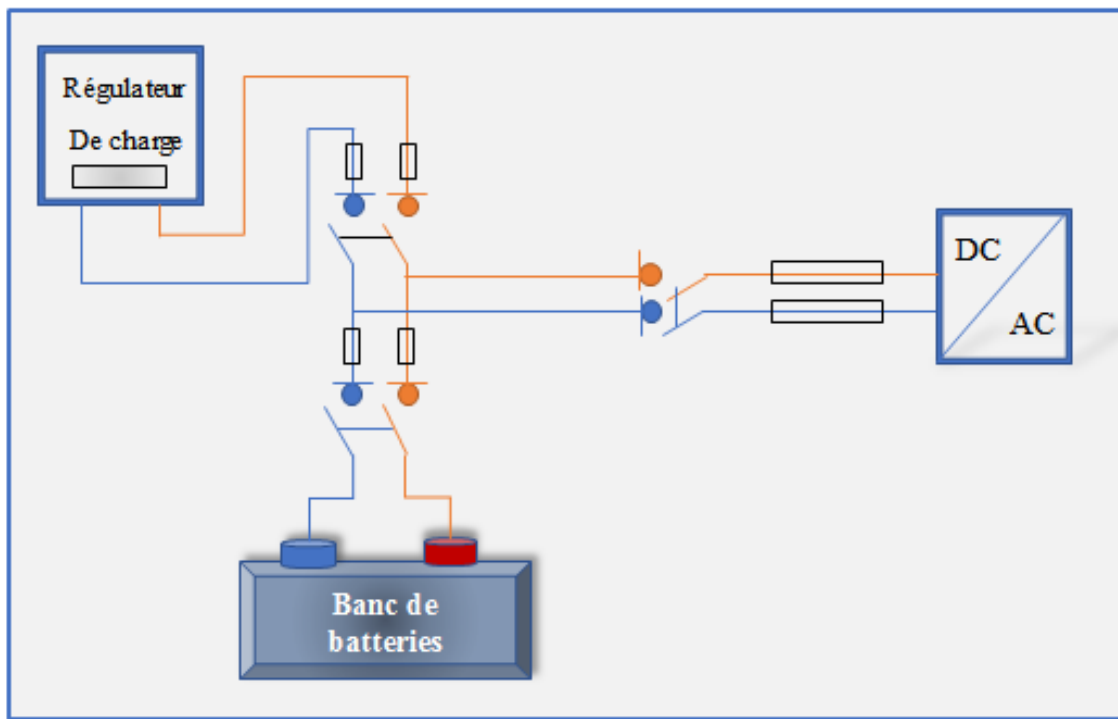
Avant d'arriver au régulateur, une protection avec des fusibles est exigée pour ne pas détériorer le régulateur, et un interrupteur-sectionneur est inséré afin d'effectuer des opérations d'entretien ou de changement sur ce dernier. Généralement, l'ensemble des fusibles et interrupteurs-sectionneurs sont mis dans un tableau au niveau d'un local technique dans la maison, le schéma du circuit est illustré dans la figure suivante :



**Figure I.17.** Protection au niveau du régulateur de charge.

### C. Protection Au niveau du système de stockage

Afin d'assurer des bonnes conditions de fonctionnement aux batteries, des protections sont envisageables en amont du système de stockage.



**Figure I.18.** Protection au niveau du système de stockage.

### I.5.2 Système solaire thermique (Photo-thermique)

Le capteur solaire thermique a pour rôle de convertir l'énergie lumineuse émise par les rayonnements solaires en énergie calorifique. Grâce à sa surface absorbante, le capteur recueille l'énergie calorifique et puis la transmet vers un fluide caloporteur (liquide ou gaz), l'énergie thermique produite peut ensuite être utilisée pour :

- Chauffage de l'air
- Chauffage de l'eau (ECS)
- Génération de l'électricité : CSP

Dans ce qui suit, une présentation détaillée de l'une des applications les plus rentables et les plus intéressantes de l'énergie solaire « chauffage de l'eau ».

#### I.5.2.1 Chauffe-eau solaire

Un chauffe-eau solaire est un dispositif de captation de l'énergie solaire destiné pour fournir partiellement ou totalement de l'eau chaude sanitaire (ECS). Il est composé de deux éléments principaux, les capteurs solaires et un ballon de stockage.[19]

##### I.5.2.1.1 Types de chauffe-eau solaire

On distingue deux types de chauffe-eau solaire, selon la nature de circulation du fluide :



### ➤ Le chauffe-eau solaire à “thermosiphon”

Pour ce système, la circulation de la chaleur entre les capteurs et le ballon est garantie par l'effet « thermosiphon », qui se base sur la dilatation-contraction et la poussée d'Archimède dans lequel la circulation de l'eau est assurée par les différences de température. Le ballon de stockage doit être placé au-dessus des capteurs et les circuits hydrauliques doivent être installés dans les règles de l'art afin de faciliter la thermo-circulation.[20]

On distingue deux types de chauffe-eau solaire à thermosiphon, monobloc et séparé : [21]

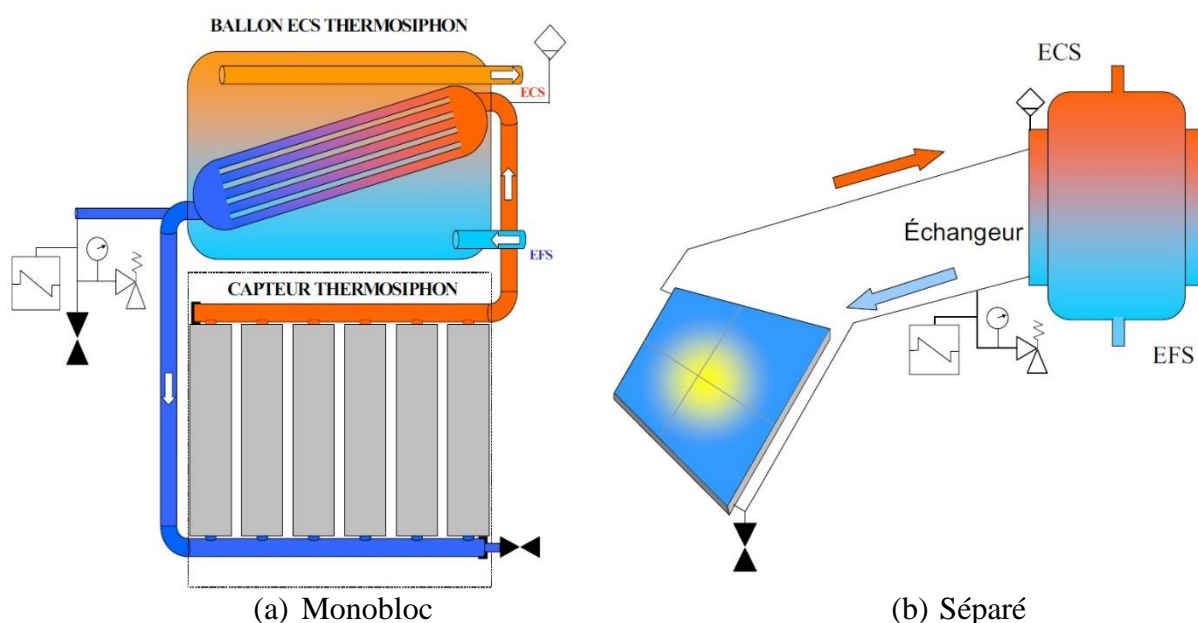


Figure I.19. Chauffe-eau solaire à thermosiphon.

Ce type de chauffe-eau solaire est très simple, les risques de pannes sont faibles et les coûts sont restreints et très performant.

### ➤ Chauffe-eau solaire à circulation forcée

Ce type de chauffe-eau solaire nécessite quelques équipements supplémentaires et exige souvent un entretien régulier de ses composants, ce qui le rend plus coûteux et plus compliqué. Pour ce système, le ballon peut être éloigné des capteurs, ce qui lui confère une grande flexibilité d'installation et facilite ainsi son intégration au bâtiment. Par ailleurs, ce système a besoin donc d'une pompe qui assure la circulation forcée de la chaleur entre les capteurs et le ballon de stockage, ainsi qu'un système de régulation.

La figure suivante montre les deux principaux types de chauffe-eau solaire à circulation forcée : [21]

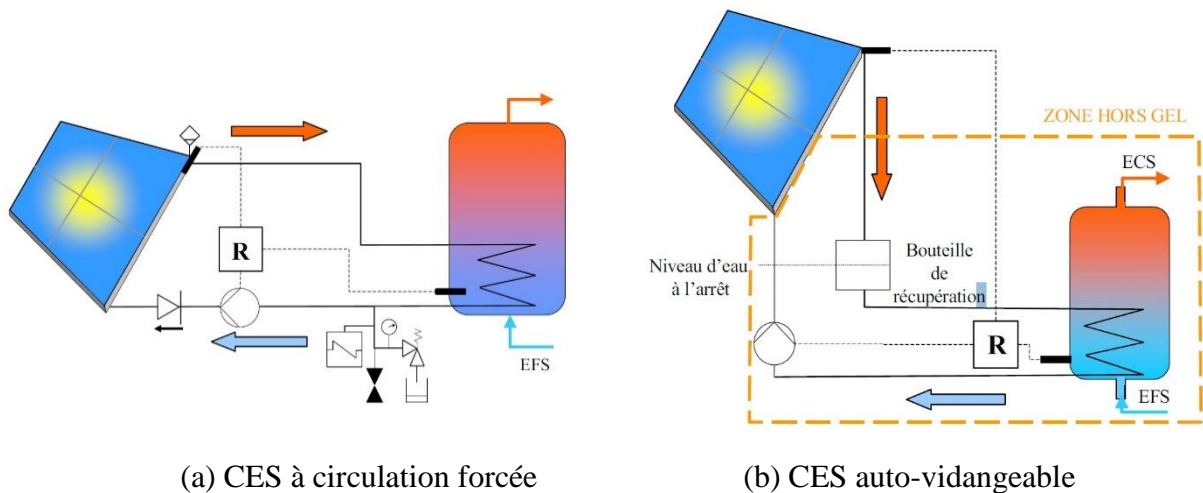


Figure I.20. Type de chauffe-eau solaire à circulation forcée.

### I.5.2.1.2 Composants du chauffe-eau solaire

Un chauffe-eau solaire est composé principalement de deux éléments indispensables, des capteurs solaires thermiques et d'un ballon de stockage

#### a) Ballon de stockage

Le ballon de stockage est un élément essentiel de l'installation du chauffe-eau solaire, il a pour rôle de stocker l'énergie thermique contenue dans l'eau afin de permettre de compenser la nature intermittente de l'énergie solaire et la non-simultanéité de la production et des besoins.

Ce type de réservoir est généralement fabriqué avec des matériaux résistant à la corrosion (acier inoxydable, matière synthétique, ...) d'une manière dont il peut résister aux températures élevées auxquelles il pourrait être soumis. Il doit impérativement être, isolé dans son entièreté, vertical et sa hauteur fais de 2 à 2,5 fois son diamètre. [22]

#### b) Capteur solaire thermique

Le capteur solaire est la pièce maitresse de l'installation du chauffe-eau solaire, destiné principalement à transformer le rayonnement solaire en énergie calorifique. La surface noire qui est chargée de l'absorption du rayonnement solaire est parcourue par un fluide caloporteur, ce dernier extrait l'énergie thermique recueillie et la transfère vers son lieu d'installation ou de stockage. On trouve trois technologies de capteurs solaires bien distinctes :[23]

- ✓ **Les capteurs plans sans vitrage** : ils sont composés simplement d'un absorbeur (métallique ou synthétique) revêtu d'une peinture sombre et sélective sur lequel les tubes porteurs du fluide caloporteur sont collés.

- ✓ **Les capteurs plans vitrés** : ils sont constitués d'une caisse isolée couverte par un vitrage, à l'intérieur se trouve l'absorbeur dans lequel circule le fluide caloporteur, leur température de fonctionnement se situe entre 30 et 60°C et donc ils conviennent pour la plupart des applications courantes (ECS, piscine, ...). Ils sont utilisés généralement dans les installations du chauffage de l'eau sanitaire. [24]
- ✓ **Les capteurs sous vide** : ils sont composés d'une série de tubes en verre transparents. Dans chaque tube il y a une plaque absorbante pour capter le rayonnement solaire et un échangeur pour favoriser le transfert de l'énergie thermique. Les tubes sont mis sous vide pour éviter les déperditions thermiques convectives de la plaque absorbante.[19]

## I.6 Conclusion

Après avoir donné quelques généralités de base sur la source d'énergie « soleil », nous avons présenté deux conversions majeures du rayonnement solaire, le photovoltaïque et le photo-thermique, ainsi que les différents composants d'une installation solaire photovoltaïque et thermique en définissant leurs rôles et principes de fonctionnement.

Dans la suite de ce travail, nous allons dimensionner les éléments de la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque (modules photovoltaïques, batteries, onduleur, câblerie) et ceux de l'installation thermique qui répondent aux besoins en électricité et en ECS à l'application choisie (maison autonome). Car le bon fonctionnement d'une installation quelconque requiert un bon dimensionnement de ses composants.



---

## Chapitre II

Etude et dimensionnement de  
l'installation solaire

---



## **II Etude et dimensionnement de l'installation solaire**

### **II.1 Introduction**

Une installation solaire (photovoltaïque/thermique) bien adaptée est une installation qui exige au préalable une méthode de dimensionnement et de calcul de haute précision. Le surdimensionnement des composants d'une installation solaire entrainera un gaspillage d'énergie et un surinvestissement. Alors que, le sous-dimensionnement causera un manque de confort en énergie pour les utilisateurs.

Dimensionner une installation PV revient à faire un ensemble de calculs bien définis qui nous permet au début de déterminer le nombre de modules du champ PV nécessaires pour couvrir le besoin en électricité, puis de déterminer la quantité et la capacité des éléments de l'installation photovoltaïque restants (batteries, onduleur ...). Pour cela, plusieurs méthodes de dimensionnement ont été développées : méthode du mois le plus défavorable, la méthode LPSP, ...

D'une manière générale, elles se basent sur les caractéristiques techniques des composants de l'installation d'un côté et sur la connaissance approfondie du gisement solaire du site à étudier d'autre coté. A cet égard, il est recommandé de collecter le maximum d'informations relatives au site étudié, notamment ses données climatiques qui sont nécessaires pour évaluer la quantité d'énergie (électricité et ECS) à satisfaire, il est aussi utile de rappeler que la bonne maîtrise des consommations permettra de réduire la taille de l'installation solaire et ainsi d'optimiser son coût.

Ce chapitre est réservé d'une part, au dimensionnement des différents composants d'un système photovoltaïque qui permettent de répondre au besoin en énergie électrique, et d'une autre au dimensionnement des différents équipements du système solaire thermique qui permettent à satisfaire les besoins en eau chaude sanitaire d'un habitat isolé.

### **II.2 Présentation du système étudié**

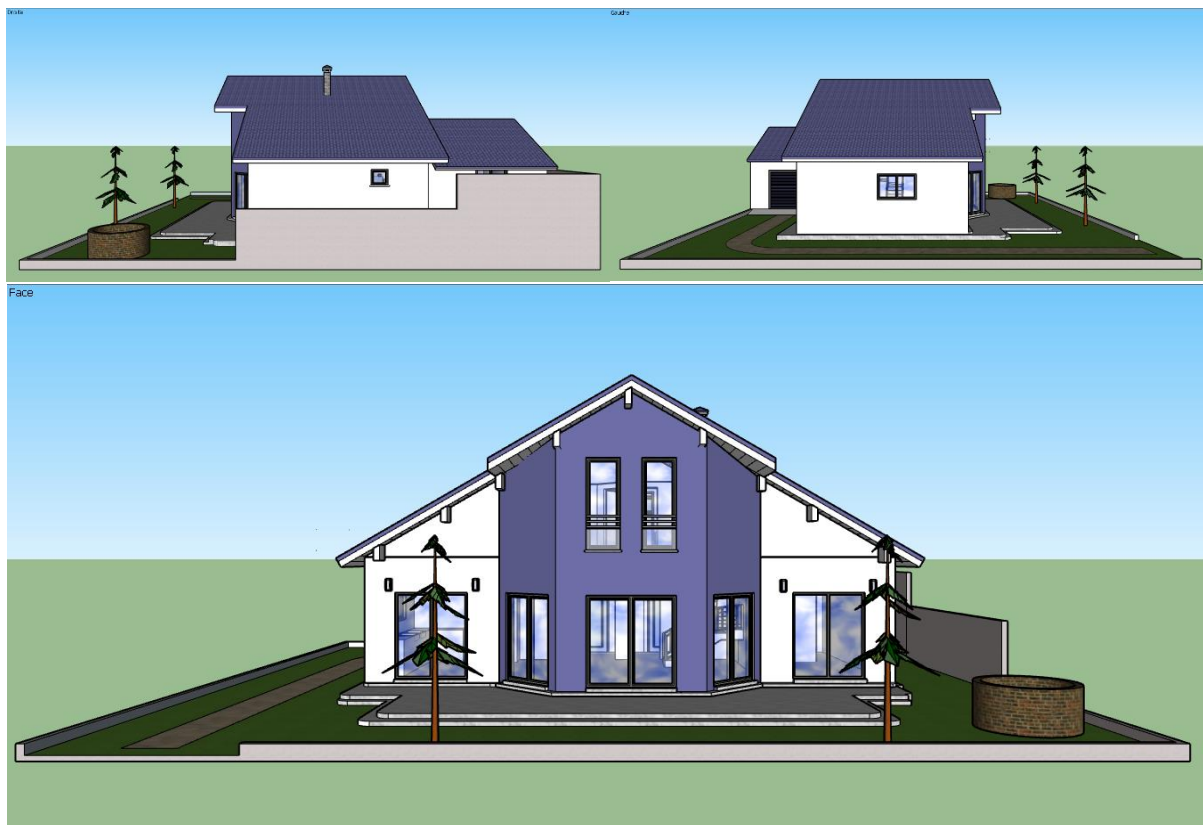
Le système étudié est un habitat solaire autonome qui comporte deux parties, la première partie est un système solaire thermique, et l'autre partie est un système solaire photovoltaïque. Où, cette dernière est dédiée d'une part à alimentation électrique de l'habitat, et d'autre part à l'alimentation du système de pompage d'eau.

#### **II.2.1 La maison d'implantation**

La maison d'implantation est située dans la région de Bejaia (Algérie), composée de quatre chambres (une au rez-de-chaussée, trois à l'étage), la hauteur des murs est de 3.2 m.

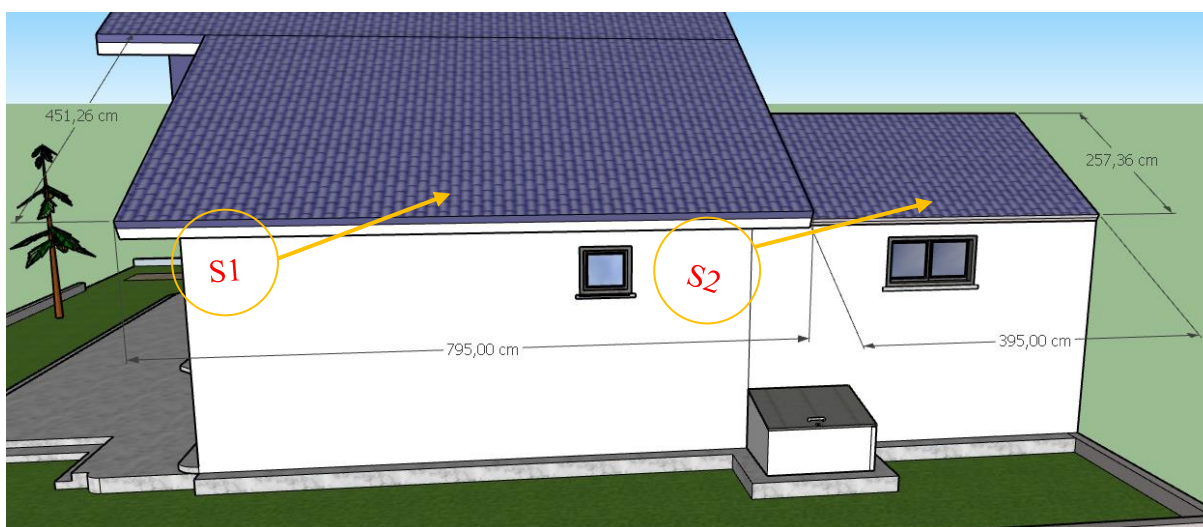
Si on se réfère aux points cardinaux, la toiture de l'habitat a deux parties, une orientée vers le nord et l'autre partie est orientée vers le sud, qui sera exploitée pour l'installation des panneaux, car la région de Bejaia (Algérie) est située dans l'hémisphère nord de la sphère

terrestre, la partie de la toiture réquisitionnée à l'installation des panneaux solaires a une surface totale de 46 m<sup>2</sup> et inclinée de 45°.



**Figure II.1.** Vue de face, gauche et droite de la maison sous 'SketchUp'.

La surface totale de la toiture en question est d'ordre de 46m<sup>2</sup>, composée de deux toitures de surfaces différentes : la première toiture à une surface égale à  $S_1=35,85$  m<sup>2</sup> (7,95m selon la longueur et 4,51m en largeur), la deuxième a une surface  $S_2=10,15$  m<sup>2</sup> (3,95m selon la longueur et 2,57m dans la largeur), la figure (II.2) illustre ses différentes parties.



**Figure II.2.** Plan de la toiture disponible.

## II.2.2 Gisement solaire

L'installation à étudier est située dans la région de Bejaïa : latitude :  $36,75^\circ$  N ; longitude :  $5,067^\circ$  E ; altitude : 153,40 m ; albédo : 0,2. La figure suivante illustre plus de détails sur la région du site étudié (Figure II.3).

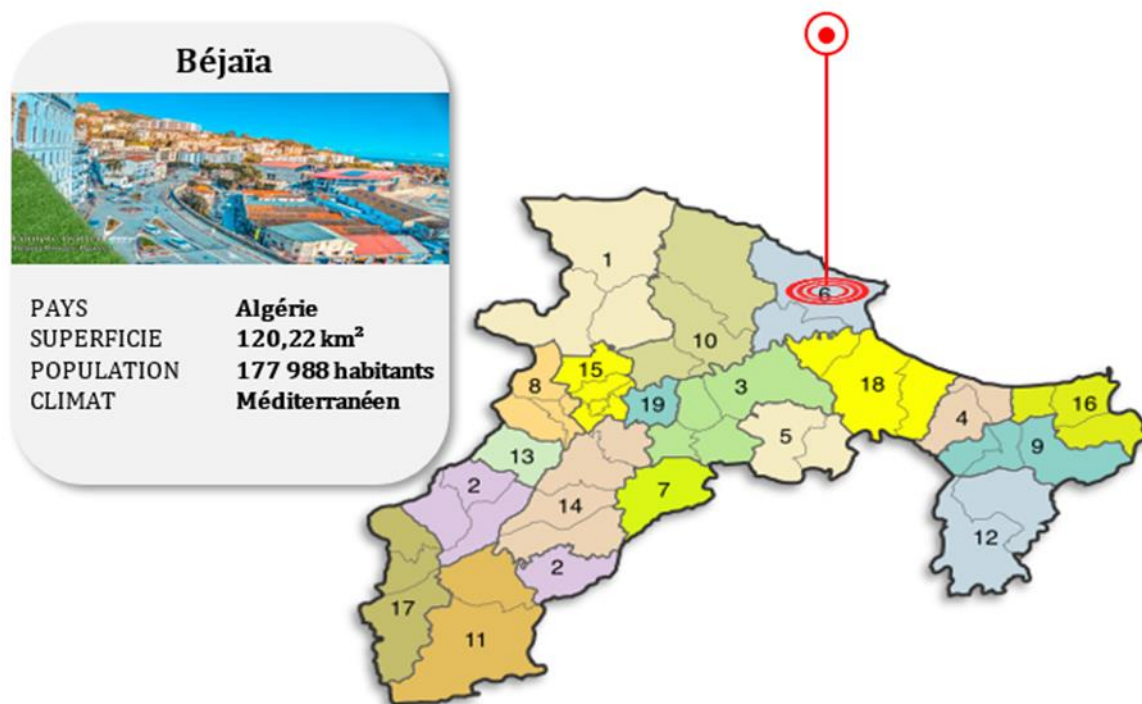
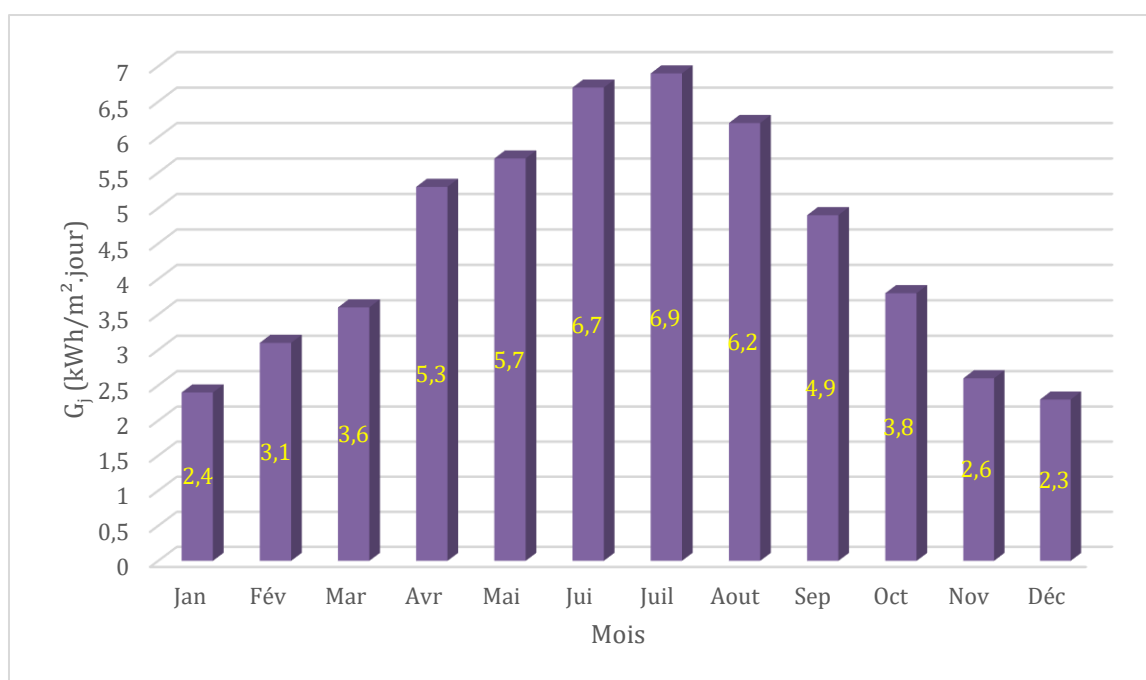


Figure II.3. Région de Béjaïa.

L'irradiation globale moyenne mensuelle journalière sur un plan horizontal de la région de Bejaïa, ainsi les températures moyennes mensuelles sont citées dans le tableau suivant (source : ONM : Office National de la météorologie) :

Tableau II.1. Irradiation globale moyenne mensuelle ainsi les températures moyennes mensuelles.

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sept	Oct	Nov	Déc
Température Min (°C) Journalière	5.5	5.9	7.1	8.8	12.3	16.1	18.9	19.8	17.6	14.2	9.8	7.2
Température Max (°C) Journalière	16.7	17.4	19.2	20.9	23.9	28.2	31.2	32.2	29.6	25.9	20.8	17.9
Ensoleillement Globale Cumulé $G_j$ (kWh/j.m <sup>2</sup> )	2.4	3.1	3.6	5.3	5.7	6.7	6.9	6.2	4.9	3.8	2.6	2.3



**Figure II.4.** Histogramme de l'irradiation globale moyenne mensuelle.

## II.3 Dimensionnement de l'installation solaire photovoltaïque

Cette partie a pour but de dimensionner les différents composants d'un système photovoltaïque qui permettent de répondre à tout moment au besoin en énergie électrique d'un habitat isolé.

### II.3.1 Evaluation du besoin journalier

L'évaluation du besoin journalier de la charge à alimenter est la première étape à suivre avant la réalisation de tout dimensionnement. C'est une étape fondamentale qui nécessite relativement beaucoup de réflexion car une erreur à ce stade va nous conduire à des résultats inattendus.

Pour ce faire, on doit commencer tout d'abord à définir la puissance électrique des appareils à alimenter ainsi leurs périodes d'utilisation, et puis on déterminera la consommation quotidienne totale de la charge (habitat, centrale, ...) qui ne devra pas être ni sous-estimée ni sur estimée.

Pour cela, on va procéder dans ce qui suit à l'évaluation de ce besoin en énergie électrique.

#### II.3.1.1 Système de pompage

##### II.3.1.1.1 Caractéristiques d'une pompe

###### ➤ Débit

On appelle débit (symbole de grandeur  $Q$ ) la quantité de fluide mise en mouvement en fonction de temps selon la relation suivante :

$$Q = \frac{V}{\tau_p} \text{ (m}^3\text{/s)} \quad (\text{II.1})$$

Le débit d'une pompe hydraulique dépend de deux facteurs importants :



- ✓ La cylindrée de la pompe (volume) ;
- ✓ La vitesse de rotation de la pompe ;

➤ **Hauteur manométrique**

La hauteur manométrique d'une pompe (HMT) est la différence de pression du liquide la franchissant.

Cette valeur est généralement donnée en mètres par la formule suivante :

$$h = \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} \quad (\text{II.2})$$

Où :  $\rho$  est la masse volumique du fluide et  $g$  l'accélération de la pesanteur

➤ **Evaluation des besoins en eau**

La détermination des besoins en eau pour la consommation d'une population donnée dépend essentiellement de son mode vie.

Les besoins en eau pour les zones rurales des pays pauvres sont de l'ordre de 20 litres par personnes et 30 litres par tête de bétail.

➤ **Energie hydraulique requise**

Une fois définis les besoins nécessaires en eau, on pourra calculer l'énergie hydraulique en tenant compte du débit et de la hauteur qui convient à la pompe.

La formule est donnée par :

$$P_{hyd} = \rho \cdot g \cdot h \cdot Q \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$\rho$ : Masse volumique d'eau (1000 kg/m<sup>3</sup>).

$g$  : Accélération de la pesanteur (10 m/s<sup>2</sup>).

$h$  : Hauteur manométrique totale (m).

$Q$  : Débit volumique (m<sup>3</sup>/s).

Les caractéristiques des différents composants du système de pompage sont données dans le tableau suivant :

**Tableau II.2.** Caractéristiques des différents composants du système de pompage.

Grandeurs	Valeurs
Volume V (m <sup>3</sup> )	77
Hauteur h (m)	11.5
Débit Q (m <sup>3</sup> /h)	22
Rendement de la pompe $\eta_p$	55 %
Rendement moteur $\eta_m$	85 %

Rendement de l'onduleur $\eta_{ond}$	95 %
--------------------------------------	------

### II.3.1.1.2 Dimensionnement du système de pompage

Les résultats du dimensionnement du système de pompage sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau II.3.** Résultats de dimensionnement du système de pompage.

Symboles	Equations	Résultats
Puissance hydraulique $P_h$	$P_{hyd} = \rho \cdot g \cdot h \cdot Q$	702 W
Puissance mécanique (requis par la pompe) $P_{mec}$	$P_{mec} = \frac{P_{hyd}}{\eta_p}$	1275 W
Puissance électrique de la machine $P_{ele}$	$P_{ele} = \frac{P_{mec}}{\eta_{IM}}$	1500 W
Puissance de l'entrée de l'onduleur $P_{dc}$	$P_{dc} = \frac{P_{ele}}{\eta_{ond}}$	1578 W
Temps de pompage $\tau_p$	$\tau_p = \frac{v}{Q}$	3,5 h/j
Energie électrique quotidienne requise $E_c$	$E_c = \tau_p \cdot P_{dc}$	5523 Wh/j

D'après le tableau (II.3), le système de pompage d'eau, requiert une énergie électrique journalière de l'ordre de 5523 Wh/j.

### II.3.1.2 Système d'électrification

Pour calculer le besoin journalier d'une installation, on calcule d'abord l'énergie électrique consommée en 24 heures par chaque équipement, ensuite on les additionne pour obtenir le besoin journalier. Ce dernier se calcule comme qui suit :

L'énergie électrique consommée par un appareil est calculée par la relation suivante :

$$E_c = P_{ch} \times \Delta t \quad (\text{II.5})$$

Avec :

$E_c$  : énergie consommée journalière par un type d'appareil exprimée en (Wh/j).

$P_{ch}$  : la puissance unitaire de l'appareil exprimée en (W).

$\Delta t$  : la durée de fonctionnement de l'appareil exprimée en (h).

Le besoin journalier est la somme des énergies consommées en 24 heures par tous les appareils, il est calculé par la relation suivante :

$$B_j = \sum_1^n E_c \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$B_j$ : consommation électrique journalière exprimée en (Wh/j).

$E_c$ : énergie consommée journalière par un type d'appareil exprimée en (Wh/j).

Le tableau suivant représente la consommation moyenne quotidienne en énergie électrique d'une famille de cinq personnes, ainsi que les résultats de calculs des énergies consommées et le besoin journalier total du système d'électrification :

**Tableau II.4.** Consommation moyenne journalière

Appareils	Nombre	Puissance Unitaire (W)	Durée (h/j)	Energie (Wh/j)
Lampe	8	3	3	72
PC Portable	1	89.65	3.5	313,775
PC Bureau	1	724.5	1.5	1 086,75
Modem wifi	1	6	6	32
Téléviseur	1	105	6	630
Réfrigérateur	1	100	24	2400
Machine à Laver	1	200	1	200
Chargeur Téléphone	2	5	0.5	5
<b>Besoin journalier total (Wh/j)</b>				<b>4 740</b>

D'après le tableau précédent, le système d'électrification nécessite 4740 (Wh/j) comme consommation quotidienne.

Le besoin journalier du système global, ainsi que celui d'électrification et du pompage sont regroupés à la fois dans le tableau ci-dessous :

**Tableau II.5.** Récapitulatif des résultats de l'évaluation du besoin journalier

Besoin journalier du Système de pompage (kWh/j)	Besoin journalier du Système d'électrification (kWh/j)	Besoin journalier du Système globale (kWh/j)
5.523	4.740	10.263

D'après le tableau précédent, le système globale (pompage + électrifications) consomme quotidiennement une énergie électrique estimée à environ 10.263 kWh/jour.

### II.3.2 Dimensionnement des principaux composants du système PV

Une installation photovoltaïque est composée principalement de quatre éléments indispensables : un générateur photovoltaïque, des batteries, onduleur et des câbles.

Une installation bien adaptée est une installation fiable et économique qui répond à tout moment au besoin en énergie électrique de l'habitat. Pour cela, on dimensionne tous les éléments de l'installation cités précédemment, où le choix de la méthode du dimensionnement s'avère très important.

### II.3.2.1 Choix de la méthode du dimensionnement

Il existe plusieurs méthodes du dimensionnement d'une installation photovoltaïque :

✓ **Méthode du mois le plus défavorable**

Elle repose sur l'estimation de l'énergie consommée durant un mois, cette période correspond au mois durant lequel la valeur de l'irradiation moyenne mensuelle est la plus faible de l'année.[25]

✓ **Méthode LPSP (Loss of Power Supply Probability)**

La méthode de la probabilité de non satisfaction de la charge 'LPSP' est définie comme étant la fraction de la demande non satisfaite sur celle demandée par la charge. Elle exprime le taux de non-satisfaction de la charge. Ainsi, cette probabilité est définie comme étant la somme de toutes les demandes non satisfaites 'LPS' sur l'énergie totale demandée par la charge pendant une période de fonctionnement. Cette méthode est destinée généralement au dimensionnement des systèmes d'énergies hybrides.[26]

**NB** : concernant cette application, on a opté pour la méthode du mois le plus défavorable, et le mois le plus défavorable à Béjaïa (Algérie) est le mois du décembre.

### II.3.2.2 Dimensionnement du générateur photovoltaïque

Il consiste à déterminer le nombre de modules photovoltaïques nécessaires à répondre au besoin journalier d'une structure énergétivore, tout en tenant compte des variations climatiques temporaires ainsi la surface disponible au montage des modules.

#### II.3.2.2.1 Dimensionnement selon la méthode du mois le plus défavorable

##### A. Estimation de l'énergie solaire reçue sur un site donné

La relation suivante représente la valeur de l'ensoleillement moyen mensuel du mois le plus défavorable :

$$E_s = N_e \times 1000 \quad (\text{II.8})$$

$N_e$  : représente le nombre d'heures équivalent d'ensoleillement ;

1000 : correspond au niveau d'éclairement à une température ambiante 25C, en  $W/m^2$  ;

L'énergie solaire disponible en mois de décembre dans la région de Bejaïa est estimée à environ 2,3 kWh/m<sup>2</sup> par jour.

##### B. Calcul de la taille du générateur photovoltaïque

Cette étape consiste à calculer le nombre de modules photovoltaïques nécessaires pour couvrir le besoin journalier en énergie électrique.

- L'énergie journalière du panneau est calculée par la relation :

$$E_{pv/j} = P_c \times N_e \quad (\text{II.9})$$

Avec :

$P_c$  : est la puissance crête du panneau à utiliser.

Les caractéristiques du module choisi pour cette installation sont présentées dans le tableau ci-dessous :

**Tableau II.6.** Caractéristiques du module photovoltaïque SUNTECH STPO80S-12/Bb

<b>SUNTECH STPO80S-12/Bb</b>	
<b>Type de cellules</b>	Monocristallines
<b>Puissance crête (<math>P_c</math>)</b>	80W <sub>c</sub>
<b>Tension au point de puissance maximal (<math>V_{mpp}</math>)</b>	17.5V
<b>Courant au point de puissance maximal (<math>I_{ppm}</math>)</b>	4.58A
<b>Tension de circuit ouvert (<math>V_{co}</math>)</b>	21.9V
<b>Courant de court-circuit (<math>I_{cc}</math>)</b>	4.95A
<b>Dimensions (<math>L \times l \times h</math>)</b>	1195 x 541 x 30 mm
<b>Température de fonctionnement</b>	-40°C > +85°C
$\alpha_{sc}$	3.00mA/°C
$\beta_{oc}$	-150.00mV/°C

En tenant compte des pertes dues aux conditions réelles d'implantation d'une installation photovoltaïque (estimées à 20%), l'énergie réelle se calcule :

$$E_{pv/réelle} = E_{pv/j} \times (1 - 0,2) \quad (\text{II.10})$$

- Le nombre de panneaux se calcul avec la relation (II.11) :

$$N_{pv} = Ent \left[ \frac{B_j}{P_{pv/réelle}} \right] \quad (\text{II.11})$$

- La puissance crête total du champ photovoltaïque se calcul avec la formule (II.12) :

$$P_{nouv} = P_c \times N_{pv} \quad (\text{II.12})$$

- Choix de la tension de fonctionnement du champ PV :

Pour déterminer la manière adéquate à connecter les panneaux photovoltaïques trouvés précédemment, on doit opter au choix de la tension de fonctionnement correspondante a la puissance crête du champ photovoltaïque, selon le tableau ci-dessous :

**Tableau II.7.** Tension du champ en fonction de sa puissance crête.

<b>Puissance crête du champ PV</b>	<b>Moins de 500Wc</b>	<b>De 501 à 2000Wc</b>	<b>De 2001 à 10000Wc</b>	<b>Plus de 10000Wc</b>
<b>Tension correspondante</b>	12V	24V	48V	96V

- Le nombre de panneaux photovoltaïques connectés en série se calcule selon la formule suivante :

$$N_{pv\_serie} = Ent \left[ \frac{V_{ch}}{V_{pv}} \right] \quad (II.13)$$

Avec :

$V_{ch}$  est la tension du champ photovoltaïque ;

$V_{pv}$  la tension délivrée par un panneau photovoltaïque.

- Nombre de panneaux connectés en parallèle :

$$N_{pv} = N_{pv\_serie} \times N_{pv\_para} \quad (II.14)$$

Donc :

$$N_{pv\_para} = \frac{N_{pv}}{N_{pv\_serie}} \quad (II.15)$$

Les résultats des calculs et dimensionnement sont illustrés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau II.8.** Résultats de dimensionnement du GPV.

$N_e$ (h/j)	$E_{pv/j}$ (Wh/j)	$E_{pv/réel}$ (Wh/j)	$N_{pv}$	$P_{pv} (W_c)$	$N_{pv\_serie}$	$N_{pv\_para}$	$N_{pv\_nouv}$	$P_{pv\_nouv}$ ( $W_c$ )
<b>2.3</b>	184	147.2	69	5520	4	18	72	<b>5760</b>

D'après les calculs effectués auparavant selon la méthode du mois le plus défavorable, le système étudié nécessite 69 modules photovoltaïques (SUNTECH STPO80-12/Bb) d'une surface totale de 45 (m<sup>2</sup>).

### II.3.2.2.2 Dimensionnement selon la surface

#### A. Système de montage

Le montage des modules est une étape essentielle pour la réalisation d'une installation photovoltaïque. Dans cette perspective, l'étude du système de montage vient juste après le dimensionnement et les calculs estimatifs. Généralement, elle doit tenir compte de l'inclinaison, l'orientation, la surface disponible et toutes autres contraintes et obstacles qui peuvent parvenir.

#### B. Surface disponible

La surface totale du panneau estimée est souvent différente de la surface disponible. Autrement dit, la surface à installer est parfois supérieure à la surface disponible. Pour répondre à ces exigences techniques des études et calculs seront effectués, ce qui nous permettra par la suite de proposer un montage adéquat aux dimensions du toit.

On peut citer deux configurations du montage des modules selon les dimensions du toit : montage dans le sens de la largeur, montage dans le sens de la longueur.

#### ✓ Montage dans le sens de la longueur

On peut estimer le nombre total de modules à partir des dimensions de la surface disponible (toit) et des modules. Le nombre maximal de modules par rangée nommé  $N_M$  :

$$N_M = Ent \left[ \frac{L_D}{L_M} \right] \quad (II.16)$$

Le nombre maximal de rangées noté  $N_R$  :

$$N_R = Ent \left[ \frac{l_D}{l_M} \right] \quad (\text{II.17})$$

Le nombre total de modules à installer sur le toit dans le sens de la longueur ( $N_L$ ) se calcul par la formule suivante :

$$N_L = N_M \times N_R \quad (\text{II.16})$$

✓ **Montage dans le sens de la largeur**

Le nombre total de modules à installer dans le sens de la largeur se calcul comme suit :

$$N_l = N_m \times N_r \quad (\text{II.19})$$

Tel que:

✓ Le nombre maximal de modules par rangées ( $N_m$ ) est donné par la formule suivante :

$$N_m = Ent \left[ \frac{L_D}{l_M} \right] \quad (\text{II.20})$$

✓ Le nombre maximal de rangées ( $N_r$ ) se calcule par l'équation suivante :

$$N_r = Ent \left[ \frac{l_D}{L_M} \right] \quad (\text{II.21})$$

Avec :  $L_D$  Et  $l_D$  sont respectivement la longueur et la largeur disponible ;

$L_M$  Et  $l_M$  sont respectivement la longueur et la largeur du module photovoltaïque.

Les dimensions de la toiture du système étudié et les modules photovoltaïques utilisés sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau II.9.** Dimensions de la toiture et le module photovoltaïque.

Type	Dimensions [L x l] (m)	Surface (m <sup>2</sup> )
<b>Module photovoltaïque</b>	1.195 x 0.541	0.646
<b>Toiture</b>	7,95 x 4,512	35,87

Les résultats de calculs sont présentés dans le tableau (II.10) :

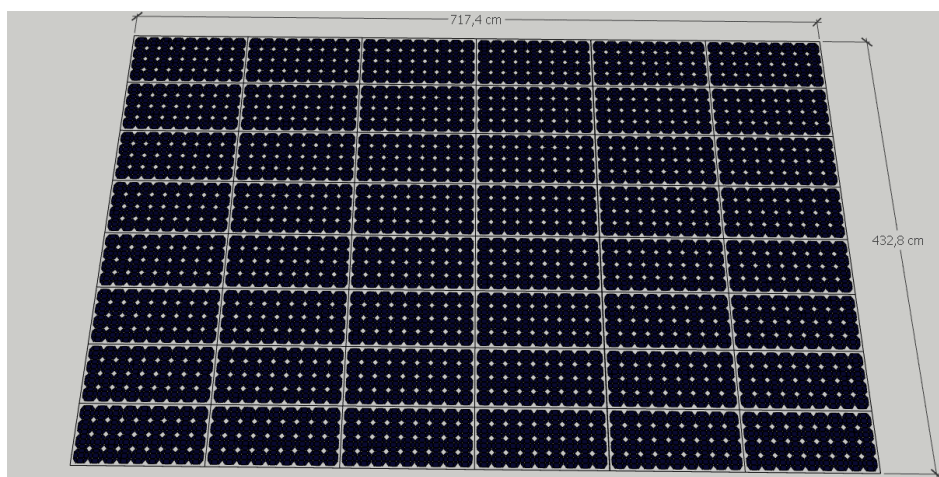
**Tableau II.10.** Résultats du dimensionnement selon la surface.

Le sens du montage	Equation	Résultat
<b>Selon la longueur</b>	$N_M = Ent \left[ \frac{L_D}{L_M} \right]$	6
	$N_R = Ent \left[ \frac{l_D}{l_M} \right]$	8
	$N_L = N_M \times N_R$	48
<b>Selon la largeur</b>	$N_m = Ent \left[ \frac{L_D}{l_M} \right]$	14
	$N_r = Ent \left[ \frac{l_D}{L_M} \right]$	3
	$N_l = N_m \times N_r$	42

Le nombre de 48 modules calculé auparavant peut être gardé, à condition que les modules soient montés dans le sens de la longueur. Dans notre cas, le montage des modules photovoltaïques dans le sens de la longueur doit y avoir :

- 08 rangées
- 06 modules dans chaque rangée

Le montage est présenté dans l'allure suivante :



**Figure II.5.** Montage des modules dans le sens de la longueur (6 x 8)

Le nombre 48 modules n'est pas suffisant à répondre au besoin journalier de l'habitat, pour cela on a pensé à alimenter le système de pompage exclusivement avec l'énergie produite par les modules PV et à stocker l'énergie équivalente à celle du système d'électrification dans des batteries de stockage 100Ah.

### II.3.2.3 Dimensionnement du système de stockage

Le dimensionnement des batteries, consiste à déterminer le nombre de batteries nécessaires à répondre au besoin journalier d'une application, tout en tenant compte des variations climatiques temporaires, que ce soit de quelques heures de mauvais temps ou même des jours. La capacité totale des batteries se calcul avec la formule suivante :

$$C_{batt\_tot} = \frac{B_j J_{aut}}{V_{batt} \cdot PDD \cdot \eta_b} \quad (II.22)$$

Avec :  $J_{aut}$  est le nombre de jours d'autonomies.

$V_{batt}$  : La tension de la batterie.

$\eta_b$  : Rendement de la batterie.

PDD : profondeur de décharge de la batterie.

Et le nombre de batteries :

$$N_{batt} = Ent \left[ \frac{C_{batt}}{C_{batt,u}} \right] \quad (II.23)$$



Nombre de batteries en série :

$$N_{batt,s} = \frac{\text{tension de fonctionnement}}{\text{tension de la batterie}} \quad (\text{II.24})$$

Nombre de batteries en parallèle :

$$N_{batt,p} = \frac{N_{batt}}{N_{batt,s}} \quad (\text{II.25})$$

Les batteries qu'on avait choisies ont les caractéristiques suivantes :

**Tableau II.11.** Caractéristiques de la batterie choisie.

Grandeurs	Valeurs
Capacité de la batterie $C_{batt}$	100 Ah
Tension de la batterie $V_{batt}$	12 V
Profondeur de la décharge PDD	0.6
Rendement de la batterie $\eta_b$	0.8

### II.3.2.3.1 Application numérique de la méthode de dimensionnement des batteries

Pour ce faire, trois étapes à suivre :

- ✓ Déduire le besoin journalier du système d'électrification.
- ✓ Calculer l'énergie (capacité) totale de stockage équivalente.
- ✓ Déduire le nombre de batteries correspondant à cette énergie.

Les résultats de calculs et dimensionnement du système de stockage sont réunis dans le tableau ci-dessous :

**Tableau II.12.** Résultats du dimensionnement du système de stockage.

Relation	Calculs	Résultats
$C_{batt,tot} = \frac{B_j \cdot J_{aut}}{V_{batt} \cdot PDD \cdot \eta_b}$	$C_{batt,tot} = \frac{4740 \times 2}{12 \times 0,6 \times 0,8}$	1 645,83 Ah
$N_{batt} = Ent \left[ \frac{C_{batt,tot}}{C_{batt,u}} \right]$	$N_{batt} = Ent \left[ \frac{1\ 645,83}{100} \right]$	16
$N_{batt,s} = \frac{\text{tension de fonctionnement}}{\text{tension de la batterie}}$	$N_{batt,s} = \frac{48}{12}$	4
$N_{batt,p} = \frac{N_{batt}}{N_{batt,s}}$	$N_{batt,p} = \frac{16}{4} = 4$	4
$N_{batt,nov} = N_{batt,p} \times N_{batt,s}$	$N_{batt,nov} = 4 \times 4$	16

D'après les calculs effectués, l'installation photovoltaïque étudiée exige 16 batteries au plomb (12 V, 100 Ah).

### II.3.2.4 Dimensionnement de l'onduleur

#### II.3.2.4.1 Les étapes de dimensionnement de l'onduleur

Notamment dans la partie alternative, l'onduleur a un rôle primordial dans une installation photovoltaïque, pour cela et afin de faire le bon choix avant d'acheter un onduleur, on doit respecter quelques critères.

Choix de l'onduleur repose sur trois critères importants à vérifier :

- ✓ Compatibilité en Tension ;
- ✓ Compatibilité en Courant ;
- ✓ Compatibilité en Puissance.

#### A. Compatibilité en tension

Deux paramètres à vérifier :

- ✓ Plage de tension MPPT
- ✓ Tension maximale admissible

##### • Plage de tension MPPT

L'onduleur est caractérisé par une plage de tension d'entrée MPPT, définie par le constructeur. Cette plage de tension MPPT limite le nombre de modules photovoltaïques en série. Donc, pour avoir une chaîne photovoltaïque qui délivre une tension comprise dans la plage de tension MPPT de l'onduleur, il suffit de contrôler le nombre de modules en série.[16] [27]

Le nombre minimum et le nombre maximum de modules en série se calculent selon les équations suivantes :

$$N_{pvs\_min} = Ent \left[ \frac{V_{mpp\_min}(ond)}{V_{mpp} \times 0,85} \right] \quad (II.26)$$

$$N_{pvs\_max} = Ent \left[ \frac{V_{mpp\_max}(ond)}{V_{mpp} \times 1,15} \right] \quad (II.27)$$

Avec :

$N_{pvs\_min}$  : est la valeur minimale de la tension pour laquelle le tracker (MPPT) fonctionne ;

$N_{pvs\_max}$  : est la valeur maximale de la tension pour laquelle le tracker (MPPT) fonctionne ;

$V_{mpp}$  : est la valeur de la tension de puissance maximale des modules photovoltaïque ;

Les coefficients 0.85 et 1.15 sont des coefficients de minoration permettant de calculer la tension MPP à 70 °C.

- **Tension maximale admissible**

L'onduleur est caractérisé par une tension d'entrée maximale admissible ( $V_{DC\_max}$ ), la tension délivrée par le groupe photovoltaïque ne devra jamais dépasser cette valeur. Par ailleurs, comme la tension des modules en série s'ajoute, la valeur de la tension maximale admissible va donc déterminer le nombre maximum de modules en série, cette dernière dépend de la tension délivrée par les modules photovoltaïques.[27]

Calcul de la tension délivrée par les modules ( $V_{max}$ ) :

$$V_{max} = 1,15 \times N_{pvs\_max} \times V_{co} \quad (II.28)$$

Où :  $V_{co}$  est la tension à circuit ouvert.

### B. Compatibilité en courant

L'onduleur est caractérisé aussi par un courant maximum admissible en entrée. C'est le courant d'entrée limite que l'onduleur peut supporter en côté continu. Autrement dit, le courant débité par le générateur ne doit pas dépasser la valeur du courant maximum admissible de l'onduleur. De plus, comme les courants s'ajoutent lorsque les chaînes sont en parallèle, on pourra facilement déterminer le nombre maximum de chaînes photovoltaïque en parallèle à partir du courant délivré par une chaîne photovoltaïque. [27]

Le nombre maximum de chaînes en parallèle se calcul selon l'équation suivante :

$$N_{ch} = Ent \left[ \frac{I_{max}}{I_{cc} \times 1,25} \right] \quad (II.29)$$

Avec :

$I_{max}$  : courant maximal admissible par l'onduleur ;

$I_{cc}$  : courant de court-circuit

### C. Compatibilité en puissance

L'onduleur est caractérisé également par une puissance maximale admissible en entrée, cette valeur limite la quantité de modules photovoltaïques reliés à l'onduleur. En effet, la puissance délivrée par le groupe photovoltaïque doit être inférieure à la puissance maximale admissible de l'onduleur.[27]

Par ailleurs, comme la puissance totale délivrée par le générateur photovoltaïque est la somme des puissances crêtes de tous les modules, on pourra déduire le nombre de panneaux maximum à partir de la puissance totale délivrée et la puissance maximale admissible de l'onduleur.

La puissance totale délivrée se calcule avec la formule suivante :

$$P_{tot\_c} = N_{pv\_tot} \times P_c \quad (II.30)$$

Tel que:

$$N_{pv\_tot} = N_{pvs\_max} \times N_{ch} \times N_T \quad (II.31)$$

$N_T$  : nombre de tracker ;

$P_c$  : puissance crête du panneau photovoltaïque.

#### II.3.2.4.2 Application numérique de la méthode du dimensionnement de l'onduleur

On dispose de 48 modules photovoltaïques d'une puissance crête de 80Wc chacun, donc la puissance crête totale est de 3840Wc.

La puissance de l'onduleur doit correspondre à la puissance totale des modules. Cette dernière est donnée dans les conditions standards STC, qui correspond rarement aux conditions réelles. C'est pour cela qu'on doit minorer la puissance de l'onduleur de 5 à 10% par rapport à la puissance totale des modules photovoltaïques. [28]

Les puissances de l'onduleur minimal et maximal se calculent respectivement comme suit :

$$P_{ond,min} = P_{pv,tot} \times 0,9 \quad (II.32)$$

$$P_{ond,max} = P_{pv,tot} \times 0,95 \quad (II.33)$$

Donc :

$$P_{ond,min} = 3840 \times 0,9 = 3456 \text{ W}$$

$$P_{ond,max} = 3840 \times 0,95 = 3648 \text{ W}$$

Ce premier calcul nous a permis de déterminer la puissance minimale et maximale de l'onduleur, pour une meilleure performance et adaptations on préconise d'utiliser un onduleur (SB 3600TL-RPC). (Voir le tableau II.13)

**Tableau II.13.** Les caractéristiques techniques de l'onduleur SMA SB 3600 TL-RPC.

	SB 3600 TL-RPC
<b>Entrée (DC)</b>	
Puissance DC max	3880 W
Tension DC max	750 V
Plage de tension photovoltaïque MPPT	175 V - 400 V
Courant d'entrée max	2 × 15 A
Nombre de MPP trackers	2
Nombre max d'entrée (shunt)	2 × 2
<b>Sortie (AC)</b>	
Puissance nominale AC	3680 W
Puissance AC max	3680 VA
Courant de sortie max	16 A

Dans ce qui suit, nous étudierons la compatibilité en, puissance, tension et courant de l'onduleur choisi.

Le tableau suivant regroupe les différents résultats obtenus :

**Tableau II.14.** Résultat de dimensionnement de l'onduleur SB 3600TL-RPC

Compatibilité en puissance			Compatibilité en tension			Compatibilité en courant
$P_{ond,min}$	$P_{ond,max}$	$P_{DC,max}$	Plage de tension MPPT		Tension maximale admissible	Nombre de chaînes
3.456 kW	3.648 kW	6.08 kW	$N_{pvs\_min}$	$N_{pvs\_max}$	$V_{max}$	$N_{ch}$
			11	19	478.51 V	2

Ce calcul nous a permis de voir que la compatibilité en puissance n'était pas vérifiée.

À cet égard, on doit corriger en ajustant le nombre de modules séries jusqu'à avoir une compatibilité en puissance, le tableau ci-dessous regroupe les résultats obtenus après la correction :

**Tableau II.15.** Résultat corrigé de dimensionnement de l'onduleur.

Compatibilité en puissance			Compatibilité en tension			Compatibilité en courant
$P_{ond,min}$	$P_{ond,max}$	$P_{DC,max}$	Plage de tension MPPT		Tension maximale admissible	Nombre de chaînes
3.456 kW	3.648 kW	3.84 kW	$N_{pvs\_min}$	$N_{pvs\_max}$	$V_{max}$	$N_{ch}$
			11	12	302.22 V	2

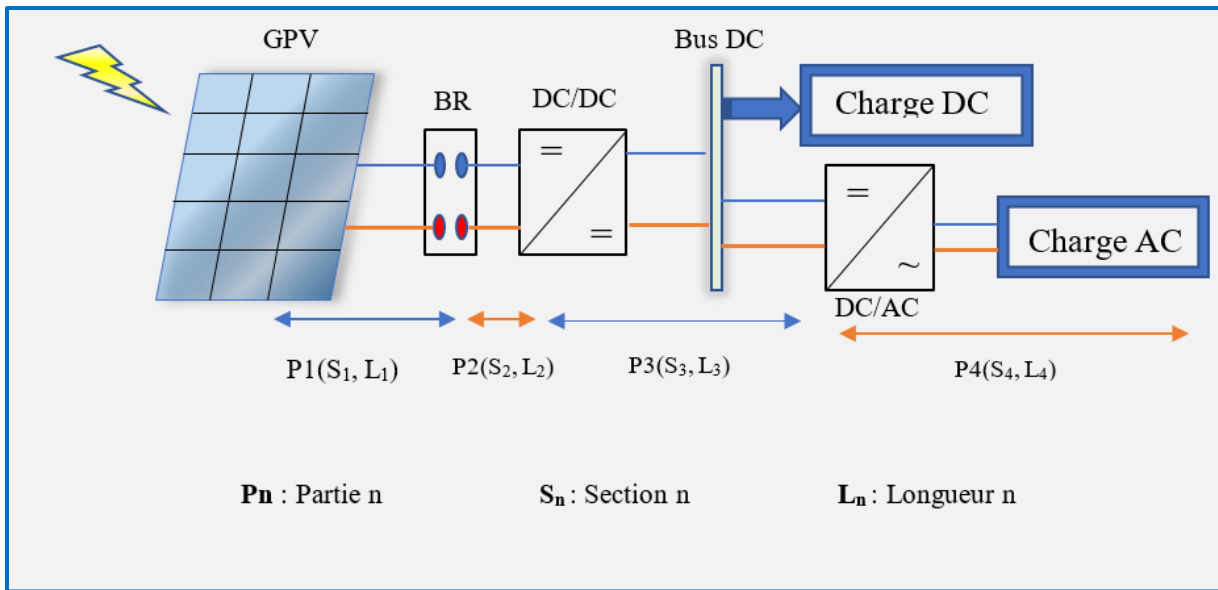
### II.3.2.5 Dimensionnement des câbles

Une installation photovoltaïque se compose généralement de deux parties :

- Partie courant continu
- Partie courant alternative

Pour assurer le transport de l'énergie électrique entre ces parties (modules jusqu'à la charge continue et/ou alternative), on ne peut pas utiliser n'importe quel câble électrique.

C'est sur la partie courant continu que les intensités sont plus importantes, donc dans cette partie que se pose le problème des chutes de tension et des pertes de joules dans les câbles. C'est pour cela qu'il est très important de dimensionner les câbles pour chaque partie de l'installation, la figure (II.6) illustre les différentes parties.



**Figure II.6.** Différentes parties de transport de l'énergie électrique.

**Partie 1 :** Dans cette partie on va dimensionner les câbles qui relient les panneaux photovoltaïques à la boîte de raccordement (BR).

Le cuivre est de loin le conducteur le plus utilisé, et sa résistivité oscille entre  $1.6 \times 10^{-9} \Omega \cdot m$  à  $0^\circ C$  et  $17 \times 10^{-9} \Omega \cdot m$  à  $25^\circ C$ . L'équation permettant de connaître la résistance est la suivante :

$$R = \rho \times L/S \quad (II.34)$$

Avec :

R : la résistance en ( $\Omega$ ).

$\rho$  : la résistivité en ( $\Omega \cdot m$ ).

L : la longueur du câble en (m).

S : la section du câble s en ( $mm^2$ ).

La section nommée (S1) dans cette partie se calcule comme suit :

$$S_1 = \frac{\rho \times L_1 \times I_1}{\varepsilon \times v} \quad (II.35)$$

$$\text{Tel que : } I_1 = 1,25 \times I_{cc} \quad ; \quad v = V_{mpp} \quad ; \quad \varepsilon \leq 0,02$$

Avec :

$I_{cc}$  : est le courant de court-circuit du panneau ;

$V_{mpp}$  : la tension au point de puissance maximale.

**Partie 2 :** section des câbles entre la boîte de raccordement et le régulateur (DC/DC)

$$S_2 = \frac{\rho \times L_2 \times I_2}{\varepsilon \times v} \quad (II.36)$$

$$\text{Tel que : } I_2 = N_{pv} \times I_{mpp} \quad ; \quad v = V_{mpp}$$

$N_{pv}$  : nombre de panneaux photovoltaïques ;

$I_{mpp}$  : courant au point de puissance maximale.

**Partie 3** : section des câbles entre le régulateur et l'onduleur

$$S_3 = \frac{\rho \times L_3 \times I_3}{\varepsilon \times v} \quad (\text{II.37})$$

Tel que :

$$I_3 = I_{batt} = \frac{1}{1-\alpha} \cdot I_2 \quad (\text{II.38})$$

$$1 - \alpha = \frac{V_{batt}}{V_{pv}} \quad (\text{II.39})$$

$$V_{bat} = V_{bat,u} \times V_{bat,s} \quad (\text{II.40})$$

Avec :

$I_{batt}$ ,  $V_{batt}$  : sont le courant et la tension de la batterie respectivement.

**Partie 4** : section des câbles côté alternatif (~)

La section est notée  $S_4$  elle se calcule par la formule suivante :

$$S_4 = \beta \cdot \rho \cdot I_B \cdot \frac{L_4 \cdot \cos \delta}{\varepsilon \cdot V} \quad (\text{II.41})$$

$\beta$  : est appelé facteur de forme, il dépend de type du réseau ( $\beta$  est égale a 1 si la ligne est triphasée et a 2 si la ligne monophasée) ;

$I_B$  : est nommé le courant admissible.

### II.3.2.5.1 Application numérique de la méthode du dimensionnement des câbles

**Tableau II.16.** Résultats du dimensionnement des câbles

<i>Section des câbles côté DC</i>		
<b>Partie 1</b> <i>Section des câbles entre un panneau et la boîte de raccordement (<math>L_1=5m</math>)</i>	$I_1 = 1.25 \times I_{cc} = 4.95 \times 1.25$ $S_1 = \frac{\rho \times L_1 \times I_1}{\Delta V \times V} = \frac{1.6 \times 10^{-2} \times 5 \times 6.2}{0.02 \times 17.5}$	$I_1 = 6.1875 A$ $S_1 = 1.414 mm^2$ Donc la section du câble choisi est 1.5 mm <sup>2</sup>
<b>Partie 2</b> <i>Section des câbles entre la boîte de raccordement et le régulateur DC/DC (<math>L_2=2m</math>)</i>	$I_2 = I_{mpp} \times N_{pv} = 4.58 \times 12$ $S_2 = \frac{\rho \times L_2 \times I_2}{\Delta V \times V}$	$I_2 = 58,2 A$ $S_2 = 5,32 mm^2$ Donc la section du câble choisi est 6 mm <sup>2</sup>
<b>Partie 3</b> <i>Section des câbles entre le DC/DC et les batteries et section des câbles entre les batteries et onduleur (<math>L_3=3m</math>)</i>	Calcul de la tension de la batterie	
	$V_{batt} = V_{batt,u} \times V_{batt,s} = 12 \times 1$	$V_{batt} = 12 V$
	Calcul de $1-\alpha$ $1 - \alpha = \frac{V_{batt}}{V_{pv}} = \frac{12}{17.5}$	$1 - \alpha = 0,68$

	$I_{batt} = \frac{I_2}{1 - \alpha} = \frac{58,2}{0,68}$	$I_{batt} = 85.58 A$
	$S_4 = \frac{\rho \times L_3 \times I_{batt}}{\Delta V \times V}$	$S_3 = 11.73 mm^2$ Donc la section du câble choisi est 16 mm <sup>2</sup>
<b>Section des câbles coté AC</b>		
<b>Partie 4</b> <b>Calcul du courant <math>I_B</math></b> <b>Calcul de la section <math>S_4</math></b> <b>(<math>L_4 = 10 m</math>)</b>	$I_B = \frac{P_{ch}}{3 \times V_n} = \frac{2743.15}{3 \times 230}$	$I_B = 3.976 A$
	$S_4 = \beta \cdot \rho \cdot I_B \cdot \frac{L_4 \cdot \cos \delta}{\varepsilon \cdot V} = 2 \times 0.0225 \times 3.976 \times \frac{15 \times 0.86}{0.02 \times 17.5}$	$S_4 = 2.19 mm^2$ Donc la section du câble choisi est 2.5 mm <sup>2</sup>

Selon les résultats précédents, chaque partie de raccordement du système étudié nécessite des câbles de section bien déterminer, ces câbles doivent être connectés comme suit :

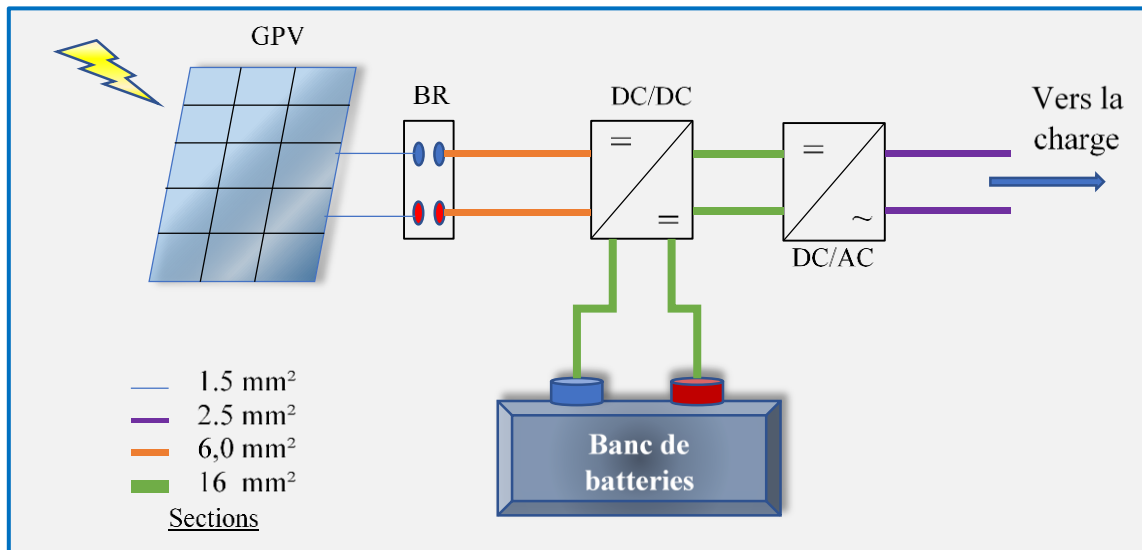


Figure II.7. Système de raccordement des composants de l'installation PV.

### II.3.3 Devis quantitatif

Après calculs et dimensionnement des différents éléments de l'installation photovoltaïque, le système à alimenter nécessite les composants suivants (voir tableau ci-dessous) :

Tableau II.17. Récapitulatifs de dimensionnement des différents composants de l'installation PV.

Désignation	Type	Caractéristiques	Nombre
Module photovoltaïque	SUNTECH STPO80S-12/Bb	80 W <sub>c</sub> 12 V	48
Système de stockage	Batteries au Plomb	100 Ah 12 V	12
Onduleur	SMA SB3600-TL RPC	N/A	1



Système de câblage	Câbles solaires	S = 1,5 mm <sup>2</sup> L = 5 m	2
		S = 16 mm <sup>2</sup> L = 3 m	2
		S = 2,5 mm <sup>2</sup> L = 10 m	2
		S = 6 mm <sup>2</sup> L = 2 m	2

### II.3.4 Schéma de l'installation photovoltaïque

A l'aide du logiciel 'SketchUp', nous avons réalisé le schéma 3D de l'installation solaire photovoltaïque.

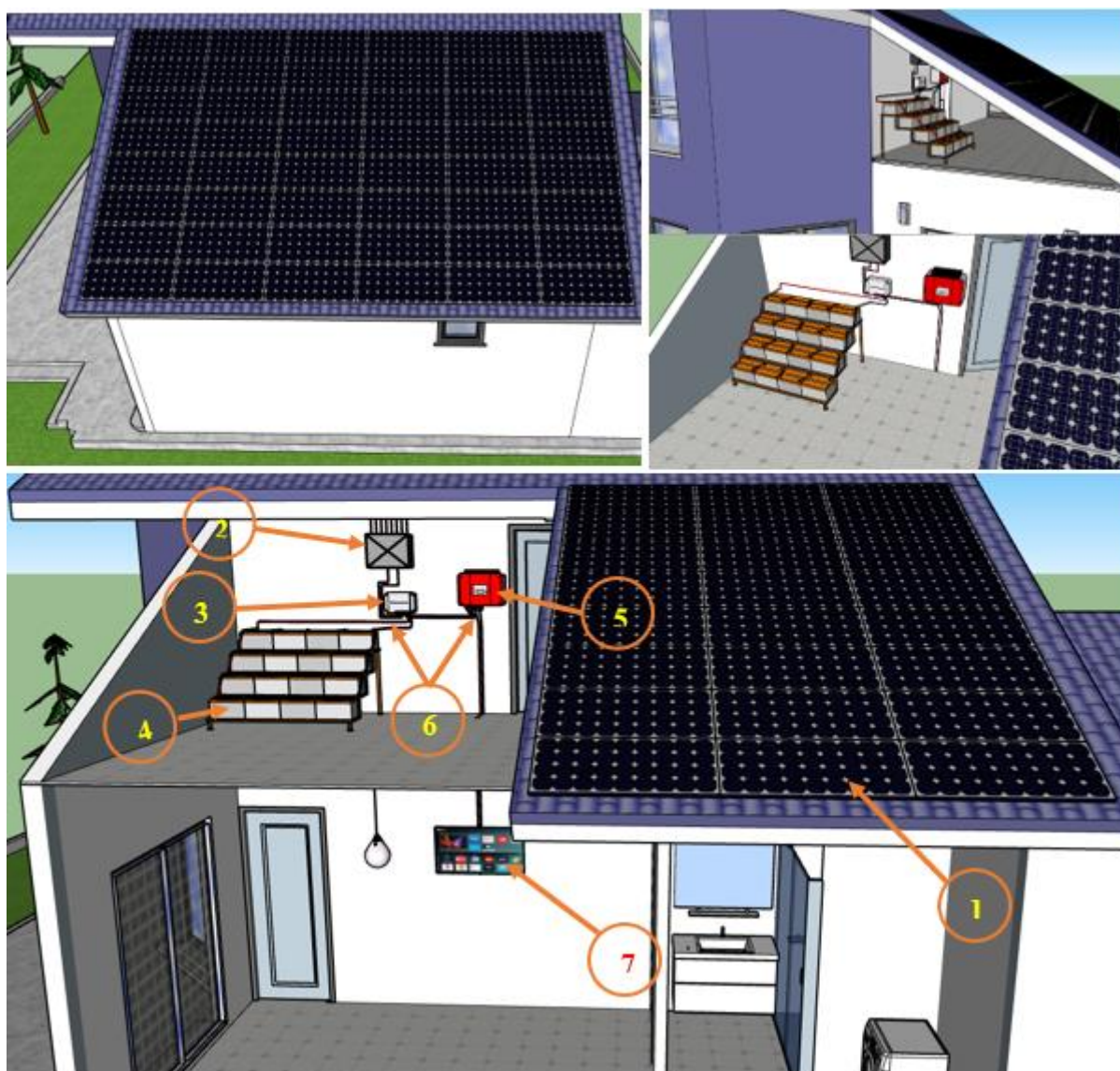


Figure II.8. Schéma de l'installation photovoltaïque sous 'SketchUp'.

Avec :

- (1) : Panneau photovoltaïque
- (2) : Boîte de jonction (raccordement)
- (3) : Régulateur de charge (DC/DC)
- (4) : Banc de batteries
- (5) : Onduleur (DC/AC)
- (6) : Des câbles
- (7) : la charge

## II.4 Dimensionnement de l'installation solaire thermique

Cette partie est réservée au dimensionnement des différents équipements du système solaire thermique qui permettent de répondre à tout moment aux besoins à satisfaire en eau chaude sanitaire d'un habitat isolé.

### II.4.1 Présentation du système étudié

Le système étudié est une installation solaire thermique dédiée à la production d'eau chaude sanitaire (ECS), ou bien ce qu'on appelle chauffe-eau solaire (CES). Composé généralement de 5 sous-ensembles caractérisant : le capteur, système de transfert, le stockage, l'appoint et la distribution.

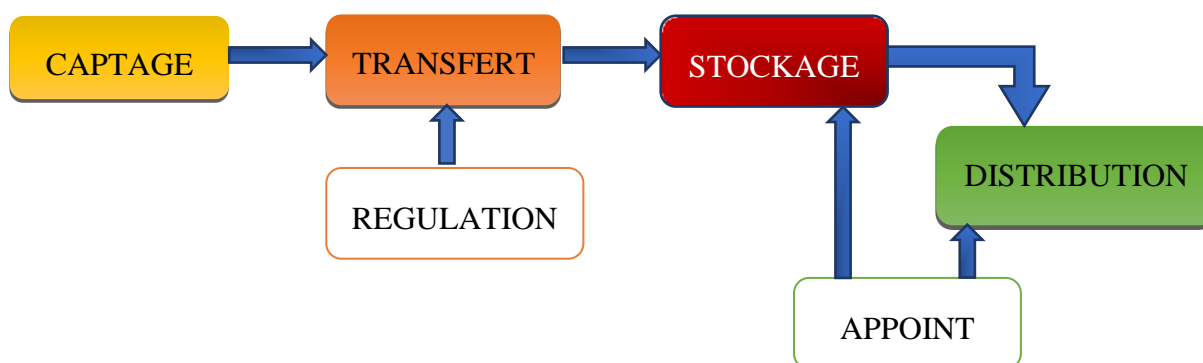


Figure II.9. Les principaux composants d'un chauffe-eau solaire.

### II.4.1.1 Présentation de l'installation

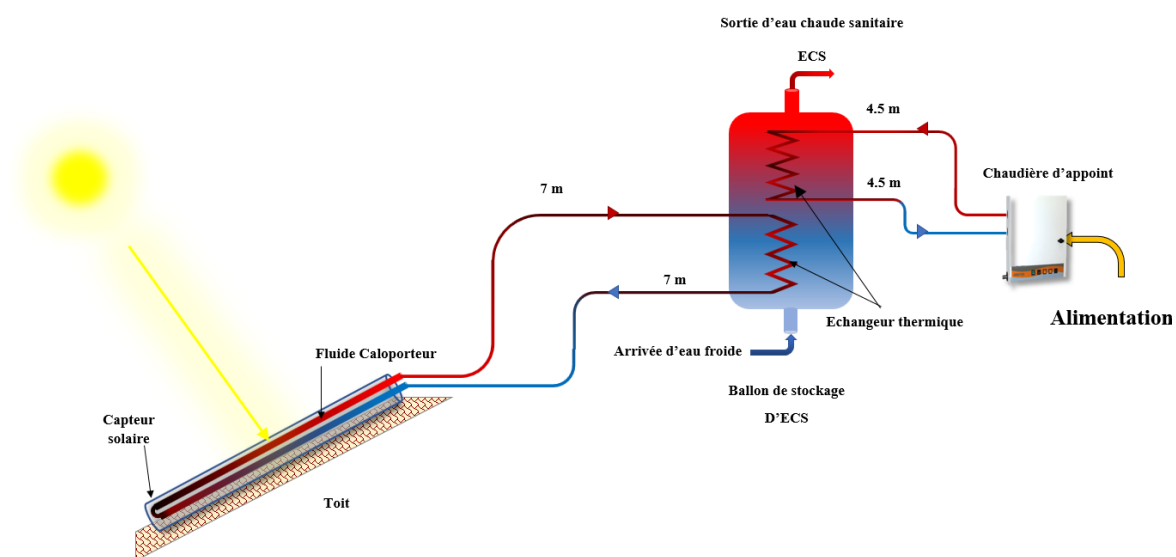


Figure II.10. Schéma d'installation du chauffe-eau solaire individuel (CESI).

### II.4.2 L'évaluation des besoins journaliers

La connaissance des besoins en eau chaude sanitaire est essentielle pour dimensionner correctement un chauffe-eau solaire. Pour cela, il est plus logique de commencer par l'évaluation des consommations journalières de l'ECS.

L'évaluation des consommations pour la production d'eau chaude sanitaire (ECS) peut se faire selon trois 03 méthodes : [28]

- **Méthode rapide par ratios** : est une méthode qui définit des consommations moyennes annuelles en ECS sous forme des ratios.
- **Méthode d'estimation** : qui consiste à exprimer les consommations annuelles à partir des besoins et des rendements des installations-types
- **Méthode détaillée** : contrairement aux autres méthodes, cette méthode ne dépend pas des variations climatiques saisonnières car elle s'applique mois par mois.

La maîtrise des consommations d'eau chaude permettra de réduire la taille de l'installation solaire et ainsi d'optimiser son coût.

Pour cela, il est préférable lors de dimensionnement d'utiliser les valeurs réelles de la consommation d'eau chaude sanitaire (ECS). Si elles ne sont pas accessibles, il est préconisé d'utiliser les ratios de consommations ci-après :

Tableau II.18. Ratios de consommation moyenne d'eau chaude à 60 °C

Désignation	Cons moyenne d'eau chaude par personnes (L/j)
Habitat	30
Equipement sportif	20
Maison de retraite	35

<b>Restauration</b>	5
<b>Cuisine de réchauffage</b>	2
<b>Hôtellerie</b>	L'estimation des besoins dans ce cas dépend de la fréquentation moyenne de l'hôtel : <ul style="list-style-type: none"> <li>• 35 L par nuitée et par personne.</li> </ul>

## II.4.3 Dimensionnement des composants de l'installation thermique

### II.4.3.1 Dimensionnement du ballon de stockage

En vue du dimensionnement, cette étape est pratiquement indépendante du reste de l'installation, car le ballon ne subit pas directement à l'énergie solaire apportée aux panneaux.

Pour déterminer le volume du ballon de stockage nécessaire au chauffage de l'eau à une température  $T_{ec}$  (nommée température de stockage), on doit commencer par le choix de cette température de consigne.

#### II.4.3.1.1 Choix de la température du stockage d'eau chaude, $T_{EC}$

Le dimensionnement d'un ballon de stockage de l'eau chaude se base principalement sur la température de consigne choisie au préalable (appelée dans la suite  $T_{ec}$ ). Le choix de cette température se fait en fonction de la température souhaitée au niveau des points de soutirage.[29]

Dans les cas courants d'utilisation d'eau chaude sanitaire, il est conseillé de choisir une température de stockage de 55 à 60°C.

Des températures supérieures à 60°C présentent les inconvénients suivants :[29]

- ✓ Forte augmentation de l'entartrage,
- ✓ Usure rapide de la robinetterie,
- ✓ Risque de brûlures,
- ✓ Augmentation des pertes par stockage.

#### II.4.3.1.2 Calcul du volume de ballon de stockage

Le volume minimal de stockage de l'eau chaude se calcule comme qui suit :

$$V_{ST,min} = \frac{2 \times V_P \times P \times (t_{EC} - t_{EF})}{(t_{ST} - t_{EF})} \quad (\text{II.42})$$

Avec :  $V_{ST,min}$  : volume minimal du ballon de stockage en litre

2 : coefficient de sécurité pour garantir la couverture des besoins

$V_P$  : consommation journalière par personne en litres

P : nombre de personnes

$t_{EC}$  : température souhaitée de l'eau chaude sanitaire en °C

$t_{EF}$  : température de l'eau froide en °C

$t_{ST}$  : température de stockage de l'eau dans le ballon.

### II.4.3.2 Dimensionnement du capteur solaire

La méthode de dimensionnement est assez simple, et elle suit les étapes suivantes :

#### A. Calcul de l'énergie calorifique journalière $E_j$ (en kWh/j)

Elle correspond à l'énergie calorifique journalière à apporter pour chauffer l'eau à une température donnée  $T_{ec}$  à partir des différentes températures d'eau froide.

Elle se calcule à partir de la formule suivante :

$$E_j = v \times C_p \times (t_{ST} - t_{EF}) \quad (\text{II.43})$$

Avec :

$V$  : volume du ballon de stockage

$C_p$  : capacité thermique de l'eau

$t_{ST}$  Et  $t_{EF}$  sont respectivement les températures de stockage et de l'eau froide

#### B. Calcul de la surface totale du panneau

La surface totale du panneau solaire nécessaire à notre installation, se définit comme étant le rapport entre l'énergie utile au chauffage de l'eau à la température souhaité (notée  $E_j$ ) et l'énergie effectivement apportée par le soleil.[30]

La formule est la suivante :

$$S_{tot} = \frac{E_j}{G_s} \quad (\text{II.44})$$

Avec :

$S_{tot}$  : surface totale de panneau en  $m^2$

$G_s$  : énergie apportée par le soleil en  $kWh/m^2$

#### C. Calcul de nombre de panneaux nécessaires ( $N_{p,th}$ )

Le nombre de panneaux thermiques se déduit facilement selon la relation suivante :

$$N_{p,th} = Ent \left[ \frac{S_{tot}}{S_u} \right] \quad (\text{II.45})$$

Tel que :

$S_u$  : surface unitaire du capteur solaire en  $m^2$ .

### II.4.3.3 Application numérique de la méthode de dimensionnement

- Les données nécessaires au dimensionnement sont citées dans le tableau ci-dessous

Tableau II.19. Quelques données nécessaires au dimensionnement.

Caractéristiques	Valeurs
Cons journaliers par personne (L / j)	30
Nombre de personnes	5
T eau chaude sanitaire $T_{EC}$ ( $^{\circ}C$ )	55

T stockage de l'eau dans le ballon $T_{ST}$ (°C)	60
T de l'eau la plus froide de l'année $T_{EF}$ (°C)	7
Capacité thermique de l'eau (Wh/kg.K°)	1.163

- **Caractéristiques principales du panneau choisi**



**Figure II.11.** Panneau solaire thermique verticale.

Les caractéristiques techniques du capteur solaire sont représentés ci-dessous :

**Tableau II.20.** Caractéristiques techniques du capteur solaire thermique

Caractéristiques	Unité	Panneau PM
Dimensions	mm	1927x927x90
Poids	Kg	34
Volume de fluide	L	1
Débit nominal	L/h	100
Nombre de capillaires		8
Matériau de l'absorbeur		Almecco-Tinox
a1	W/(m <sup>2</sup> .K)	3,722
a2	W/(m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> )	0,012

### A. Calcul du volume de ballon de stockage

Ce dimensionnement a pour objectif de déterminer le volume du ballon le plus adapté aux consommations de l'habitat.

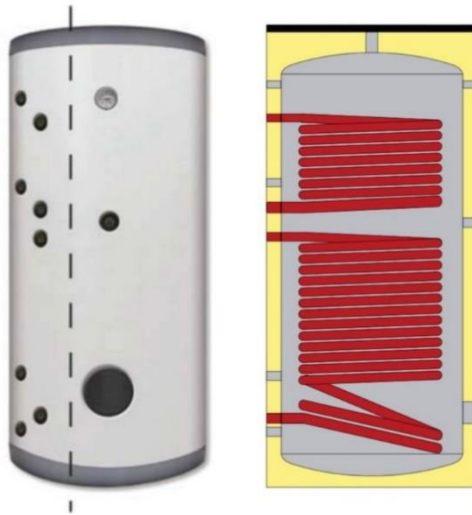
Nous allons donc définir le volume de ballon de stockage pour une maison isolée abritant 5 personnes :

**Tableau II.21.** Résultat d'évaluation du volume de ballon de stockage.

Calcul du volume de ballon de stockage $V_{ST,min}$		
Formule	Calcul	Résultat
$V_{ST,min} = \frac{2 \times V_P \times P \times (t_{EC} - t_{EF})}{(t_{ST} - t_{EF})}$	$V_{ST,min} = \frac{2 \times 30 \times 5 \times (55 - 7)}{(60 - 7)}$	271.7 L

Ce premier calcul nous a permis de constater que le volume de ballon doit être au minimum de 272 Litres pour une famille de 5 personnes afin de pouvoir stocker suffisamment de l'eau chaude pour la journée la plus froide de l'année dans la région de Béjaïa.

Tous les volumes de ballon ne sont pas accessibles au niveau du commerce, mais on peut recommander un ballon standard de 300L à double échangeur. (**Figure II.12**).



**Figure II.12.** Ballon de stockage d'ECS à double échangeur du type 'Regulus' R2DC 300.

### B. Dimensionnement du capteur solaire thermique

Ce dimensionnement a pour but de déterminer l'installation adéquate pour produire de l'eau chaude sanitaire à moindre coût à l'aide des panneaux solaires thermiques.

Les différentes étapes du dimensionnement du panneau solaire thermique sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

**Tableau II.22.** Tableau regroupant les étapes du dimensionnement du panneau solaire thermique.

Calcul de l'énergie calorifique journalière $E_j$		
Formule	Calcul	Résultat
$E_j = v \times C_p \times (t_{ST} - t_{EF})$	$E_j = 300 \times 1.163 \times (60 - 7)$	18.4917 kWh/j
Calcul de la surface totale de captage $S_{tot}$		
$S_{tot} = \frac{E_j}{G_s}$	$S_{tot} = \frac{18.49}{2.3}$	8.04 m <sup>2</sup>
Calcul de nombre de panneaux nécessaire $N_{p,th}$		
$N_{P,th} = Ent \left[ \frac{S_{tot}}{S_u} \right]$	$N_{P,th} = Ent \left[ \frac{8.04}{1.786} \right] = 4.4$	4

Cette série de calculs nous a permis au début d'évaluer l'énergie calorifique nécessaire pour chauffer l'eau à 60°C à partir de la température la plus défavorable de l'année. Et puis déterminer en deuxième calcul la surface totale de captage requise pour produire cette énergie calorifique (Ej), et enfin déduire nombre de capteurs thermiques adéquats.

### C. La tuyauterie

Selon le schéma présenté en figure (II.10) on a :

**Tableau II.23.** Résultats du dimensionnement de la tuyauterie.

Emplacement	Longueur (m)	Nombre
Entre la chaudière d'appoint et le ballon de stockage	4,5	2
Entre le capteur solaire thermique et le ballon de stockage	7	2
<b>La longueur totale</b>		<b>23 Mètres</b>

### D. Système de montage

Ce calcul a pour but de déterminer la combinaison de montage des capteurs la plus adaptée aux dimensions du toit.

**Tableau II.24.** Résultats des calculs reliés au système de montage.

Selon la longueur			Selon la largeur		
$N_M = Ent \left[ \frac{L_D}{L_M} \right]$	$N_R = Ent \left[ \frac{l_D}{l_M} \right]$	$N_L = N_M \times N_R$	$N_m = Ent \left[ \frac{L_D}{l_M} \right]$	$N_r = Ent \left[ \frac{l_D}{L_M} \right]$	$N_l = N_m \times N_r$
$N_M = \frac{3.95}{1.927} = 2.04$	$N_R = \frac{2.57}{0.927} = 2.77$	$N_L = 2 \times 2$	$N_m = \frac{3.95}{0.927} = 4.26$	$N_r = \frac{2.57}{1.927} = 1.33$	$N_l = 4 \times 1$
<b>2</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>4</b>

La combinaison (4 × 1) peut-être gardée à condition que les capteurs soient montés dans le sens de la largeur, à savoir, une branche contenant quatre capteurs.

#### II.4.4 Schéma de l'installation solaire thermique

A l'aide du logiciel 'SketchUp', nous avons réalisé le schéma de l'installation du chauffe-eau solaire thermique.



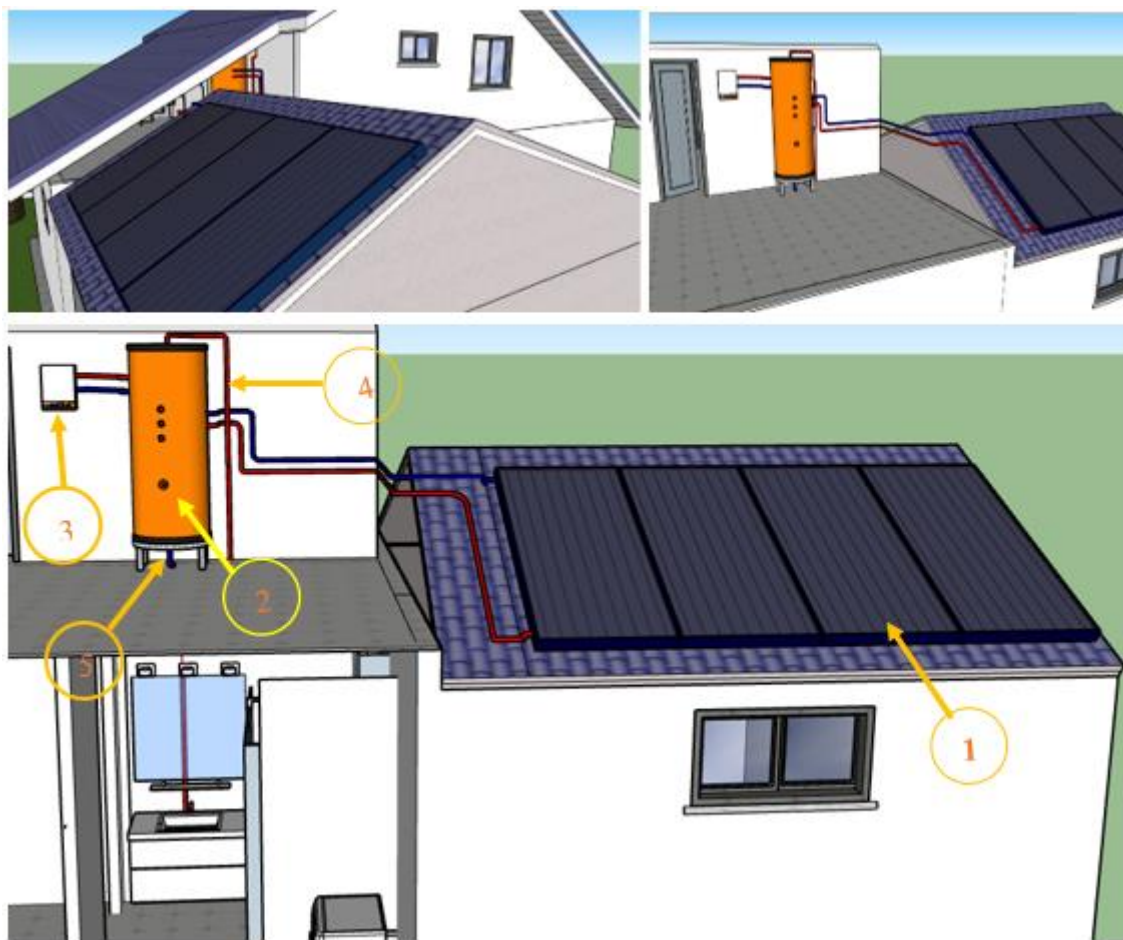


Figure II.13. Schéma de l'installation solaire thermique sous 'SketchUp'.

Avec :

- (1) Capteur solaire thermique
- (2) Ballon de stockage d'ECS
- (3) Chaudière d'appoint
- (4) Sortie d'eau chaude
- (5) Arrivée d'eau froide

#### II.4.5 Devis quantitatif

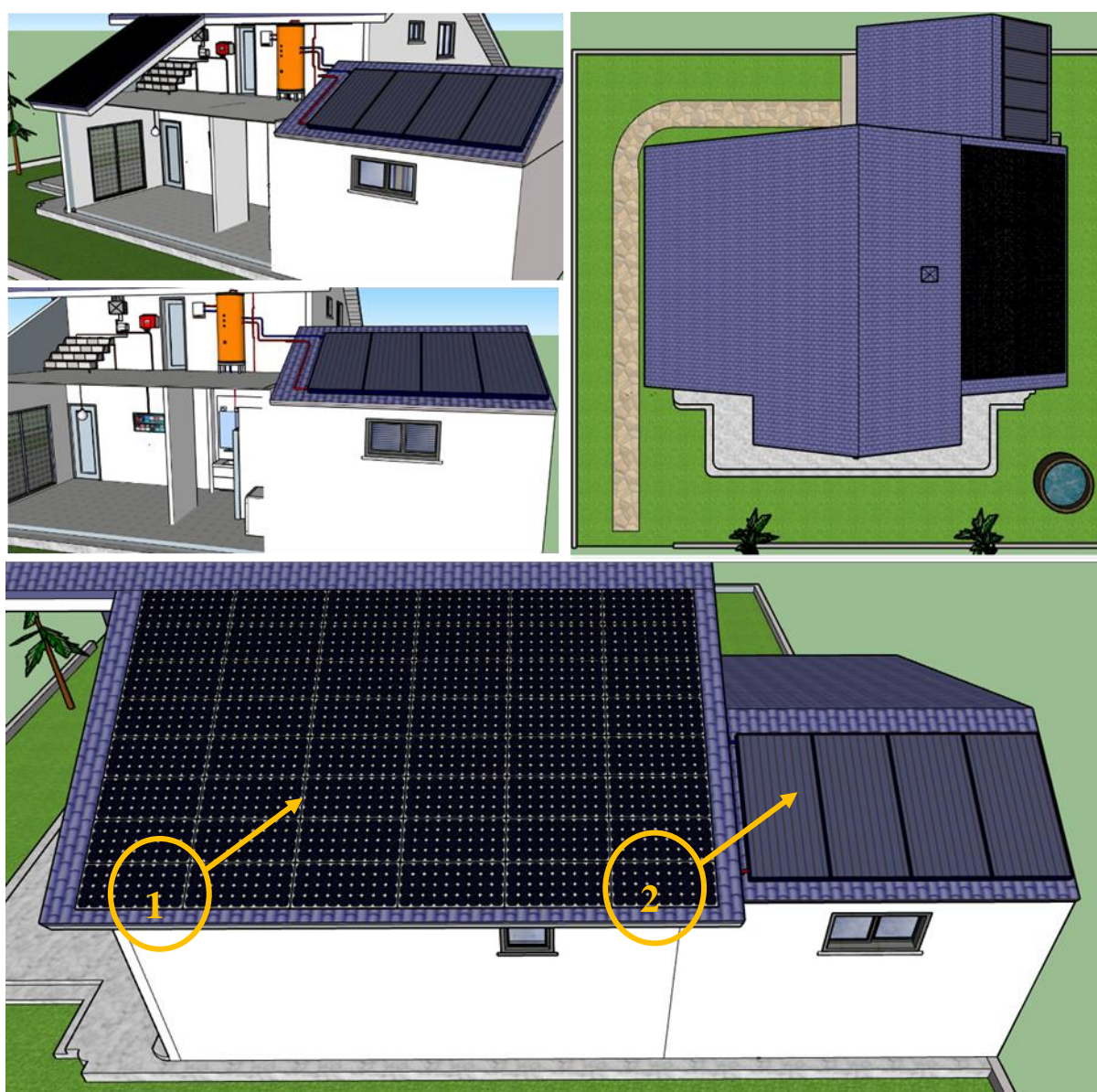
Le devis quantitatif est présenté dans le tableau suivant :

Tableau II.25. Devis quantitatif des composants du chauffe-eau solaire.

Désignation	Nombre
Panneaux solaires thermiques	4
Ballon de stockage	1
Tuyauteries	23 Mètres

#### II.5 Schéma globale de l'installation (photovoltaïque-thermique)

Le schéma global de l'installation photovoltaïque-thermique sur le plan de la maison est réalisé en 3D avec le logiciel 'SketchUp', comme le montre la figure suivante.



**Figure II.14.** Schéma globale de l'installation (photovoltaïque-thermique) sous 'SketchUp'.

Avec :

- (1) : installation photovoltaïque.
- (2) : installation solaire thermique.

## II.6 Conclusion

Après avoir collecté le maximum d'informations et données sur le site étudié (le gisement solaire et les données climatiques ...).

On a commencé par le dimensionnement de l'installation utilisant la méthode du mois le plus défavorable, l'application numérique de cette méthode nous a permis de déduire que, pour couvrir le besoin journalier en énergie électrique de l'habitat qui est estimée à environ 10,26kWh par jour, il nous faut 48 modules photovoltaïques de 80Wc et 16 batteries de 100Ah pour une autonomie de deux jours.

Et puis, en deuxième partie on avait procédé au dimensionnement de l'installation solaire thermique dédiée à la production d'eau chaude sanitaire, l'application numérique de la méthode du dimensionnement nous a permis de déduire que, pour couvrir le besoin en ECS d'une famille de 5 personnes (30 litres par personne et par jour), il nous faut 4 panneaux thermiques et un ballon de 300 Litres afin de stocker suffisamment d'eau chaude.

Pour finir, on a réalisé à l'aide du logiciel 'SketchUp' un schéma en 3D du montage de l'installation photovoltaïque-thermique, tout en montrant l'emplacement des différents équipements des deux systèmes.



---

## Chapitre III

Etude technico-économique de l'installation solaire

---



## III Etude technico-économique de l'installation solaire

### III.1 Introduction

Après avoir dimensionné les deux parties de l'installation solaire (installation solaire photovoltaïque et thermique), nous avons fait un devis quantitatif des principaux composants de l'installation solaire, ce dernier nous a poussé à se poser les questions suivantes :

- Quel est prix total de l'installation solaire ?
- Quelle est la combinaison la plus adaptée et la plus économique ?
- Est-ce-que notre installation est rentable ?

Ce présent chapitre a pour but de répondre à ces questions, donc réaliser une étude technico-économique pour les principaux éléments de l'installation photovoltaïque ainsi que celles du chauffe-eau solaire afin d'estimer le coût de l'installation et d'arriver à la combinaison la mieux adaptée et la plus économique.

### III.2 Application et analyse technico-économique pour le système photovoltaïque

Pour ce faire, on doit commencer par une étude comparative des principaux éléments de l'installation PV, batteries et panneaux solaire, afin d'estimer le coût de l'installation et arriver à la combinaison la plus économique.

On a opté pour des panneaux et des batteries locaux fabriqué par l'entreprise 'SPA Condor Electronics'.

#### III.2.1 Choix des panneaux photovoltaïques

Différents types de panneau photovoltaïque qui existe sur le marché, mais notre choix est focalisé sur deux types : monocristallin, polycristallin. On a pris pour chaque type trois panneaux de puissances différentes.

##### III.2.1.1 Panneaux monocristallins

Pour ce type de panneau, le coût moyen du Watt, en hors taxes, est de 95 DA.

Le tableau ci-dessous présente le prix de trois panneaux photovoltaïques monocristallin de différentes puissances :

**Tableau III.1.** Prix des panneaux monocristallins

Type	Puissance (W)	Prix H.T (DA)	Prix T.T.C. (DA)
Monocristallin	100	9 500	11 115
	150	14 250	16 672,5
	190	18 050	21 118,5

### III.2.1.2 Panneaux polycristallins

Pour ce type de panneau, le coût moyen du Watt, en hors taxes, est de 90 DA.

Le tableau ci-après cite les prix des trois panneaux photovoltaïques polycristallins de puissances différentes :

**Tableau III.2.** Prix des panneaux photovoltaïques polycristallins

Type	Puissance (W)	Prix H.T (DA)	Prix T.T.C (DA)
Polycristallin	150	13 500	15 795
	250	22 500	26 325
	300	27 000	31 590

### III.2.1.3 Etude comparative entre les différents panneaux proposés

Afin de déterminer le type du panneau le plus adapté et le plus économique pour cette installation photovoltaïque, on a réalisé les calculs suivants :

#### ❖ Pour les panneaux monocristallins :

##### ➤ CEM100M-36 (100W) :

Selon les équations (II.9, II.10 et II.11) on a :

$$E_{pv/j} = P_c \times N_e = 100 \times 2,3 = 230 \text{ Wh/j}$$

$$E_{pv/réelle} = E_{pv/j} \times (1 - 0,2) = 230 \times 0,8 = 184 \text{ Wh/j}$$

$$N_{pv} = Ent \left[ \frac{B_j}{P_{pv/réelle}} \right] = Ent \left[ \frac{7065,6}{184} \right] = 38,4 \text{ On prend 38 panneaux}$$

**NB :** De même pour le reste des panneaux.

##### ➤ CEM150M-36 (150W) :

$$N_{pv} = \left[ \frac{7065,6}{276} \right] = 25,6 \text{ On prend 26 panneaux}$$

##### ➤ CEM190M-72 (190W) :

$$N_{pv} = \left[ \frac{7065,6}{349,6} \right] = 20,2 \text{ On prend 20 panneaux}$$

#### ❖ Pour les panneaux polycristallins :

##### ✓ CEM150P-36 (150W) :

$$N_{pv} = \left[ \frac{7065,6}{276} \right] = 25,6 \text{ On prend 26 panneaux}$$

##### ✓ CEM250P-60 (250W) :

$$N_{pv} = \left[ \frac{7065,6}{460} \right] = 15,3 \text{ On prend 15 panneaux}$$

##### ✓ CEM300P-72 (300W) :

$$N_{pv} = \left[ \frac{7065,6}{552} \right] = 12,8 \text{ On prend 13 panneaux.}$$

**Tableau III.3.** Devis estimatif total des différents type de PV

Type	Puissance (W)	Nombre de panneaux	Prix unitaire (DA)	Prix totale (DA)
<b>Monocristallin</b>	100	38	11 115	422 370
	150	26	16 672,5	433 485
	190	20	21 118,5	422 370
<b>Polycristallin</b>	150	26	15 795	410 670
	250	15	26 325	394 875
	300	13	31 590	410 670

D'après le tableau (III.3), les panneaux les plus économiques pour cette installation sont : panneau CEM150P-36 polycristallin et CEM300P-72 polycristallin. Mais pour une meilleure performance, on préconise d'utiliser les panneaux CEM190-72 monocristallin avec un coût légèrement plus élevé.

### III.2.2 Choix des batteries de stockage

Pour bien choisir, on propose trois batteries de différentes capacités (100 Ah, 150Ah, 200Ah) du type 'Condor'.

Le tableau suivant présente le prix de trois Batteries AGM-GEL de différentes puissances :

**Tableau III.4.** Coût des différents batteries proposées.

Capacité	Prix unitaire H.T (DA)	Prix unitaire T.T.C (DA)
<b>100 Ah</b>	13 900	16 263
<b>150 Ah</b>	20 800	24 336
<b>200 Ah</b>	27 500	32 175

Afin de déterminer la batterie la mieux adaptée et la plus économique parmi les trois proposées pour le système étudié, on a réalisé les calculs suivants pour un besoin journalier fixe calculer dans le chapitre précédent pour des batteries du type :

#### ❖ CGB 12-100Ah :

On a :

$$B_j = 3091,2 \text{ Wh/j}$$

$$C_{batt\_tot} = 1073,33 \text{ Ah}$$

$$N_{batt} = 12$$

#### ❖ CGB 12-150 Ah :

On a:

$$N_{batt} = Ent \left[ \frac{C_{batt\_tot}}{C_{batt,u}} \right] = Ent \left[ \frac{1073,33}{150} \right] = 7,15 \text{ On prend 7 batteries.}$$

#### ❖ CGB 12-200 Ah :

$$N_{batt} = Ent \left[ \frac{1073,33}{200} \right] = 5,36 \text{ On prend 5 batteries}$$

**Tableau III.5.** Étude comparative entre les trois batteries proposées.

Désignation	Nombre de batterie	Prix unitaire (DA)	Prix totale (DA)
<b>CGB 12-100Ah</b>	12	16 263	195 156
<b>CGB 12-150Ah</b>	7	24 336	170 352
<b>CGB 12-200Ah</b>	5	32 175	160 875

Selon le tableau (III.5), la batterie CGB 12-200Ah est la plus économique et la mieux adaptée à notre système photovoltaïque.

### III.2.3 Choix des éléments restants de l'installation PV

Le prix des composants de l'installation PV restants sont donnés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau III.6.** Prix du régulateur ainsi que celui de l'onduleur

Type	Quantité	Prix T.T.C (DA)
<b>Régulateur de charge (DC/DC)</b>		
<b>SmartSolar MPPT 100/15</b>	1	21 600
<b>Onduleur (DC/AC)</b>		
<b>SolaX x1 Boost 3600</b>	1	92 070,36

Le prix des câbles dépend de la section ainsi de la longueur, le devis du système de câblage est présenté sur le tableau suivant :

**Tableau III.7.** Devis du système de câblage.

Section	Longueur (m)	Prix unitaire (DA/m)	Prix totale (DA)
<b>Câble (2x1,5mm<sup>2</sup>)</b>	5	60	300
<b>Câble (2x2,5mm<sup>2</sup>)</b>	10	80	800
<b>Câble (2x6mm<sup>2</sup>)</b>	2	200	400
<b>Câble (2x16mm<sup>2</sup>)</b>	3	340	1 020
<b>Le total</b>			<b>2 520</b>

### III.2.4 Devis total du système photovoltaïque

**Tableau III.8.** Devis estimatif total de l'installation photovoltaïque

Désignation	Prix (DA)
<b>Panneaux</b>	422 370
<b>Batteries</b>	243 360
<b>Régulateur (DC/DC)</b>	21 600
<b>Onduleur (DC/AC)</b>	92 070,36

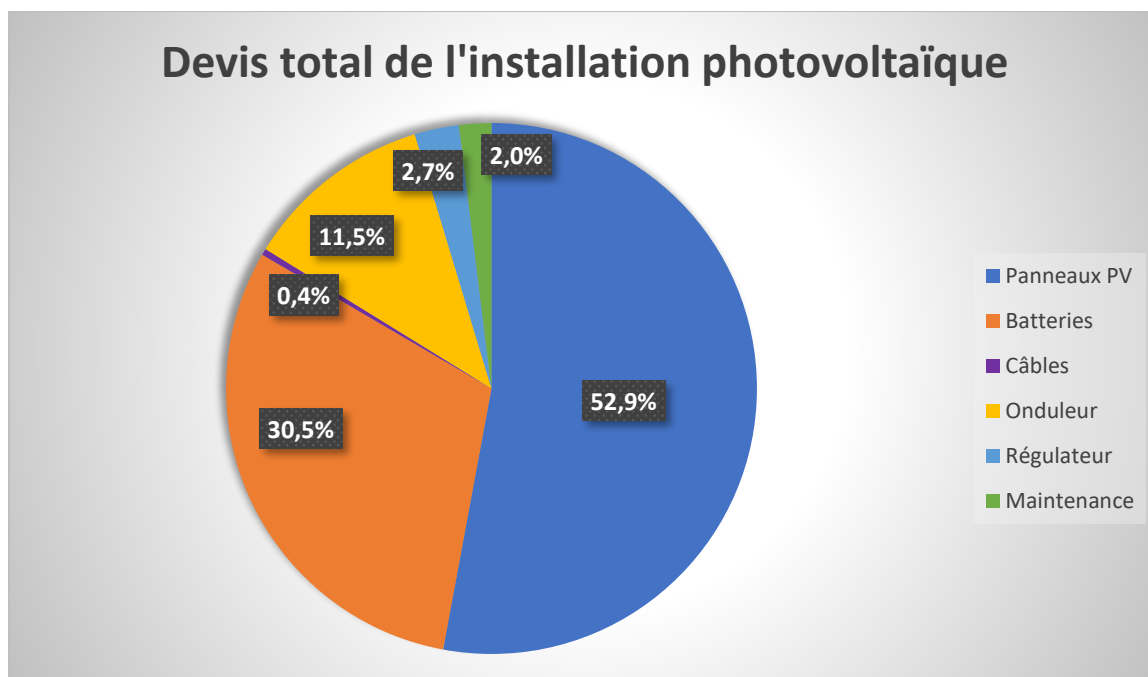


<b>Système de câblage</b>	2 520
<b>Prix total du système photovoltaïque</b>	<b>781 920,36 DA</b>

Le prix de maintenance et de rechange sont estimés à environ 2% du prix total de l'installation photovoltaïque.

Donc le prix total de l'installation photovoltaïque devient :

$$781\,920,36 \cdot (1 + 0,02) = 797\,558,76 \text{ DA}$$



**Figure III.1.** Devis total de l'installation photovoltaïque en pourcentage.

### III.3 Application et analyse technico-économique pour le système solaire thermique

Cette partie est réservée à l'étude et l'analyse technico-économique de l'installation solaire thermique dédiée à la production de l'ECS (donc chauffe-eau solaire). Selon les résultats du dimensionnement trouvés précédemment on a : pour satisfaire les besoins journaliers en ECS d'une famille de 5 personnes il nous faut un ballon de stockage de 300L.

#### III.3.1 Choix des panneaux

On a choisi des capteurs solaires plans verticaux (Alméco-Tinox).

**Tableau III.9.** Devis estimatif de différents panneaux solaires thermiques.

Type	Aire (m <sup>2</sup> )	Prix H.T (DA)	Prix T.T.C (DA)
<b>Panneau PM</b>	1,79	25 621,2	30 745
<b>Panneau MM</b>	2,07	28 590,1	34 307,9
<b>Panneau GM</b>	2,42	32 907,6	39 488,9

Les calculs suivants sont réalisés pour but de déterminer le capteur le plus économique a cette installation thermique :

❖ **Panneau PM :**

Selon les résultats trouvés dans le chapitre précédent on a :

- ✓ La Surface totale de captage  $S_{tot} = 8.04 \text{ m}^2$  ;
- ✓ Le nombre de capteurs nécessaire  $N_{P,th} = Ent \left[ \frac{S_{tot}}{S_u} \right] = Ent \left[ \frac{8.04}{1.79} \right] = 4.4$  on prend 4 panneaux.

NB : De même pour les autres panneaux

❖ **Panneau MM :**

- ✓  $N_{P,th} = \left[ \frac{8.04}{2.07} \right] = 3.8$  On prend 4 panneaux.

❖ **Panneau GM :**

- ✓  $N_{P,th} = \left[ \frac{8.04}{2.42} \right] = 3.3$  On prend 3 panneaux

**Tableau III.10.** Devis total du panneau solaire thermique.

Type	Nombre de Panneaux	Prix unitaire (DA)	Prix total (DA)
Panneau PM	4	30 745	122 980
Panneau MM	4	34 307,9	137 231,6
Panneau GM	3	39 488,9	118 466,7

On remarque que le panneau GM est le plus économique pour l'installation du chauffe-eau solaire.

### III.3.2 Choix de ballon de stockage

On a opté pour un ballon de stockage à double échangeur de 300L du type 'Regulus'.

**Tableau III.11.** Devis estimatif du ballon de stockage proposé.

Type	Prix H.T (DA)	Prix T.T.C (DA)
R2DC 300	103 200 DA	120 744

### III.3.3 Choix de la tuyauterie

On a choisi des tuyaux de 16 (mm) de diamètre :

**Tableau III.12.** Devis estimatif de la tuyauterie.

Diamètre (mm)	Longueur (m)	Prix unitaire (DA/m)	Prix total (DA)
16	23	65	1 500

### III.3.4 Devis total du système solaire thermique

Devis total de l'installation du chauffe-eau solaire est donné dans ce qui suit :

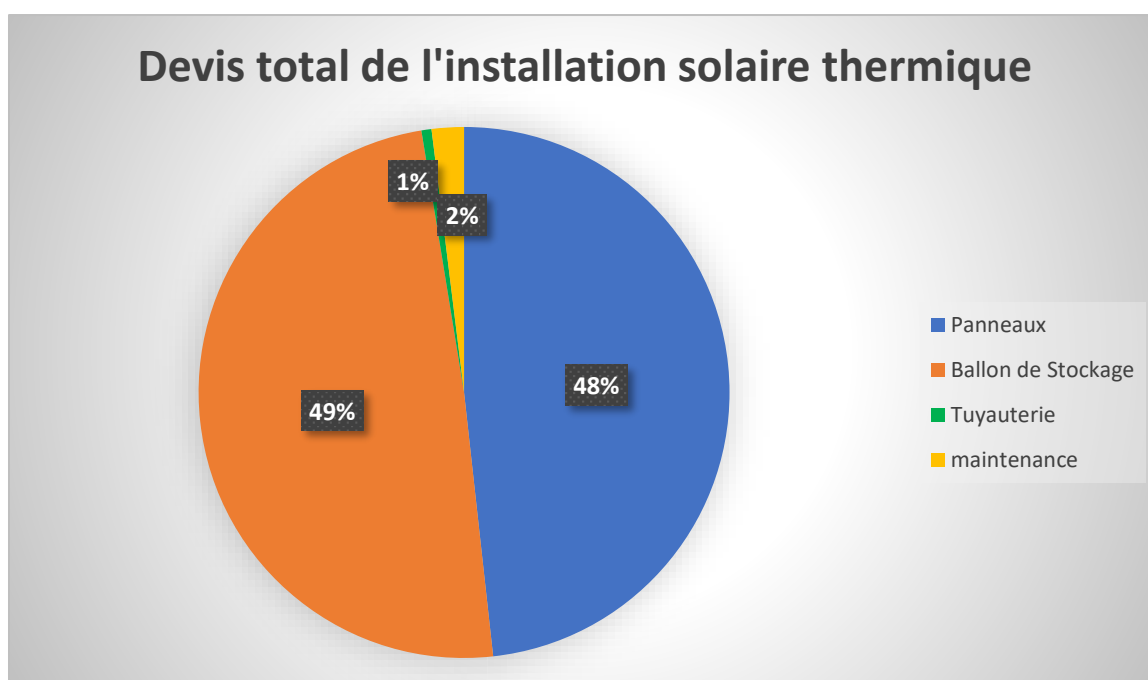
**Tableau III.13.** Devis total de l'installation solaire thermique.

Désignation	Prix (DA)
Panneaux	118 466,7
Ballon de stockage	120 744
Tuyauteries	1 500
<b>Prix total de l'installation (DA)</b>	<b>240 710,7</b>

Le prix de maintenance et de rechange sont estimés à environ 2% du prix total de l'installation solaire thermique.

Donc le prix total de l'installation photovoltaïque devient :

$$240\,710,7 \cdot (1 + 0,02) = 245\,524,9 \text{ DA}$$



**Figure III.2.** Devis total de l'installation solaire thermique en pourcentage.

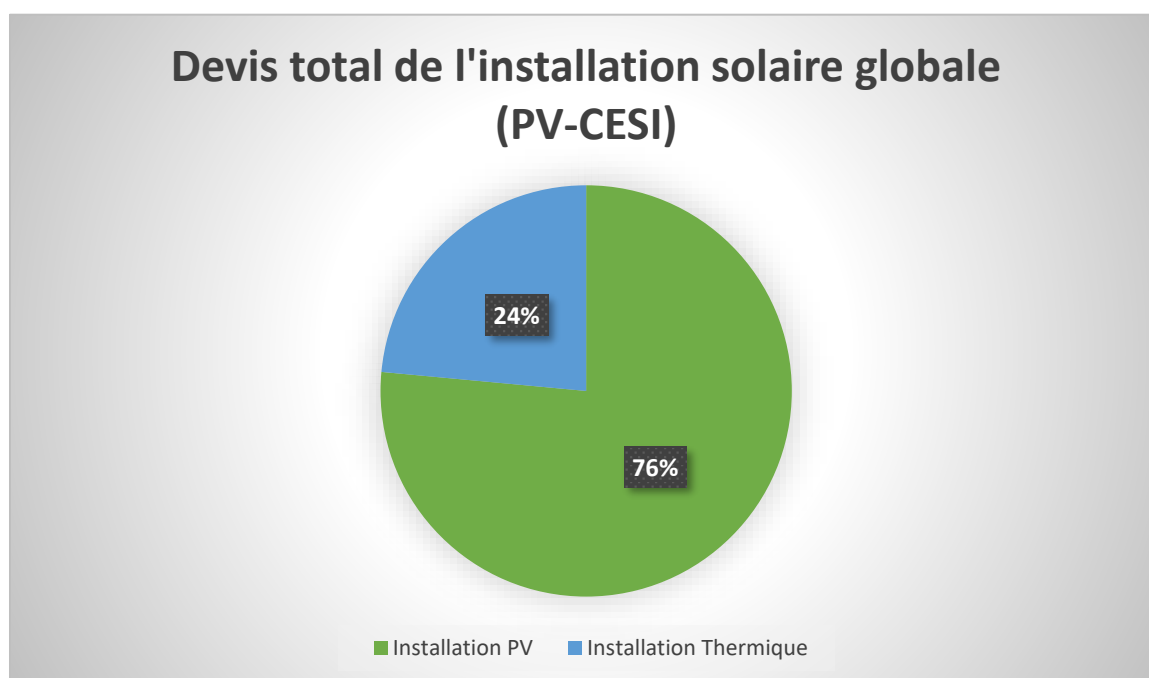
### III.4 Devis global de toute l'installation solaire (Photovoltaïque-Thermique)

L'installation solaire de la maison est devisée en deux installations (thermique et photovoltaïque), donc le prix total de l'installation globale est la somme des deux :

**Tableau III.14.** Devis total de l'installation globale.

Désignation	Prix de l'installation (DA)
Installation PV	798 170,76
Chauffe-eau solaire	245 524,9

<b>Prix total de l'installation globale (DA)</b>	<b>1 043 690,46</b>
--	---------------------



**Figure III.3.** Devis total de l'installation globale en pourcentage.

On remarque que l'installation PV est plus chère que l'installation solaire thermique, cela est dû au fait que le besoin en énergie électrique est supérieur au besoin énergie calorifique.

L'étape suivante est réservée à l'établissement du devis de l'installation solaire dimensionnée précédemment.

### III.5 Devis total de l'installation solaire (réalisée)

#### III.5.1 Devis de l'installation PV réalisée

Le tableau suivant représente les prix des composants ainsi que le prix de toute l'installation PV :

**Tableau III.15.** Devis total de l'installation PV.

Composant	Nombre, mé- trage	Prix unitaire (DA)	Prix total (DA)
<b>Panneaux Suntech 80Wc</b>	48	10 000	480 000
<b>Batterie (100Ah, 12V)</b>	16	27 000	432 000
<b>Onduleur (4 kW, 48V)</b>	1	92 070,36	92 070.36
<b>Régulateur</b>	1	12 500	12 500
<b>Câble 1.5 mm<sup>2</sup></b>	5 m	60 DA/m	300
<b>Câble 2.5 mm<sup>2</sup></b>	10 m	80 DA/m	800
<b>Câble 16 mm<sup>2</sup></b>	3 m	340 DA/m	1020
<b>Câble 6 mm<sup>2</sup></b>	2 m	200 DA/m	400
<b>Prix total de l'installation PV (DA)</b>			<b>1 024 090.36</b>

Le prix de maintenance et de rechange sont estimés à environ 2% du prix total de l'installation photovoltaïque.

Donc le prix total de l'installation photovoltaïque devient :

$$1\,024\,090.36 * (1 + 0,02) = 1\,044\,572.16 \text{ DA}$$

### III.5.2 Devis total de l'installation solaire thermique (réalisée)

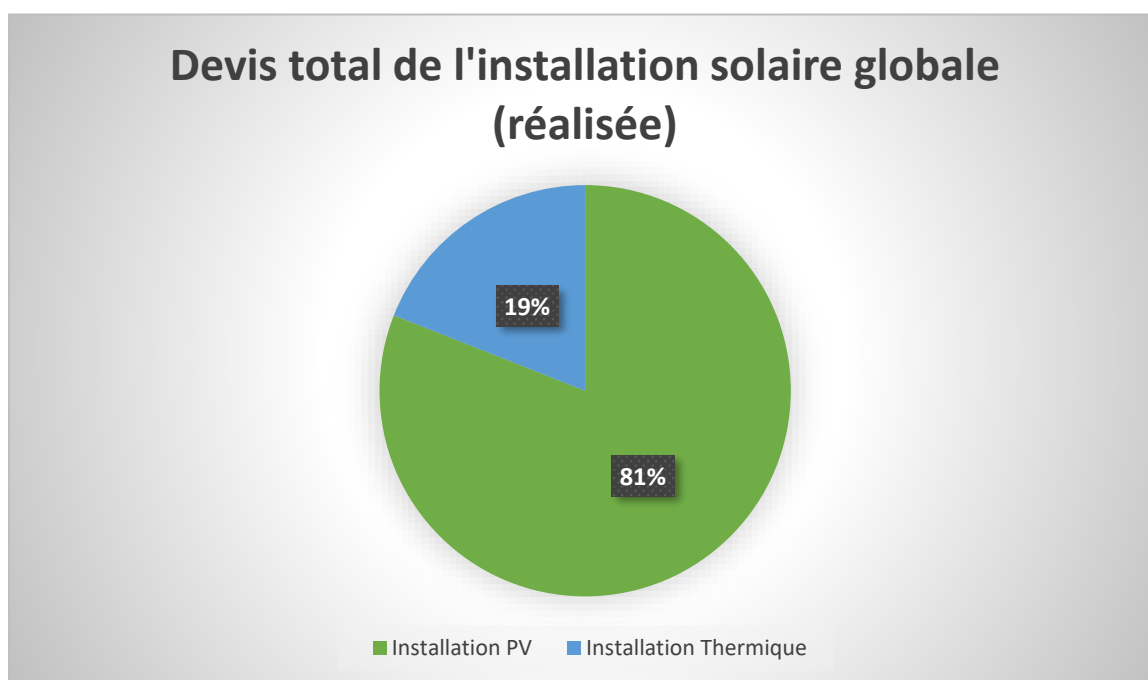
Le coût de l'installation solaire thermique réalisée et dimensionnée précédemment (chapitre 2) est le même que celui de l'installation thermique préconisée, donc le prix total de l'installation thermique réalisée est de : 245 519,814 DA.

### III.5.3 Devis global de toute l'installation solaire (réalisée)

Le tableau suivant illustre le coût de l'installation solaire dimensionnée (thermique et photovoltaïque) :

**Tableau III.16.** Devis total de l'installation globale.

Désignation	Prix de l'installation (DA)
Installation PV	1 044 572,16
Chauffe-eau solaire	245 524,90
<b>Prix total de l'installation globale (DA)</b>	<b>1290 097,06</b>



**Figure III.4.** Devis total de l'installation globale en pourcentage.

## III.6 Devis estimatifs : cas où la maison est raccordée au réseau public (électricité-gaz naturel)

### III.6.1 Raccordement au réseau électrique BT/aérien

Le plus proche pylon du réseau électrique est situé à environ 400m de la maison d'implantation, donc le prix du raccordement de la maison au réseau électrique dans ce cas-là dépend principalement, du coût de transport de l'énergie électrique et du prix de branchement au réseau électrique.

#### III.6.1.1 Coût de transport de l'énergie électrique

Pour une longueur de 400m on doit placer 16 pylons électriques (25 mètres entre chacun).

Le coût du transport d'électricité en Algérie pour une région plane est évalué de 2 795 DA/m tenant compte de :

- Cout des fournitures (câblerie, pylons, ciment, sable).
- Cout d'exploitation d'engins.
- Cout de la main d'œuvre humaine.

**Tableau III.17.** Coût du transport de l'énergie électrique pour une longueur de 400m.

Distance (m)	Prix unitaire (DA/m)	Prix total (DA)
400	2 795	1 118 000

#### III.6.1.2 Coût du branchement au réseau électrique

Le tarif du branchement au réseau électrique pour un habitat (un particulier) est donné dans le tableau ci-dessous :

**Tableau III.18.** Coût du branchement au réseau électrique.

Type	Tarif (DA)
Habitat	15 000

#### III.6.1.3 Coût de la consommation électrique

La durée de vie moyenne d'une installation solaire est estimée à environ 15 ans, pour cela, il est plus logique de calculer la consommation électrique pour cette durée afin d'estimer le devis de la consommation électrique de la maison.

Pour une maison qui consomme en moyenne 10,263kWh par jour le coût estimatif de la consommation est donné dans le tableau suivant :

**NB :** le prix du kWh d'énergie électrique en Algérie est de 4.1789 DA

**Tableau III.19.** Devis estimatif de la consommation électrique pour une période de 15 ans.

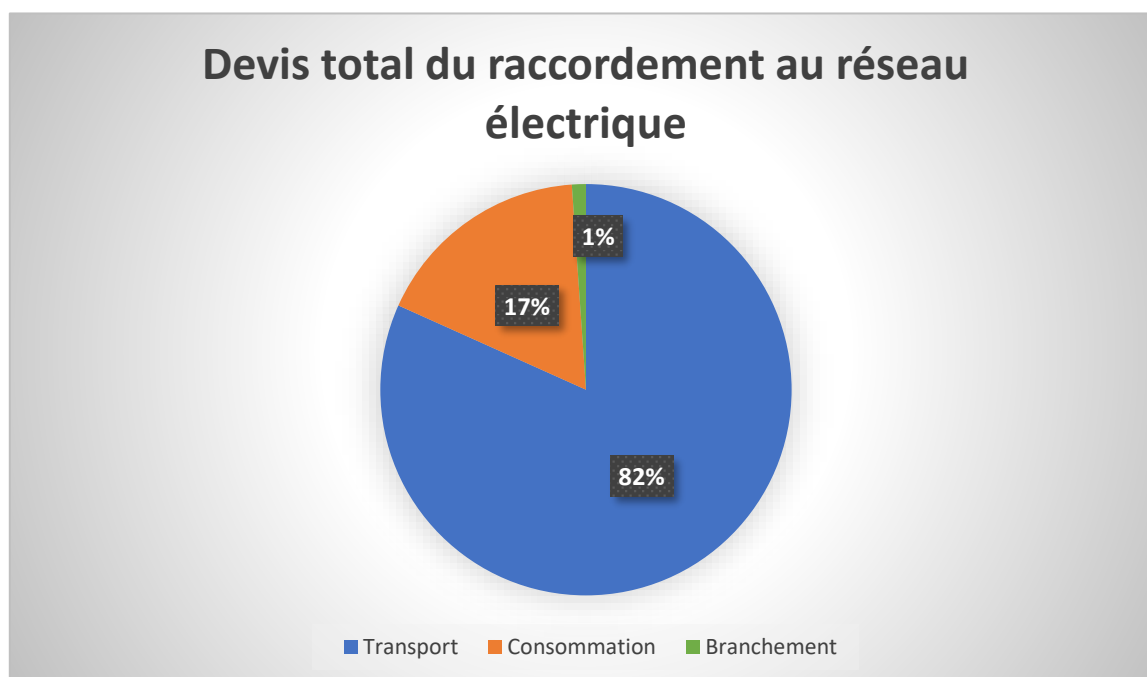
Par /pour	Consommation (kWh)	Coût (DA)
<b>Jour</b>	10,263	42.88
<b>Trimestre</b>	923,67	3859,92
<b>15 ans</b>	56 266.89	235 089,6

#### III.6.1.4 Coût total du raccordement au réseau électrique BT/aérien

Donc en additionnant les coûts des trois opérations précédentes, on obtient le devis estimatif total du raccordement au réseau public, illustré dans le tableau suivant :

**Tableau III.20.** Devis estimatif total du raccordement au réseau électrique.

Type	Coût (DA)
<b>Transport</b>	1 118 000
<b>Consommation</b>	235 089,6
<b>Branchement</b>	15 000
<b>Prix total du raccordement au réseau (DA)</b>	<b>1 368 089,6</b>

**Figure III.5.** Devis estimatif total du raccordement au réseau électrique en pourcentage.

### III.6.2 Raccordement au réseau du gaz naturel

Comme le cas du réseau électrique, le poste de distribution du gaz le plus proche de l'habitat se situe à environ 400 mètres, ce qui veut dire que le devis estimatif du raccordement au gaz naturel repose essentiellement sur le coût de transport du gaz naturel et le coût de branchement ainsi que la consommation du gaz pour le chauffage d'eau sanitaire.

#### III.6.2.1 Coût du Transport du gaz naturel

Dans les normes, le transport du gaz naturel se réalise à une profondeur de 80 cm par rapport au niveau de la terre dans une tuyauterie de 40 mm de diamètre qui se réduit vers 21 mm au niveau des foyers.

Le coût du transport souterrain du gaz naturel en Algérie pour une région non montagnaise est estimé de 800 DA/m en tenant compte :

- Coût des fournitures (tuyauterie, grillage d'avertissement, sable TVO).
- Coût de l'utilisation des engins.
- Coût de la main d'œuvre humaine.

**Tableau III.21.** Coût du transport du gaz naturel pour une longueur de 400m.

Distance (m)	Prix unitaire (DA/m)	Prix total (DA)
400	800	320 000

#### III.6.2.2 Coût du branchement au réseau de gaz naturel

Le tarif du branchement au réseau du gaz naturel pour un habitat, c'est à dire l'installation d'un compteur, est donné dans le tableau ci-dessous :

**Tableau III.22.** Coût du branchement au réseau électrique.

Type	Tarif (DA)
Habitat	10 000

#### III.6.2.3 Coût de la consommation du gaz naturel

La durée de vie moyenne d'une installation solaire thermique est estimée à environ 15 ans. Pour cela, il est important d'évaluer la consommation du gaz naturel de l'habitat pour la même durée.

Pour une maison qui consomme en moyenne 18.4917 kWh par jour le coût estimatif de la consommation est donné dans le tableau suivant :

**NB :** le prix de kWh du gaz naturel en Algérie est estimé de 0.3245 DA



**Tableau III.23.** Coût estimatif de la consommation électrique pour une période de 15 ans

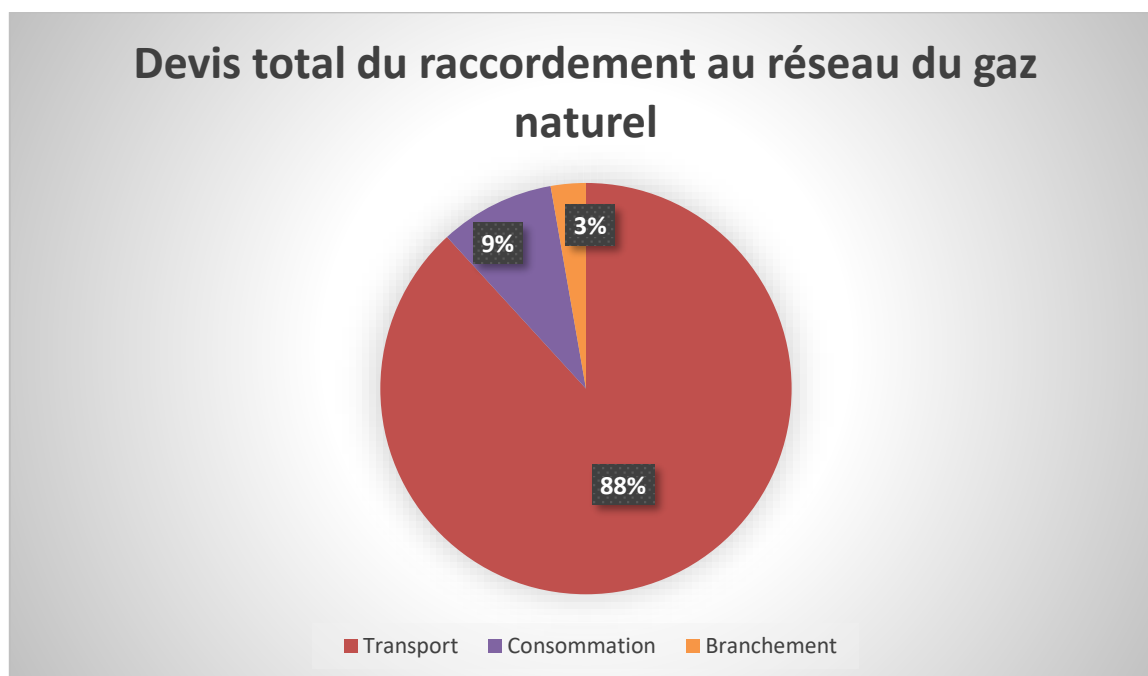
Par /pour	Consommation (kWh)	Coût (DA)
Jour	18.4917	6
Trimestre	1 664,235	540,04
15 ans	101 216.27	32 844.679

la somme du coût de, transport, raccordement et de la consommation du gaz naturel va nous permettre à estimer le devis total du raccordement au réseau du gaz naturel, présenté ci-dessous:

#### III.6.2.4 Coût total du branchement au réseau du gaz naturel

**Tableau III.24.** Devis estimatif total du raccordement au réseau électrique BT/aérien.

Type	Coût (DA)
Transport	320 000
Consomation	32 844,679
Branchement	10 000
<b>Prix total du raccordement au réseau (DA)</b>	<b>362 844,67</b>

**Figure III.6.** Devis estimatif total du raccordement au réseau du gaz naturel en pourcentage

### III.6.3 Devis total du raccordement au réseau public (électricité-gaz naturel)

Tableau III.25. Devis total du raccordement au réseau public.

Désignation	Coût (DA)
Raccordement au réseau électrique	1 368 089,6
Raccordement au réseau du gaz naturel	362 844,67
Le total (DA)	1 730 934,27

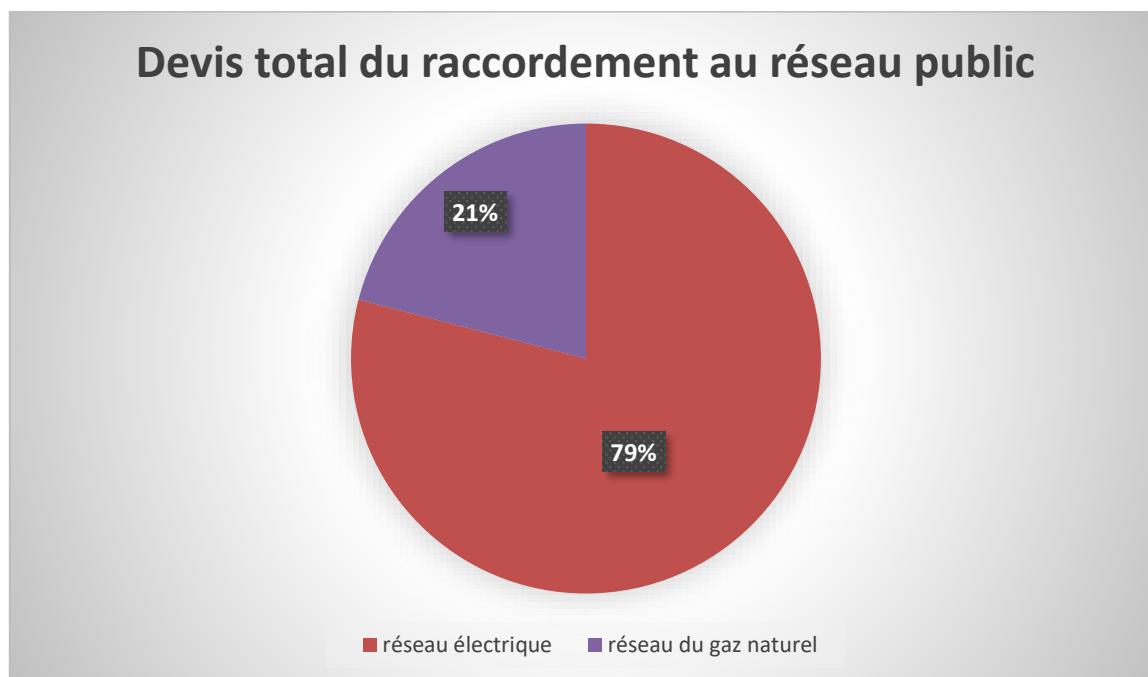


Figure III.7. Devis estimatif total du raccordement au réseau du gaz naturel en pourcentage

Vu la cherté des composants utilisés lors du transport aérien d'électricité, le raccordement au réseau électrique est plus cher que le raccordement au réseau du gaz naturel.

### III.7 Comparaison entre le coût du raccordement au réseau et celui de l'installation solaire

La figure ci-après illustre une comparaison entre le prix du raccordement au réseau et celui de l'installation solaire (préconisé et réalisée)

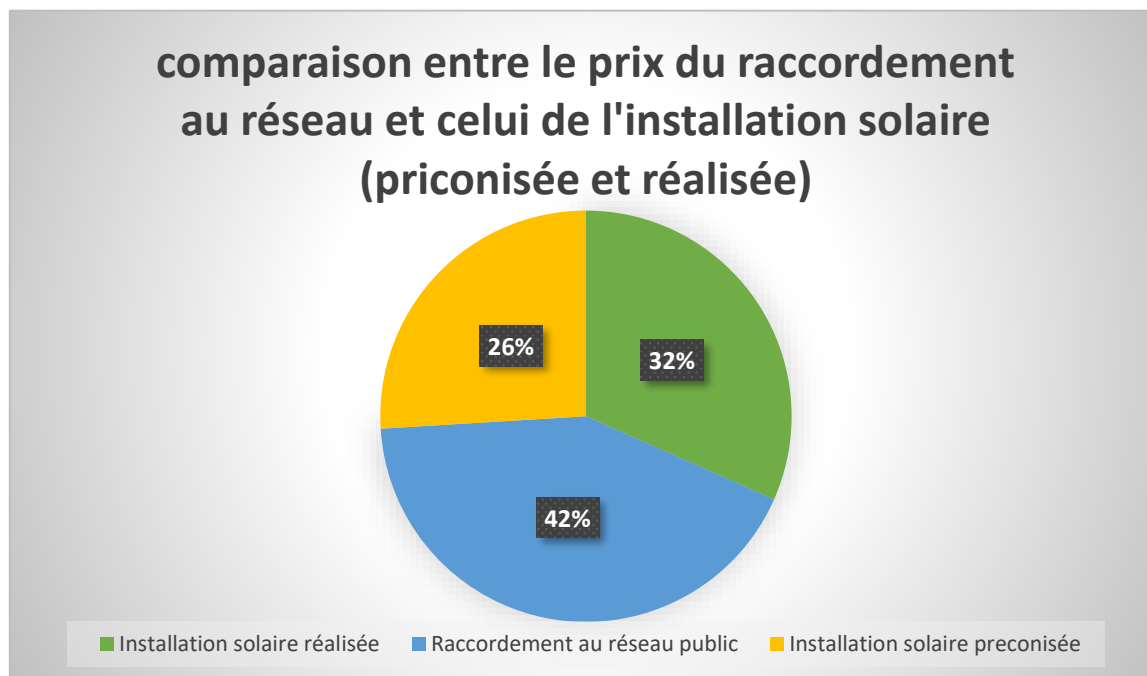


Figure III.8. Comparaison entre le coût du raccordement au réseau public et de l'installation solaire.

On remarque d'après la figure (III.8) que le coût du raccordement au réseau public est plus élevé par rapport au coût des installations solaires, et que l'installation solaire préconisée est moins chère que celle réalisée.

### III.8 Conclusion

Après avoir dimensionné les deux installations solaires, photovoltaïque et thermique, dans le chapitre précédent, l'étude technico-économique se révèle très importante pour l'optimisation du coût de l'installation solaire globale.

Concernant ce dernier chapitre, nous avons commencé par une étude comparative des différents composants de l'installation solaire, dans l'objectif de trouver la combinaison la mieux adaptée et surtout la plus économique, qui permet de satisfaire les besoins de l'habitat en énergie électrique et en eau chaude sanitaire, ce qui a abouti à une installation solaire recommandée, Et puis, nous avons établi un devis pour l'installation solaire réalisée et dimensionnée précédemment dans le deuxième chapitre. Ensuite, on a effectué une comparaison entre les coûts des installations solaire (réalisée et recommandée) et celui du raccordement au réseau public (réseau électrique et celui du gaz naturel), ce qui nous a permis de déduire que l'installation solaire est largement plus économique dans les régions isolées.



---

## **Conclusion générale**

---



## Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne le dimensionnement d'une installation solaire (photovoltaïque et thermique) d'un habitat isolé situé dans la région de Bejaia (Algérie). Les études ont été faites sur la base d'un bilan de consommation journalière établi au niveau de ce site.

Cette installation solaire est un système générateur d'énergie destiné à satisfaire les besoins énergétiques du foyer, elle est divisée en deux installations: la première est une installation photovoltaïque composée de modules photovoltaïques (le champ de captage des rayons solaires), des batteries où nous stockons l'énergie produite par ces modules, un régulateur qui protège les batteries contre la surcharge et qui règle ainsi la valeur de la tension nominale, un onduleur qui assure la conversion du courant continu en courant alternatif, et un système de câblage qui relie les différents composants de l'installation. La deuxième est une installation solaire thermique, basée une autre technologie qui nécessite des capteurs solaires nommés « les capteurs thermiques ». Ces derniers transforment l'énergie rayonnante du soleil en énergie calorifique, au niveau de l'échangeur puis ses calories vont être cédées à l'eau pour le réchauffer.

Pour répondre aux exigences techniques de la charge, nous avons mené une étude détaillée concernant le dimensionnement du :

- 1- Système photovoltaïque : l'application numérique de la méthode du dimensionnement nous a permis de déduire que, pour couvrir le besoin journalier en énergie électrique de l'habitat qui est estimée à environ 10,26kWh par jour, il nous faut 48 modules photovoltaïques de 80Wc et 12 batteries de 100Ah pour une autonomie de deux jours. Afin de garantir la protection et le fonctionnement du système, nous avons prévu un régulateur de charge. La présence de l'onduleur dans notre application a pour but de convertir le courant continu produit par les panneaux photovoltaïques et/ou batteries en courant alternatif qui sera distribué aux appareils électriques.
- 2- Système solaire thermique : l'application numérique de la méthode du dimensionnement nous a permis de déduire que, pour couvrir le besoin en eau chaude sanitaire d'une famille de 5 personnes (30 litres par personne et par jour), il nous faut 4 panneaux thermiques et un ballon de 300 Litres afin de stocker suffisamment d'eau chaude.

Après avoir dimensionné les composants de l'installation solaire, une étude technico-économique s'est avérée nécessaire pour l'optimisation du coût de l'installation, cette dernière nous a permis de déduire que, dans les sites isolés il est préférable d'exploiter l'énergie solaire.

Pour optimiser le fonctionnement des deux installations sur le site choisi, elles devaient répondre aux critères suivants :

- ✓ Incliner les deux champs générateurs d'énergie de 46,42 °qui représente la latitude du site et qui correspond à l'angle optimal permettant de capter une énergie quasi-constante

le long de l'année, vérifiant un fonctionnement pratiquement stable, assurant ainsi un bon rendement et une augmentation de la durée de vie du système de stockage.

- ✓ Assurer un service de maintenance qui consiste en : Un nettoyage des faces des modules avec une vérification des supports et des connexions et des tuyauteries.
- ✓ Vérification de l'état de charge.

L'avancement technologique dans le domaine solaire a fait apparaître de nouvelle génération de panneaux solaires plus performants comme les panneaux PV bifacial qui ont le pouvoir de convertir le rayonnement en courant électrique avec les deux faces, et les panneaux solaires hybrides qui peuvent générer à partir de l'énergie rayonnante du soleil, une énergie électrique et calorifique à la fois. Les scientifiques visent aujourd'hui à augmenter la durée de conservation de la chaleur d'eau dans le ballon de stockage en travaillant sur l'amélioration des matières constituant de ce dernier, avec la focalisation des pays industrialisés sur le développement et le perfectionnement des éléments de l'installation solaire, ce domaine sera de plus en plus rentable.

## Références bibliographiques

- [1] A. ZIDANE, 'Etude et dimensionnement d'une installation photovoltaïque au niveau d'un puits de gaz', département génie électrique, université de Bejaïa, Juin 2012.
- [2] K. IDJARENE, 'Gisement solaire', cours première année Master, Faculté technologie, département génie électrique, université de Bejaïa.
- [3] J. BERNARD, 'énergie solaire calculs et optimisation', édition ellipses, 2004.
- [4] A. RORNI, 'Etude et régulation d'un circuit d'extraction de la Puissance maximale d'un panneau solaire', Mémoire de magister, département D'électrotechnique, Université Mentouri de Constantine, 2009.
- [5] C. LEROUGE, 'Recherche & Industrie Photovoltaïque (PV) Etats-Unis', Sciences physique États-Unis, 2006.
- [6] F. ZOUACHE, 'étude de la concentration solaire sur les performances des Systèmes photovoltaïque', Mémoire de magister, département d'électronique. Université Mentouri de Constantine, 2009.
- [7] H. Belaïche, Y. Nanouche, 'Etude d'une installation en énergie Photovoltaïque intégrée au bâtiment : cas d'un laboratoire au CDER', Mémoire de mastère II, département de génie mécanique, faculté du génie de la construction, UMMTO2014.
- [8] O. Chirifi, H. Madache, 'Etude technico-économique d'une installation photovoltaïque pour une carrière', Mémoire de mastère II, département de génie mécanique, faculté du génie de la construction, UMMTO 2013.
- [9] Y. JANNOT, 'thermique solaire', édition mars 2011.
- [10] A. C. PASTOR, 'Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques', thèse de doctorat, Institut National Des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006
- [11] B. Zouak et M. S. Belkaid, 'Etude Et Simulation D'un Système De Refroidissement Par Effet Peltier Pour Les Cellules Solaires Photovoltaïques', Revue des Energies Renouvelables, Volume 22, Numéro 2, pp. 171-178
- [12] K. HELALI, 'Modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude comparative', Mémoire de magister, département d'électrotechnique, faculté du génie électrique, UMMTO 2012
- [13] site : <http://notresolairephotovoltaïque.e-monsite.com>
- [14] site : <http://energie-developpement.blogspot.com>
- [15] site: [www.quelleenergie.fr](http://www.quelleenergie.fr)
- [16] D. Rekioua, E. Matagne. 'Optimization of photovoltaic power systems: Modelization, Simulation and Control', (2012) Green Energy and Technology, 103.

- [17] site : [www.myshop-solaire.com](http://www.myshop-solaire.com)
- [18] J. Noël, 'Manuel d'utilisation du Calculateur/Simulateur MPPT', version 3-1, Victron Energy, mai 2018
- [19] A. Brahim, 'Etude de performances d'un capteur solaire plan à eau', Mémoire de Master 2, Faculté des sciences et technologies Nancy 1, université de Lorraine, 2016.
- [20] site : [www.grange-energie.com](http://www.grange-energie.com)
- [21] site: [www.solairethermique.guidenr.fr](http://www.solairethermique.guidenr.fr)
- [22] site : [energieplus-lesite.be](http://energieplus-lesite.be)
- [23] S. A. KALOGIROU, "*Solar energy engineering: processes and systems second edition*". Elsevier's Science &Technology, 2014, ISBN 978-0-12-397270-5
- [24] site : [www.solarpedia.net](http://www.solarpedia.net)
- [25] F. Zaouche, 'Maximisation de puissance des systèmes photovoltaïques', Thèse de Doctorat, département génie électrique, université de Béjaïa, 2018.
- [26] A. Bouharchouche, A. Bouabdallah, E.M. Berkouk, S. Diaf et H. Belmili, 'Conception et réalisation d'un logiciel de dimensionnement d'un système hybride éolien-photovoltaïque', *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 17, N° 3, pp. 359-376, 2014
- [27] site : [www.photovoltaique.guidenr.fr](http://www.photovoltaique.guidenr.fr)
- [28] P. BREJONT, 'Calcul prévisionnel des consommations d'énergie bâtiments non résidentiels', collection des guides de l'AICVF, juillet 2000.
- [29] M. D. SIMONET, 'guide au dimensionnement des appareils de production d'eau chaude sanitaire', Institut de Conseils et d'Études en Développement Durable Wallon A.S.B.L, 2015.
- [30] G. Guihéneuf, 'Comprendre et dimensionner les installations domestiques à énergies renouvelables', 2009, p103 à 137.



# Annexes

## A. Module solaire photovoltaïque

Différents types de panneau photovoltaïque qui existe sur le marché, mais notre choix est focalisé sur deux types : monocristallin, polycristallin. On a pris pour chaque type trois panneaux de puissances différentes du type ‘Condor’.

### ❖ Caractéristiques électriques et mécaniques du module PV

#### ➤ Modules monocristallins

Type de module	Unité	CEM100M-36	CEM150M-36	CEM190M-72
Puissance nominale	Wc	100	150	190
Tension en circuit ouvert	V	22,3	22,9	45,2
Courant de court-circuit Isc	A	5,84	8,59	5,56
Tension mpp Vmpp	V	18,5	18,5	36,6
Courant mpp Impp	A	8,41	8,11	5,19
Tension maximale du système VDC	V	1000	1000	1000
Charge maximale de fusibles (A)	A	10	15	15
<b>Caractéristiques mécanique</b>				
Type de cellules par module	<b>Monocristallin</b>			
Dimensions de la cellule	125x125 mm	156x156 mm	125x125 mm	
Nombre de cellules par module	36	36	72	
Dimensions du module	1200x125x35 mm	1428x674x45 mm	1580x808x45 mm	
Poids du module	8 kg	14,5 kg	14,5	

### ➤ Modules polycristallins

Type de module	Unité	CEM150P-36	CEM250P-60	CEM300P-72
Puissance nominale	Wc	150	250	300
Tension en circuit ouvert	V	22,9	38,1	45,6
Courant de court-circuit Isc	A	8,75	8,8	8,88
Tension mpp Vmpp	V	17,5	30,55	36,8
Courant mpp Impp	A	8,25	7,86	8,15
Tension maximale du système VDC	V	1000	1000	1000
Charge maximale de fusibles (A)	A	15	15	15
<b>Caractéristiques mécanique</b>				
Type de cellules par module	<b>Polycristallins</b>			
Dimensions de la cellule	156x156 mm	156x156 mm	156x156 mm	
Nombre de cellules par module	36	60	72	
Dimensions du module	1428x674x45 mm	1640x992x45 mm	1956x992x50 mm	
Poids du module	12 kg	18,5 kg	23,5kg	

### B. Panneaux solaire thermique

Capteur solaire vertical, revêtement sélectif Almeco-Tinox. Verre trempé faible émissivité, isolation 50 mm en laine de roche, joint d'étanchéité en EPDM face avant, soudure de l'absorbeur au laser, cadre en aluminium et fond en aluminium embossé. Convient très bien aux chauffe-eaux en thermosiphon et en circulation forcée. Peut être utilisé dans les installations de chauffage de ballons d'eau sanitaire ainsi que pour le chauffage piscine

Caractéristiques	Unité	Panneau PM	Panneau MM	Panneau GM
Dimensions	mm	1927x927x90	1988x1041x90	1988x1218x90
Poids	Kg	34	38	44
Aire du capteur	m <sup>2</sup>	1,79	2,07	2,42
Aire d'ouverture	m <sup>2</sup>	1,62	1,92	2,24
Aire d'absorption	m <sup>2</sup>	1,61	1,88	2,23
Volume de fluide	L	1	1,07	1,27
Débit nominal	L/h	100	105	120
Pression de test	bar	25	25	25
Pression de travail maximale	bar	10	10	10
Nombre de capillaires		8	10	12
Diamètre des capillaires	mm	8 (cuivre)		
Matériau de l'absorbeur		Almecco-Tinox		
Absorption		95%		
Ravonnement thermique		4,00%		
Coefficient de conversion		0,785		
a1	W/(m <sup>2</sup> K)	3,722		
a2	W/(m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> )	0,012		
Absorbeur		Aluminium Hautement Sélectif		
Diamètre tubes collecteurs	mm	18 (cuivre)		
Verre		Trempe faible émissivité		
Épaisseur du verre	mm	4		
Transmittivité du verre		91,00%		
Isolation		Laine de roche de densité 50 Kg/m <sup>3</sup>		
Épaisseur isolation	mm	40		
Joint d'étanchéité		EPDM et silicone		
Cadre		Aluminium laqué		
Fond de caisse		Aluminium embossé		
Fixation des tubes sur l'absorbeur		Soudure laser		
Connectique		4 sorties cuivre nu diamètre 18mm		

## C. Logiciels

### SketchUP :

Afin de réaliser les schémas de l'installation solaire en 3D nous avons opté pour le logiciel SketchUp. Ce dernier est un logiciel de modélisation 3D, d'animation et de cartographie orienté vers l'architecture. Initialement édité par la société @Last Software, ce logiciel se caractérise par des outils simples, qui en font un logiciel de 3D très différent des modeleurs 3D classique.

## Résumé

La plus grande ressource d'énergie techniquement accessible sur la planète est disponible dans la région nord-africaine. Nous allons étudier plus particulièrement l'énergie solaire qui permet de générer deux types d'énergie : électrique et thermique qui sont indispensables dans le quotidien des êtres humains c'est pour cela nous allons dimensionner une installation photovoltaïque afin de répondre aux besoins en électrification et en eau (pompage solaire) d'un habitat, et une autre pour couvrir le besoin en eau chaude sanitaire à l'aide d'un chauffe-eau solaire.

Une importance particulière est en train d'être accordée à la construction des habitats autonomes surtout dans les pays industrialisés. Ceci pour plusieurs causes qui peuvent être principalement résumées, d'une part, en la croissance accrue de la demande mondiale en énergie conventionnelle et ses problèmes d'approvisionnement, et d'autre part, en l'élévation de son coût et la pollution qu'elle provoque.

Le soleil peut fournir de l'énergie propre qui favorise un développement durable.

**Mots clés :** énergie solaire, énergie photovoltaïque, énergie thermique, chauffe-eau solaire habitat autonome, dimensionnement, technico-économique

## Abstract

The largest technically accessible energy resource on the planet is available in the North African region. We are going to study more particularly solar energy which makes it possible to generate two types of energy: electric and thermal one which are essential in the daily life of human beings. Thus, we have to design a photovoltaic installation in order to meet the needs in electrification and in water (solar pumping) for a home, and a photothermal installation to cover needs for domestic hot water.

Particular importance is given to the construction of autonomous houses especially in industrialized countries. This for several causes which can be mainly summarized, on the one hand, in the increased growth of the world demand for conventional energy and its consequences supply problems, and on the other hand, in the increase in its cost and the pollution it causes.

The sun can provide clean energy that promotes sustainable development.

**Keywords:** solar energy, photovoltaic energy, photothermal energy, autonomous housing, sizing, solar water heater, technico-economic