

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERRI DE TIZI-OUZOU



FACULTÉ DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DÉPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

## Mémoire de Fin d'Études de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Réseaux Electriques

*Présenté par*

**Lydia BERRABAH**

Thème

### Etude d'une Installation Solaire Photovoltaïque, Application à l'Alimentation mixte (Générateur/Groupe Electrogène) d'une Habitation Isolée

*Mémoire soutenu publiquement le 30/06 / 2024 devant le jury composé de :*

<b>M Chafik BIROUCHE</b>	<b>M.A.A</b>	<b>UMMTO,</b>	<b>Président</b>
<b>M Karim HADJ SAID</b>	<b>M.A.A</b>	<b>UMMTO,</b>	<b>Encadrant</b>
<b>M Arezki DICHE</b>	<b>M.A.A</b>	<b>UMMTO,</b>	<b>Examineur</b>

# Remerciement

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mon promoteur M. Karim Hadjsaid pour son encadrement, sa patience tout au long de ce travail.

Mes remerciements vont également à l'ensemble des enseignants du département d'électrotechnique de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou pour leurs enseignements de qualité et les connaissances qu'ils m'ont transmises durant mes années d'étude.

Merci également aux membres de jury qui me font l'honneur de bien vouloir examiner ce travail.

# Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mes chers parents pour leur amour inconditionnel et leur soutien  
inébranlable

A mon frère et mes sœurs pour leur tendresse et leur encouragement, et à  
mon chère beau-frère pour son soutien constant et ses conseils et son  
encouragement, et à ma chère amie pour son amitié qui à enrichie ma vie

# Sommaire

<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Remerciement</b>	
<b>Dédicace</b>	
<b>Sommaire</b>	
<b>Liste des figures</b>	
<b>Lise des tableaux</b>	
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Notions générales sur les énergies</b>	
<b>I- Différentes formes d'énergies</b>	<b>3</b>
<b>I-1 Introduction</b>	<b>3</b>
<b>I-2 Les sources d'énergies</b>	<b>3</b>
<b>II- Les énergies fossiles</b>	<b>3</b>
<b>II-1 Introduction</b>	<b>3</b>
<b>II-2 Définition</b>	<b>4</b>
<b>II-3 Les différentes sortes d'exploitation</b>	<b>4</b>
<b>II-3-1 Le Charbon</b>	<b>4</b>
<b>II-3-2 Le Gaz</b>	<b>5</b>
<b>III- Le nucléaire</b>	<b>6</b>
<b>IV – les énergies renouvelables</b>	<b>7</b>
<b>IV-1 Les éoliennes</b>	<b>7</b>
<b>IV-2 L'Hydraulique</b>	<b>9</b>
<b>IV-3 La Biomasse</b>	<b>10</b>
<b>IV-4 La Géothermie</b>	<b>12</b>
<b>IV-5 L'énergie solaire</b>	<b>13</b>
<b>IV-5-1 Introduction</b>	<b>13</b>

<b>IV-5-2 Les panneaux solaires</b>	<b>14</b>
<b>IV-5-3 Les cellules photovoltaïques</b>	<b>14</b>
<b>IV-5-4 Les avantages</b>	<b>15</b>
<b>IV-5-5 Les limites</b>	<b>15</b>
<b>V- Conclusion</b>	<b>16</b>
<b>Chapitre II : Etude théorique de la conversion photovoltaïque</b>	
<b>I- L'énergie solaire</b>	<b>18</b>
<b>I-1 Introduction</b>	<b>18</b>
<b>I-2 Rayonnement solaire</b>	<b>19</b>
<b>II- Conversion photovoltaïque</b>	<b>20</b>
<b>II-1 L'effet photovoltaïque</b>	<b>20</b>
<b>II- 2 Le principe de conversion photovoltaïque</b>	<b>21</b>
<b>III- La cellule photovoltaïque</b>	<b>22</b>
<b>III-1 Modélisation</b>	<b>22</b>
<b>III- 1-1 Groupement en série</b>	<b>22</b>
<b>III-1-2 Groupement en parallèle</b>	<b>23</b>
<b>III-1-3 Groupement mixte (série-parallèle)</b>	<b>24</b>
<b>III-2 Caractéristique Tension – Courant</b>	<b>25</b>
<b>III-3 Caractéristique Puissance-Tension</b>	<b>25</b>
<b>III- 4 La cellule solaire</b>	<b>26</b>
<b>III-4-1 Cellule au silicium monocristallin</b>	<b>26</b>
<b>III-4-2 Cellule au silicium poly-cristallin</b>	<b>26</b>
<b>III- 4-3 Cellule au silicium amorphe</b>	<b>26</b>
<b>III-5 Les modules photovoltaïques</b>	<b>27</b>
<b>III-5-1 Association de modules</b>	<b>27</b>
<b>III-5-2 Caractéristiques électriques</b>	<b>28</b>

<b>III-6 Caractéristique d'un module solaire</b>	<b>28</b>
<b>III- 6-1 Caractéristique courant-tension I(V)</b>	<b>28</b>
<b>III- 6-2 Caractéristique puissance-tension P(V)</b>	<b>29</b>
<b>IV- Facteur de forme</b>	<b>29</b>
<b>V- Rendement de conversion</b>	<b>30</b>
<b>VI- Zones de fonctionnement du module solaire</b>	<b>30</b>
<b>VII- Fonctionnement optimal du générateur</b>	<b>31</b>
<b>VIII- Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque</b>	<b>31</b>
<b>VIII-1 Les avantages</b>	<b>32</b>
<b>VIII-2 les inconvénients</b>	<b>32</b>
<b>IX- L'ensoleillement</b>	<b>32</b>
<b>IX-1 Le spectre solaire</b>	<b>32</b>
<b>IX-2 Les saisons</b>	<b>33</b>
<b>IX-3 La latitude</b>	<b>33</b>
<b>IX-3-1 Situation géographique et climatique</b>	<b>33</b>
<b>IX-3-2 Inclinaison des modules suivant la latitude</b>	<b>33</b>
<b>IX-3-3 Angle des rayons solaires en fonction des saisons sur le plan du panneau solaire</b>	<b>34</b>
<b>X- Avenir du photovoltaïque</b>	<b>35</b>
<b>XI- Secteurs d'applications</b>	<b>35</b>
<b>XII- Conclusion</b>	<b>37</b>
<b>Chapitre 3 : Méthodes simples de calcul et de choix des éléments d'une installation photovoltaïque sur site isolé</b>	
<b>I- Introduction</b>	<b>39</b>
<b>II- Méthodes de dimensionnement d'un système PV</b>	<b>39</b>
<b>II-1 Différents types de générateurs de production électrique</b>	<b>39</b>

<b>II-2 Schéma de principe d'un système photovoltaïque</b>	<b>40</b>
<b>II-3 Fiches techniques du matériel solaire</b>	<b>40</b>
<b>II-4 Fonction des différents éléments d'un système photovoltaïque</b>	<b>43</b>
<b>III- Conception d'un système photovoltaïque, sur site isolé</b>	<b>43</b>
<b>III-1 Démarche</b>	<b>43</b>
<b>III-2 Calcul des besoins quotidiens en énergie</b>	<b>43</b>
<b>III-3 Coefficient régional d'ensoleillement</b>	<b>44</b>
<b>III-4 Choix des panneaux solaires</b>	<b>44</b>
<b>III-5 Calcul de la capacité des batteries</b>	<b>44</b>
<b>III-6 Choix des batteries</b>	<b>44</b>
<b>IV- Application à une installation solaire photovoltaïque</b>	<b>45</b>
<b>IV-1 Introduction</b>	<b>45</b>
<b>IV-2 Données de l'installation</b>	<b>45</b>
<b>V- Conclusion</b>	<b>51</b>
<b>Chapitre 4 : Etude d'une alimentation d'une habitation par l'énergie photovoltaïque</b>	
<b>I- Introduction</b>	<b>53</b>
<b>II- Caractéristiques générales de l'énergie</b>	<b>53</b>
<b>II-1 Les équipements</b>	<b>53</b>
<b>II-2 Les besoins énergétiques</b>	<b>54</b>
<b>II-3 Contraintes</b>	<b>54</b>
<b>III- Solution technologique</b>	<b>55</b>
<b>III-1 Diverses possibilités</b>	<b>55</b>
<b>III-2 Choix technologique : choix du photovoltaïque</b>	<b>55</b>
<b>III-3 Critère économique</b>	<b>55</b>
<b>IV- Description du système étudié</b>	<b>56</b>

<b>IV-1 Présentation</b>	<b>56</b>
<b>IV-2 Description du fonctionnement</b>	<b>57</b>
<b>IV-3 Equipement du système étudié</b>	<b>57</b>
<b>IV-4 L'enregistrement des données</b>	<b>57</b>
<b>IV-5 Les alarmes affichées sont</b>	<b>58</b>
<b>V- Conclusion</b>	<b>65</b>
<b>Conclusion générale</b>	<b>66</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>68</b>

<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Liste des figures</b>	
<b>Figure I (1) : fonctionnement d'une centrale thermique</b>	<b>4</b>
<b>Figure I (2) : centrale thermique à combustible fossile</b>	<b>5</b>
<b>Figure I (3) : principe d'une chaudière à gaz</b>	<b>5</b>
<b>Figure I (4) : centrale nucléaire</b>	<b>6</b>
<b>Figure I (5) : schéma d'une éolienne</b>	<b>7</b>
<b>Figure I (6) : coupe transversale d'une éolienne</b>	<b>8</b>
<b>Figure I (7) : schéma d'une centrale hydraulique</b>	<b>9</b>
<b>Figure I (8) : le principe de la biomasse</b>	<b>11</b>
<b>Figure I (9) : le principe de la géothermie</b>	<b>12</b>
<b>Figure I (10) : schéma présentative d'un capteur solaire</b>	<b>14</b>
<b>Figure II (1) : Analyse spectrale du rayonnement solaire</b>	<b>19</b>
<b>Figure II (2) : Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque</b>	<b>21</b>
<b>Figure II (3) : Modèle d'une cellule photovoltaïque</b>	<b>22</b>
<b>Figure II (4-a) : Association des modules en série</b>	<b>23</b>
<b>Figure II (4-b) : Caractéristique résultante d'un groupement de n cellules identiques</b>	<b>23</b>
<b>Figure II (5-a) : Association des modules en parallèle</b>	<b>23</b>
<b>Figure II (5-b) : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de n cellules identiques</b>	<b>24</b>
<b>Figure II (6-a) : Association mixte des modules</b>	<b>24</b>

<b>Figure II (6-b) : Caractéristique résultante d'un groupement mixte</b>	<b>24</b>
<b>Figure II (7) : Caractéristique tension – courant</b>	<b>25</b>
<b>Figure II (8) : Caractéristique tension – puissance</b>	<b>25</b>
<b>Figure II (9) : Cellule au Silicium Monocristallin</b>	<b>26</b>
<b>Figure II (10) : Cellule au Silicium Poly cristallin</b>	<b>26</b>
<b>Figure II (11) : Cellule au Silicium amorphe (couche mince)</b>	<b>27</b>
<b>Figure II (12) : Mise en série</b>	<b>27</b>
<b>Figure 13 : Mise en parallèle</b>	<b>28</b>
<b>Figure 14 : Caractéristique I(V) d'un module solaire, T=25°C</b>	<b>29</b>
<b>Figure 15 : Caractéristiques P (V) d'un panneau solaire, T=25°C</b>	<b>29</b>
<b>Figure 16 : Les différentes zones de la caractéristique I (V), T=25°C</b>	<b>31</b>
<b>Figure 17 : Variation de l'ensoleillement au cours d'une journée</b>	<b>34</b>
<b>Liste des tableaux</b>	
<b>Tableaux IV (1) : tableau des besoins énergétiques du système</b>	<b>54</b>
<b>Tableaux IV (2) : tableau des équipements du système étudié</b>	<b>57</b>

## Liste des abréviations

***ff*** :facteur de forme

**P<sub>c</sub>**: la puissance crete des panneaux

**P<sub>in</sub>** : puissance incidente

**A** : section de la cellule

**η**: le rendement

**R<sub>opt</sub>** : la résistance optimale

**Ø** : l'ensoleillemnt en watt en mètre carré

**G** : l'éclairement

**KVA** : kilovolt-Ampère

**S** : seconde

**H** : heure

**AH** : Ampère-heure

**A** : Ampère

**Hz** : hertz

**W** : watt

**Kw** : kilowatt

**m<sup>2</sup>** : mètre carré

**µm** : micromètre

**N<sub>p</sub>** : nombre de cellule en parallèle

**N<sub>s</sub>** : nombre de cellule en serie

**P<sub>v</sub>** : panneaux photovoltaïques

**GPV** : générateur photovoltaïque

**CC** : courant continue

**CA** : courant alterantif

**V** : la tension

**I** : courat diponible

**I<sub>d</sub>** : courant de diode

**I<sub>g</sub>** : courant de généré

**I<sub>cc</sub>** : le courant de court-circuit

**V<sub>co</sub>**: la tension de circuit ouvert

**V<sub>opt</sub>**: la tention optimale

**I<sub>opt</sub>**: le courant optimale

**P<sub>max</sub>**: la puissance maximale

**λ** : la langueur d'onde

# **Introduction générale**

# Introduction générale

---

## Introduction générale

Les sources d'énergie conventionnelles, obtenues de notre environnement, tendent à échapper avec une rapidité relative due à ses utilisations irrationnelles par l'humanité. Cette origine incontrôlée des énergies naturelles, certainement mène à un accord avec notre système écologique à l'instabilité. La diminution des sources de pétrole, gaz naturel et sources naturelle de charbon mènent à faire un effort de trouver des nouvelles sources d'énergie pour permettre une réduction dans l'utilisation des sources naturelles de combustible, c'est le but souhaité des pays industrialisés du monde. Dans ce contexte l'énergie solaire apparaît comme une source importante telle que la quantité d'énergie solaire qui arrive sur la surface de terre dans un jour est dix fois plus que l'énergie consommée.

Les systèmes photovoltaïques en site isolé constituent une solution bon marché, simple et sûre pour l'approvisionnement décentralisé en énergie. Ils permettent de réaliser des réseaux électriques stables et décentralisés dans des zones éloignées de tout réseau. En outre, l'électricité d'origine solaire contribue de façon non négligeable à s'affranchir des sources d'énergie fossiles, notamment dans les pays en voie de développement fortement peuplés. En effet, les systèmes photovoltaïques en site isolé sont peu gourmands en ressources, économiques, utilisables dans le monde entier et contribuent sensiblement à la protection du climat.

Notre travail, consiste en une étude d'une installation mixte : solaire photovoltaïque, et par groupe électrogène d'une habitation Isolée, pour ce faire, le mémoire est subdivisé en quatre chapitres : Où le premier chapitre expose un aperçut sur les notions générales sur les énergies. Le deuxième chapitre parle des généralités sur les cellules photovoltaïques. Le troisième chapitre traite l'étude de l'énergie photovoltaïque, exposant une méthode simple de calcul et de choix des éléments d'une installation photovoltaïque sur site isolé. Enfin, le dernier chapitre fait l'objet d'une étude pratique sur l'alimentation d'une habitation par l'énergie photovoltaïque. Nous terminons notre travail par une conclusion générale.



# **Chapitre 1**

## **Notions générales sur les énergies**



## **I- Différentes formes d'énergies :**

### **I-1 Introduction :**

L'énergie est un facteur essentiel du développement et de l'évolution des sociétés humaines, que cela soit sur le plan de l'amélioration des conditions de vie ou sur le plan du développement des activités industrielles. L'énergie est ce qui permet de fournir un travail, de faire fonctionner des machines. Il existe pour nous de nombreuses sources d'énergie (pétrole-charbon-gaz, nucléaire, solaire, eau, éolien, biomasse, ...)

### **I-2 Les sources d'énergies :**

L'énergie existe sous de multiples formes :

- Énergie mécanique
- Énergie chimique
- Énergie électrique
- Énergie rayonnante
- Énergie éolienne
- Énergie nucléaire

Les sources d'énergie sont soit des matières premières soit des phénomènes naturels employés pour produire de l'énergie. On distingue :

- Les énergies fossiles.
- L'énergie nucléaire
- Les énergies renouvelables.

## **II- Les énergies fossiles :**

### **II-1 Introduction :**

Les énergies fossiles qui comprennent le charbon, le pétrole et le gaz, jouent un rôle crucial dans notre vie quotidienne. Elles alimentent par exemple nos transports, maintiennent nos maisons au chaud ou au froid et font tourner nos usines. Mais elles sont également les grandes responsables des émissions de gaz à effet de serre, dont le CO<sub>2</sub>, qui s'accumulent dans l'atmosphère. Or ces émissions sont une cause reconnue du phénomène de réchauffement climatique qui met sérieusement en danger l'équilibre environnemental de notre précieuse planète.

## II-2 Définition :

On appelle « énergie fossile » l'énergie produite par la combustion du charbon, du pétrole ou du gaz naturel. Ces combustibles, riches en carbone et hydrogène, sont issus de la transformation de matières organiques enfouies dans le sol pendant des millions d'années (d'où le terme "fossiles"). Ce sont des énergies non renouvelables puisqu'une fois utilisées, elles ne peuvent être reconstituées qu'à l'échelle des temps géologiques.

## II-3 Les différentes sortes d'exploitation :

Le charbon, le pétrole et le gaz naturel proviennent de la décomposition de végétaux et d'organismes vivants qui ont été enfouis sous la terre. Les ressources diminuent quand on les utilise car il leur faut des millions d'années pour se former et sont donc des sources d'énergies non renouvelable.

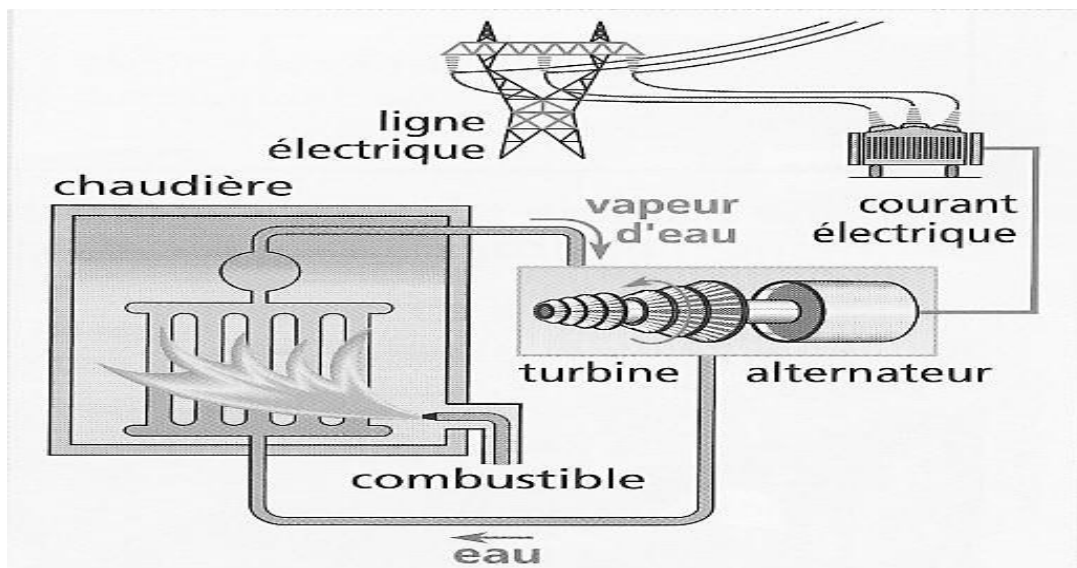


Figure I (1) : fonctionnement d'une centrale thermique

### II-3-1 Le Charbon :

#### Fonctionnement

Le charbon, le pétrole et le gaz naturel sont des combustibles qui chauffent de l'eau, l'eau crée de la vapeur fait tourner une turbine et en même temps il chauffe l'eau. Ils sont très polluants et libèrent en brûlant de grandes quantités de CO<sub>2</sub>. [2]

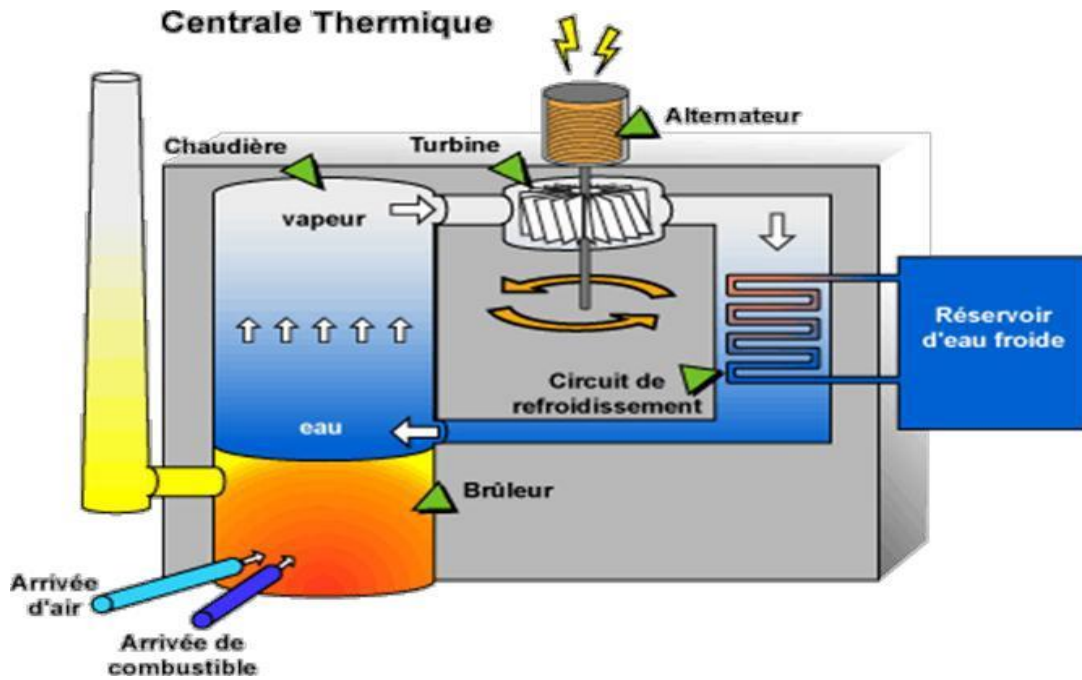


Figure I (2) : centrale thermique à combustible fossile

II-3-2 Le Gaz :

**Fonctionnement :** On se sert du gaz pour faire chauffer de l'eau car le gaz est un gaz qui s'enflamme.

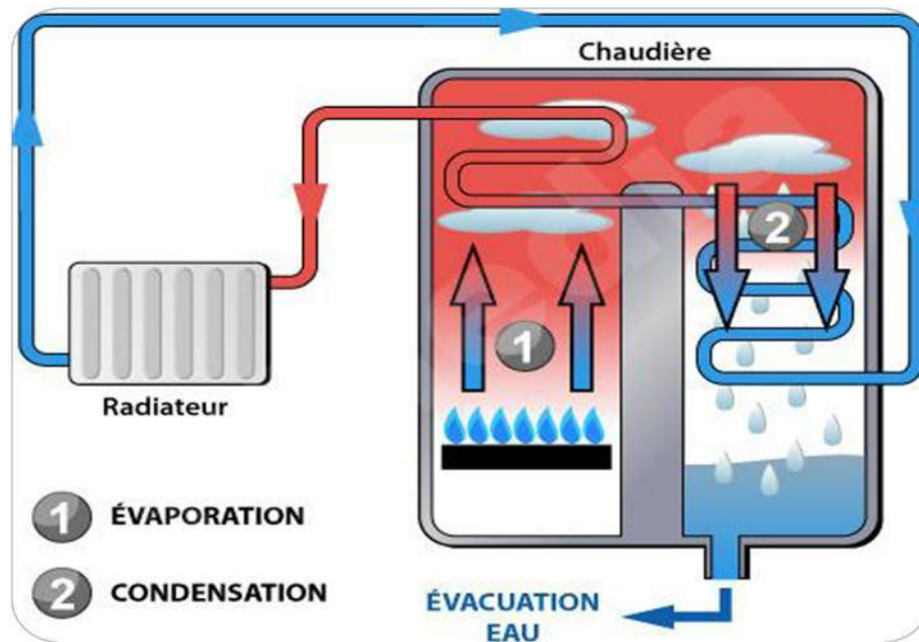


Figure I (3) : principe d'une chaudière à gaz

### III- Le nucléaire :

#### Fonctionnement

La matière, qu'elle soit solide, liquide ou gazeuse, vivante ou inanimée, est constituée d'atomes.

Les atomes sont eux-mêmes constitués de particules élémentaires : les protons et les neutrons, qui forment ensemble le noyau de l'atome.

On appelle réaction nucléaire le processus entraînant une modification du noyau des atomes. Les atomes qui constituent la matière sont en général stables, mais certains d'entre eux se transforment spontanément en émettant des rayonnements qui emportent de l'énergie. C'est ce qu'on appelle la radioactivité.

La science nucléaire a de nombreuses applications bénéfiques, notamment en archéologie et en médecine mais les deux réactions qui suscitent le plus d'intérêt sont celles qui peuvent permettre de produire de l'électricité et des bombes :

à fission nucléaire consiste à projeter un neutron sur un atome lourd "fissile" pour le faire éclater en 2 atomes plus légers. Cela produit aussi de la chaleur, des rayonnements radioactifs, et 3 neutrons capables à leur tour de provoquer une fission : c'est le mécanisme de la réaction en chaîne. [2]

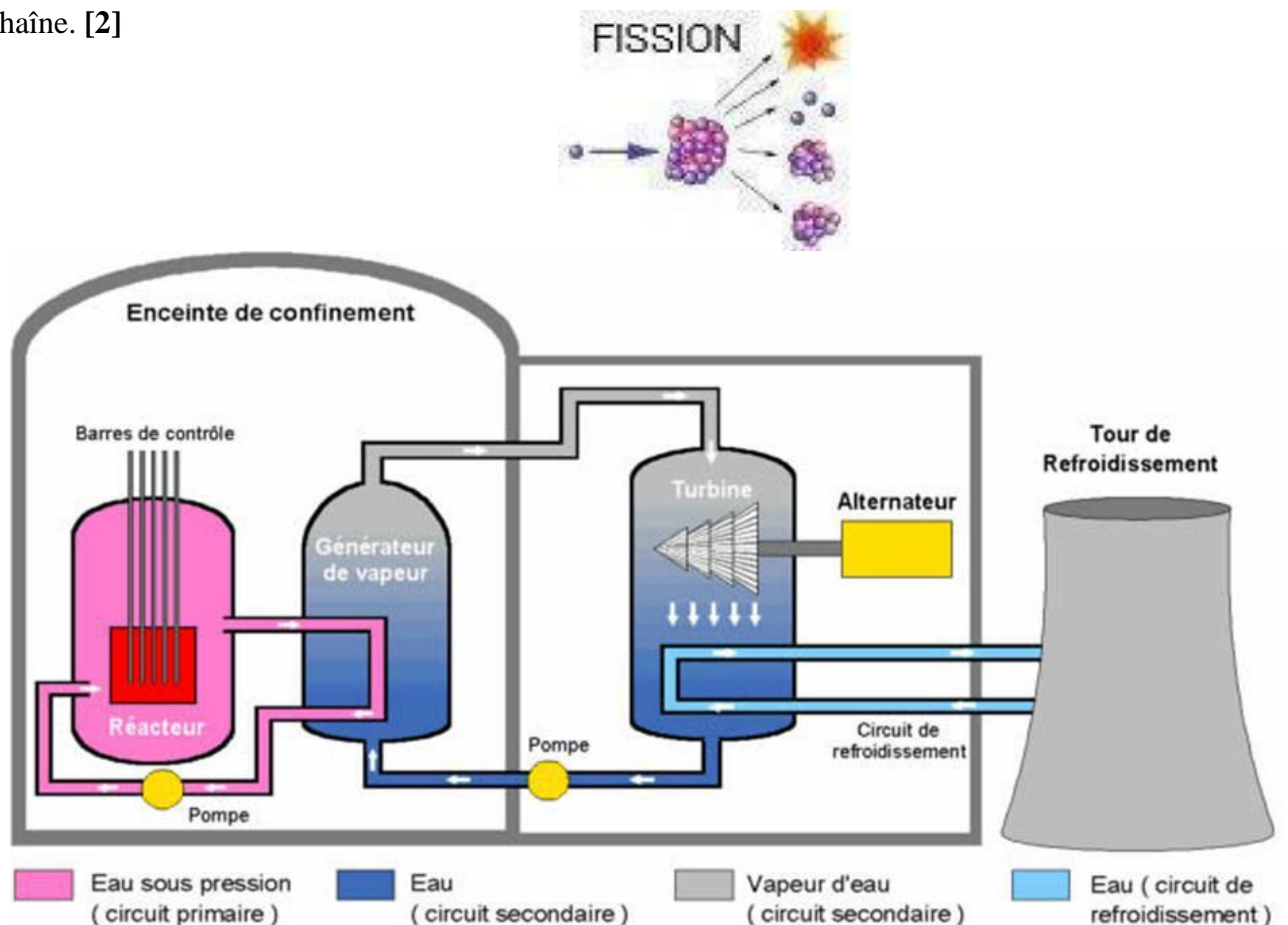


Figure I (4) : centrale nucléaire

## IV – les énergies renouvelables :

Une énergie renouvelable est une énergie que nous ne pouvons utiliser à l'infini. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels : vent, soleil...

Les différentes sortes d'exploitation

- Le vent (les éoliennes)
- Le soleil (les panneaux photovoltaïques et les panneaux solaires)
- L'eau (l'hydraulique)
- La végétation (la biomasse)

### IV-1 Les éoliennes :

#### Schéma d'une éolienne

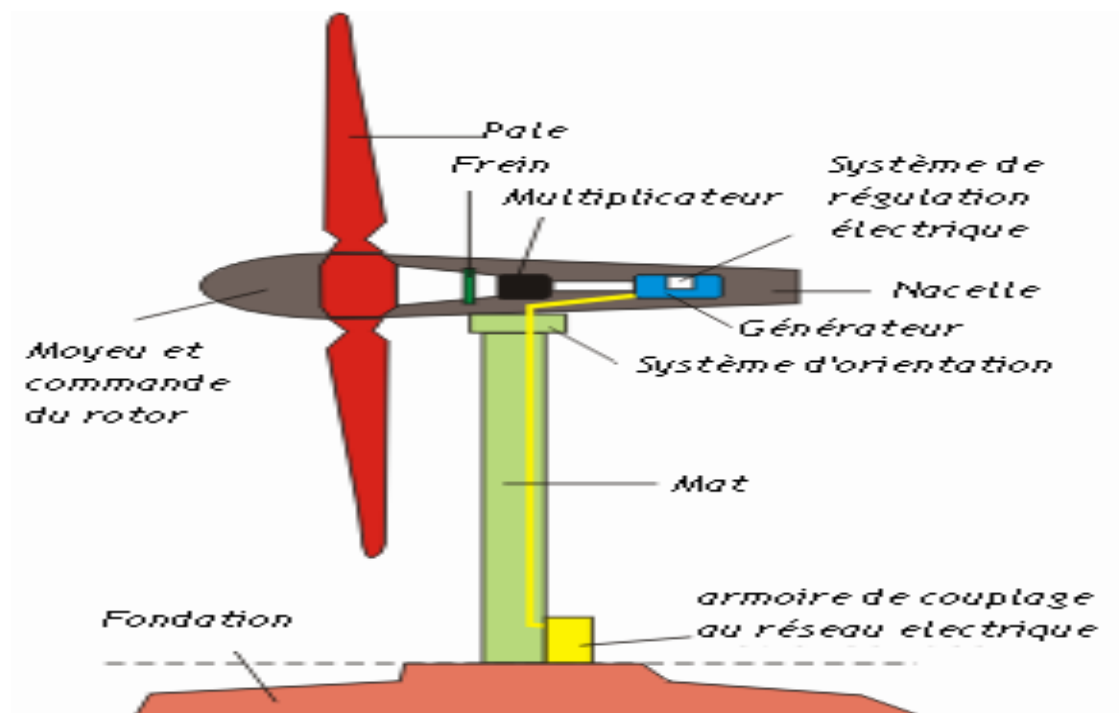


Figure I (5) : schéma d'une éolienne

#### Fonctionnement

Une éolienne est un dispositif mécanique destiné à convertir l'énergie du vent en électricité. Elle est composée des principaux éléments suivants :

- 1- un **mât**, haut d'une centaine de mètres en moyenne, qui soutient la nacelle afin que celle-ci puisse capter des vents plus hauts donc plus forts ;
- 2- une **nacelle**, située en haut de ce mât, qui abrite notamment la génératrice ;

- 3- le **rotor**, auxquelles sont fixées les trois pales, entrent en mouvement rotatif grâce à l'intensité du vent et fait ainsi tourner un arbre mécanique. Le multiplicateur augmente la vitesse de celui-ci, cette énergie est enfin convertie en électricité par la génératrice.
- 4- Une éolienne produit de l'électricité lorsque la vitesse du vent se situe entre 3 mètres par seconde (force suffisante pour entraîner la rotation des pales) et 25 mètres par seconde. Lorsque ce dernier seuil de vitesse est atteint, un dispositif présent dans la nacelle se met alors en marche, celui-ci actionne le frein du rotor ainsi qu'une modification de l'inclinaison des pales, ce qui conduit à un arrêt de la machine tant que le vent ne faiblit pas.

Actionnées par le vent, les pales fixées sur le rotor entraînent une génératrice électrique installée dans la nacelle. Le courant ainsi produit, d'une tension de 400 à 690 Volts est ensuite transporté par câble souterrain jusqu'au poste de livraison. Il y est élevé à une tension supérieure (20 000 V) afin d'être injecté sur le réseau national.

### Quantité d'électricité produite par une éolienne

Une éolienne d'une puissance de 2 Mégawatts produit annuellement environ 4.400 Mégawatheures, soit la consommation électrique (hors chauffage) d'environ 2 000 foyers.

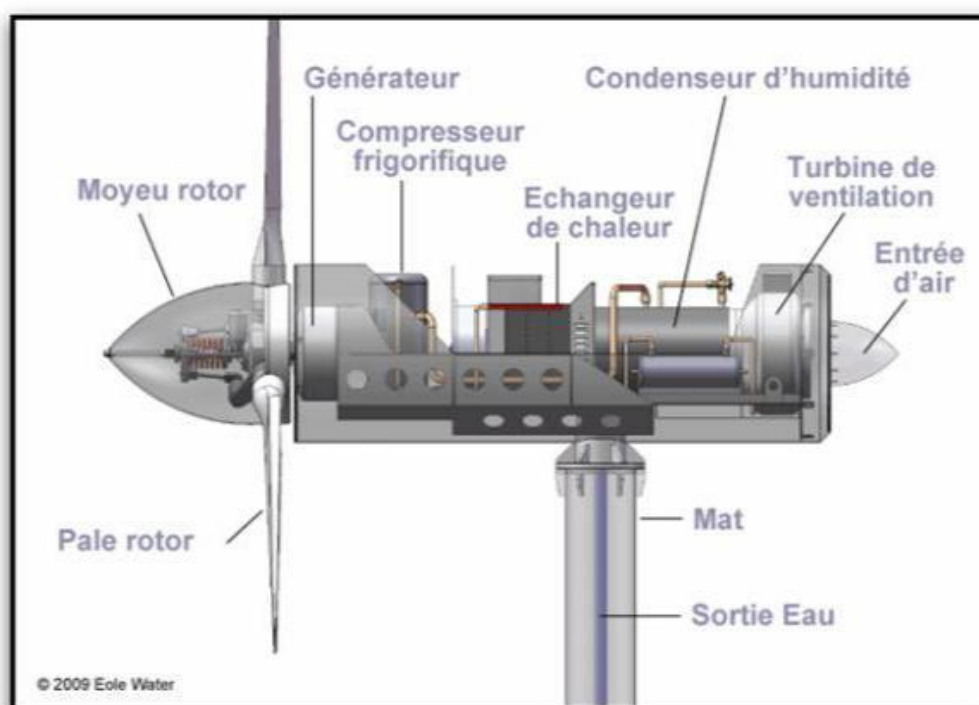


Figure I (6) : coupe transversale d'une éolienne

### Les avantages

- C'est une énergie dont l'utilisation ne pollue pas l'atmosphère.
- Les coûts d'installation ne sont pas très élevés.

- Les éoliennes ne prennent pas beaucoup de place au sol.

### Les limites

- Doivent être placées où le vent possède une certaine force pour faire tourner les pales.
- Peu esthétique dans le paysage.
- Peut être l'objet de nuisance sonore à moins de 250m.

### IV-2 L'Hydraulique :

#### Schéma

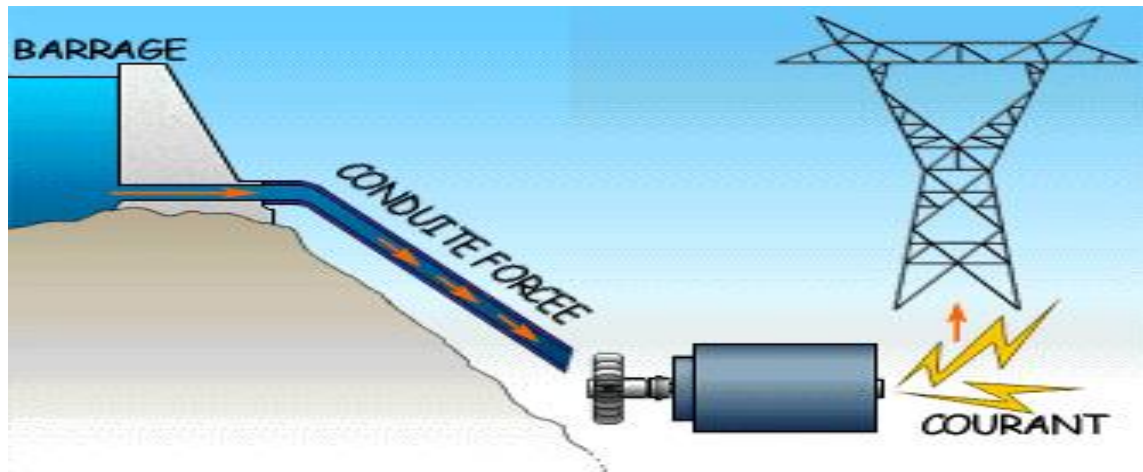


Figure I (7) : schéma d'une centrale hydraulique

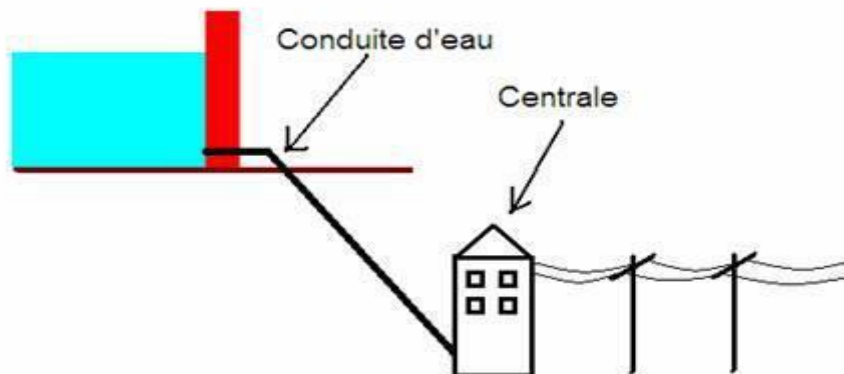
**Le principe général est simple** : il s'agit de récupérer la force vive de l'eau lorsqu'elle est sous pression. Pour cela, on construit une centrale hydraulique qui comporte plusieurs éléments. Mais pour qu'un barrage soit construit, il faut que la dénivellation du relief soit suffisamment importante.

#### Fonctionnement

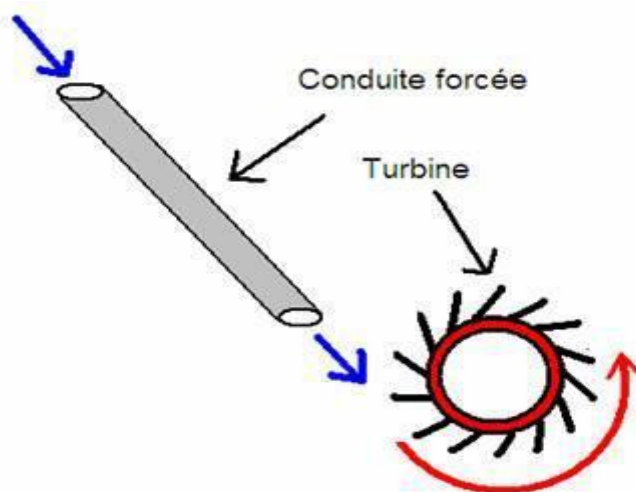
Le premier impératif est d'avoir de l'eau, beaucoup d'eau. Le rôle du barrage consistera à la retenir. Le barrage s'oppose à l'écoulement naturel de l'eau, sauf en cas de forts débits, qu'il laisse alors passer. De grandes quantités d'eau s'accumulent et forment un lac de retenue.



Lorsque l'eau est stockée, il suffit d'ouvrir des vannes pour amorcer le cycle de production d'électricité. L'eau s'engouffre alors dans une conduite forcée ou dans une galerie creusée dans la roche suivant l'installation, et se dirige vers la centrale hydraulique située en contrebas.



A la sortie de la conduite, la pression ou la vitesse (ou les deux en même temps) entraîne la rotation de la turbine.



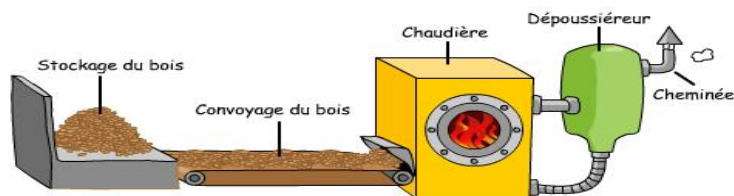
La rotation de la turbine entraîne celle du rotor de l'alternateur.

Un transformateur élève alors la tension du courant produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à haute et très haute tension.

L'eau turbinée qui a perdu son énergie s'échappe par le canal de fuite et rejoint la rivière. [1]

### IV-3 La Biomasse :

La biomasse (ensemble de la matière végétale) est une véritable réserve d'énergie, captée à partir du soleil grâce à la photosynthèse. La biomasse peut produire de l'énergie par combustion dans une chaudière. Elle peut aussi produire par méthanisation du biogaz, qui sera converti en énergie.



La chaufferie à bois

**Fonctionnement**

Ce concept s'applique aux produits organiques végétaux et animaux utilisés à des fins énergétiques ou agronomiques. On distingue deux types de biomasse :

**Biomasse sèche** : le bois de feu est la plus ancienne source d'énergie. Les divers déchets ligneux constituent la biomasse sèche et sont également appelés « bois énergie »

**Biomasse humide** : les déchets organiques d'origine agricole (fumiers, lisiers...), agroalimentaire ou urbaine (déchets verts, boues d'épuration, fraction fermentescible des ordures ménagères ...) constituent la biomasse « humide », qui peut être transformée en énergie ou en engrais/amendement.

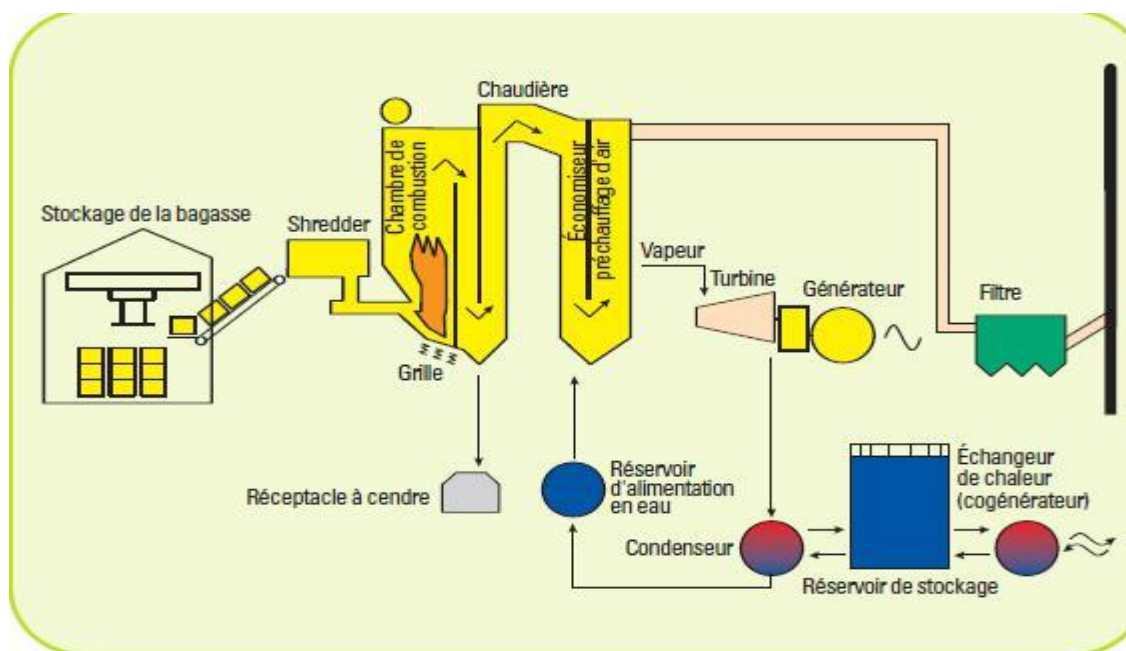


Figure I (8) : le principe de la biomasse

**Les intérêts de la biomasse :**

- C'est une source d'énergie renouvelable à condition de bien gérer les forêts.
- Son coût est compétitif et le prix varie peu.
- C'est une énergie moins polluante que les énergies fossiles.
- C'est une énergie dont la valorisation est créatrice d'emplois locaux. [1]

#### IV-4 La Géothermie :

##### Introduction

La géothermie (du grec “Gê”, la terre, et “Thermie”, la chaleur) consiste à capter la chaleur de la croûte terrestre pour produire du chauffage (température inférieure à 90°) ou de l’électricité (température entre 90 et 150°).

Le problème principal de la géothermie est que c’est une énergie qui ne se transporte pas ou très peu. Le transport de l’eau chaude dans les canalisations coûte cher et les pertes sont très importantes.

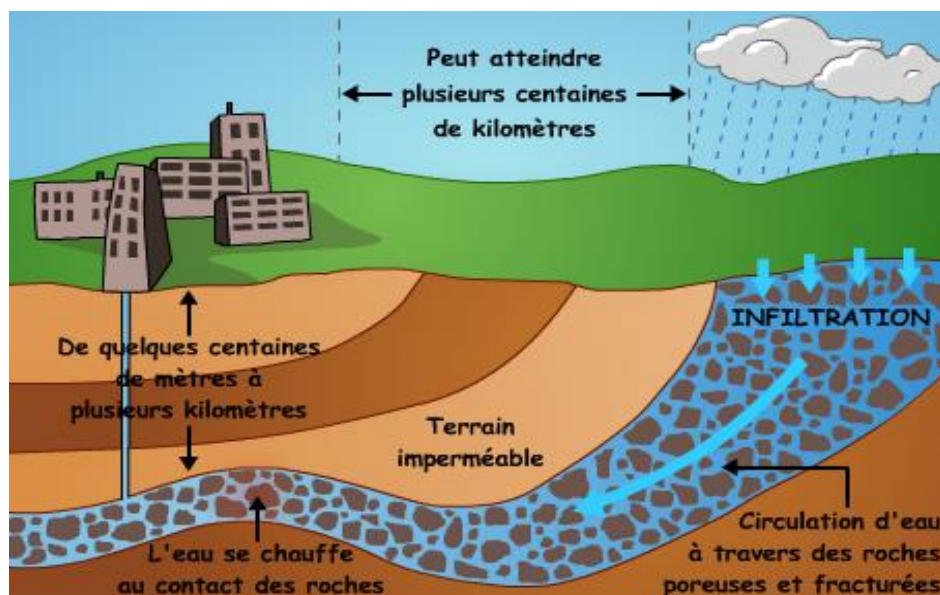


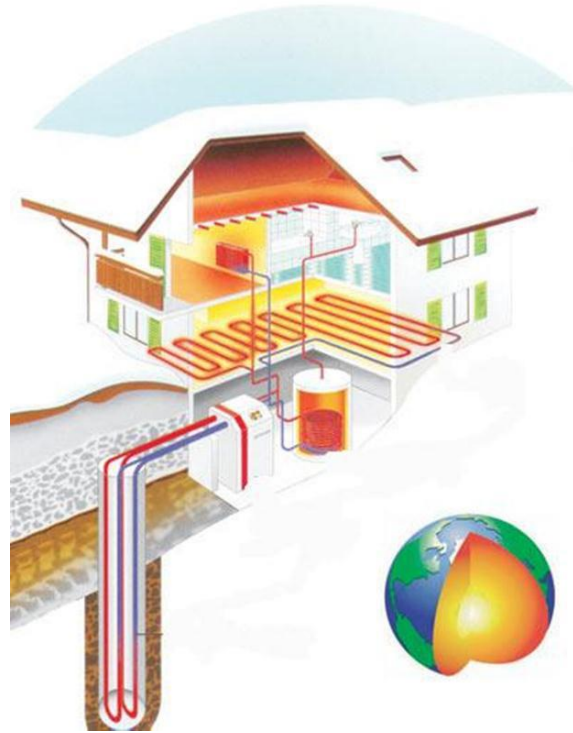
Figure I (9) : le principe de la géothermie

##### Fonctionnement

Le principe consiste à extraire l’énergie géothermique contenue dans le sol pour l’utiliser sous forme de chauffage ou pour la transformer en électricité.

Par rapport à d’autres énergies renouvelables, la géothermie profonde ne dépend pas des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent).

Tout bêtement la chaleur du sol chauffe de l’eau que l’on envoie dans les maisons, ou la chaleur du sous-sol transforme de l’eau en vapeur qui fait tourner une turbine ...



### Les avantages

- C'est une source d'énergie gratuite, renouvelable et dont l'exploitation ne coûte pas cher. Les installations qui utilisent la géothermie ne polluent pas l'atmosphère.
- La température, au sein des couches terrestres, reste assez constante.

### Les limites

C'est une énergie qui se transporte difficilement. Elle doit être utilisée sur place. Les investissements pour pomper l'eau chaude peuvent parfois être importants. [2]

## IV-5 L'énergie solaire :

### IV-5-1 Introduction :

L'énergie solaire se nourrit des rayons du soleil, pour chauffer de l'air emprisonné entre deux plaques qui va chauffer de l'eau, qui circule dans la maison. Cela sert aussi à chauffer un réservoir qui alimente la douche.

L'énergie solaire est transmise à la Terre à travers l'espace sous forme de particules d'énergie, les photons et de rayonnement.

L'énergie solaire peut être captée et transformée en chaleur ou en électricité grâce à des capteurs adaptés.



#### IV-5-2 Les panneaux solaires :

L'énergie solaire se nourrit des rayons du soleil, pour chauffer de l'air emprisonné entre deux plaques qui va chauffer de l'eau, qui circule dans la maison. Cela sert aussi à chauffer un réservoir qui alimente la douche.

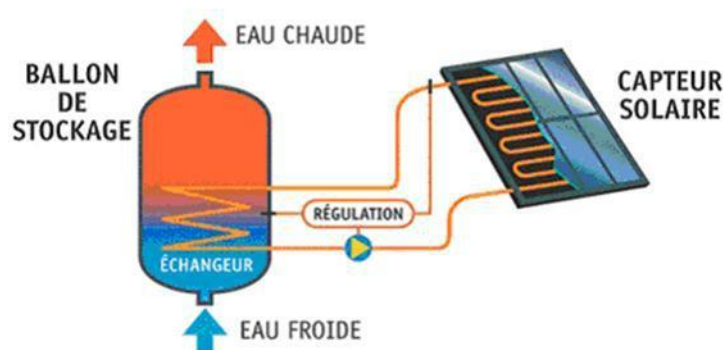


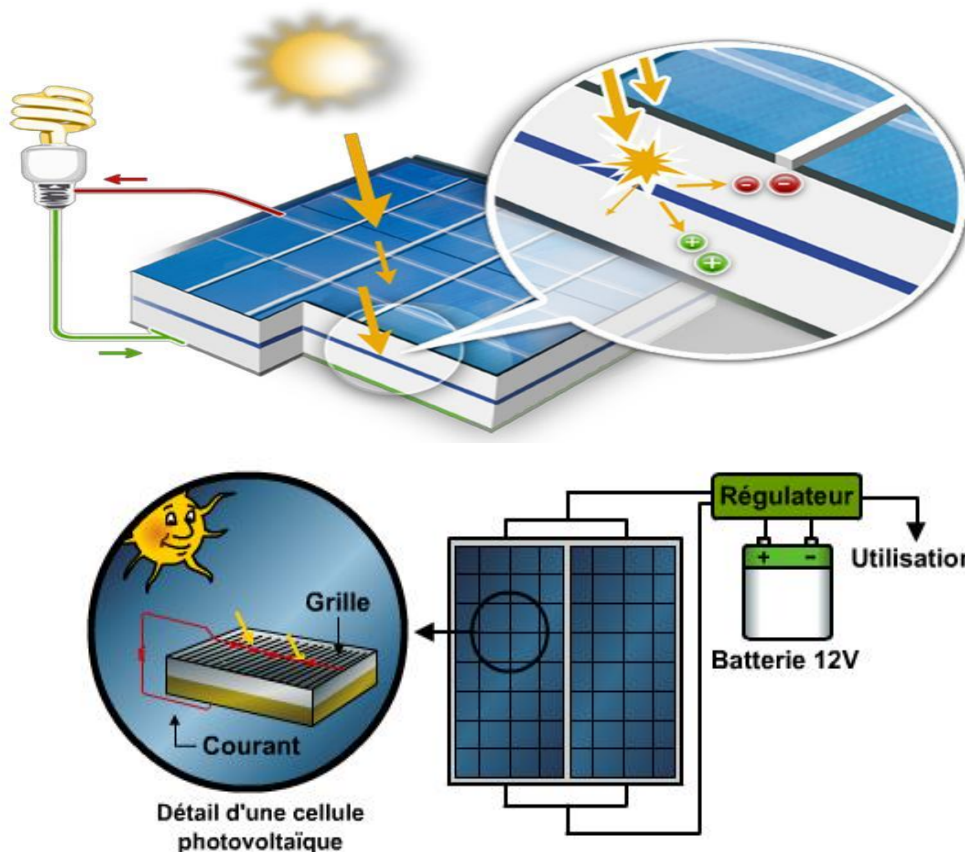
Figure I (10) : schéma présentative d'un capteur solaire

#### IV-5-3 Les cellules photovoltaïques :

Les cellules solaires sont formées de fines lamelles d'un matériau semi-conducteur, qui transforment directement le rayonnement solaire en électricité.

Les panneaux sont constitués de plusieurs modules. Un module regroupe plusieurs cellules photovoltaïques entre elles.

L'énergie photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique : une borne négative et une borne positive, la lumière met en mouvement des électrons pour créer un courant électrique continu. Cette source de lumière est naturelle (soleil) donc renouvelable.



#### IV-5-4 Les avantages

- C'est une énergie renouvelable peut être utilisée dans de nombreuses régions même les moins ensoleillées.
- C'est une énergie dont l'utilisation ne pollue pas l'atmosphère.
- Pour la production d'eau chaude sanitaire et pour le chauffage, les coûts d'installation ne sont pas très élevés (quelques milliers d'euros).

#### IV-5-5 Les limites

- La nuit, la source d'énergie n'existe plus, il faut donc prévoir des systèmes de stockage.
- La production d'électricité à partir du solaire est pour l'instant encore assez coûteuse car les cellules photovoltaïques sont chères à fabriquer.

**V- Conclusion :**

Aujourd'hui, les énergies renouvelables représentent 13,5% de la consommation totale d'énergie comptabilisée dans le monde et 18% de la production mondiale d'électricité. La biomasse assure l'essentiel de cette production (10,6%).

La production électrique renouvelable provient principalement de l'hydraulique 90%.

Le reste est très petit : biomasse 5,5%, géothermie 1,5%

Un des grands problèmes avec l'énergie, c'est le transport dans le temps ou l'espace. C'est particulièrement vrai avec les énergies renouvelables qui dépendent du climat et varient énormément dans le temps. 5% et le solaire 0,05%. La France doit pour 2012 baisser ses émissions de CO<sub>2</sub> de 8% nous devons donc soit développer les énergies renouvelable ou baisser notre consommation d'énergie.

Les énergies renouvelables sont plus développées dans certains pays mais l'énergie renouvelable coûte cher, 8 centimes d'euro par kilowatt/heure pour une éolienne alors qu'un kilowatt/heure d'une centrale nucléaire coûte 3 centimes seulement et une centrale produit plus.

Une éolienne produit 1,3 kilowatt/heure

Une centrale produit 1300 kilowatt/heure

Une centrale = 4000 éoliennes

## **Chapitre 2**

# **Etude théorique de la conversion photovoltaïque**

## I- L'énergie solaire

### I-1 Introduction :

Les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.

Il existe plusieurs types de sources d'énergies renouvelables parmi eux : l'énergie hydroélectrique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Les sources d'énergies renouvelables proviennent directement ou indirectement du soleil. Elles sont donc disponibles indéfiniment tant que celui-ci brillera. L'énergie photovoltaïque est la plus jeune des énergies renouvelables, elle a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable.

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies ensuite avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker d'énergie électrique pendant les heures sans soleil.

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. La quantité d'énergie libérée par le soleil et captée par la planète terre pendant une heure et pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an.

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 Watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre pour une distance moyenne terre-soleil de 150 Millions de km, c'est ce que l'on appelle la constante solaire qui est égale à  $1367 \text{ W/m}^2$ . La partie d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air (AM). Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de  $1000 \text{ W/m}^2$  et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, et perdant plus d'énergie.

Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à  $1000 \text{ W/m}^2$ .

### I-2 Rayonnement solaire :

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22  $\mu\text{m}$  à 10  $\mu\text{m}$ . La figure (II-1) représente la variation de la répartition spectrale énergétique.

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement a :

- 9% dans la bande des ultraviolets ( $<0,4 \mu\text{m}$ ),
- 47% dans la bande visible ( $0,4 \text{ à } 0,8 \mu\text{m}$ ),
- 44% dans la bande des infrarouges ( $>0,8 \mu\text{m}$ ).

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1,37 kilowatt au mètre carré ( $\text{kW/m}^2$ ), a plus ou moins 3 %, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement  $1200 \text{ W/m}^2$ .

La rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires et quotidiennes qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus. [3]

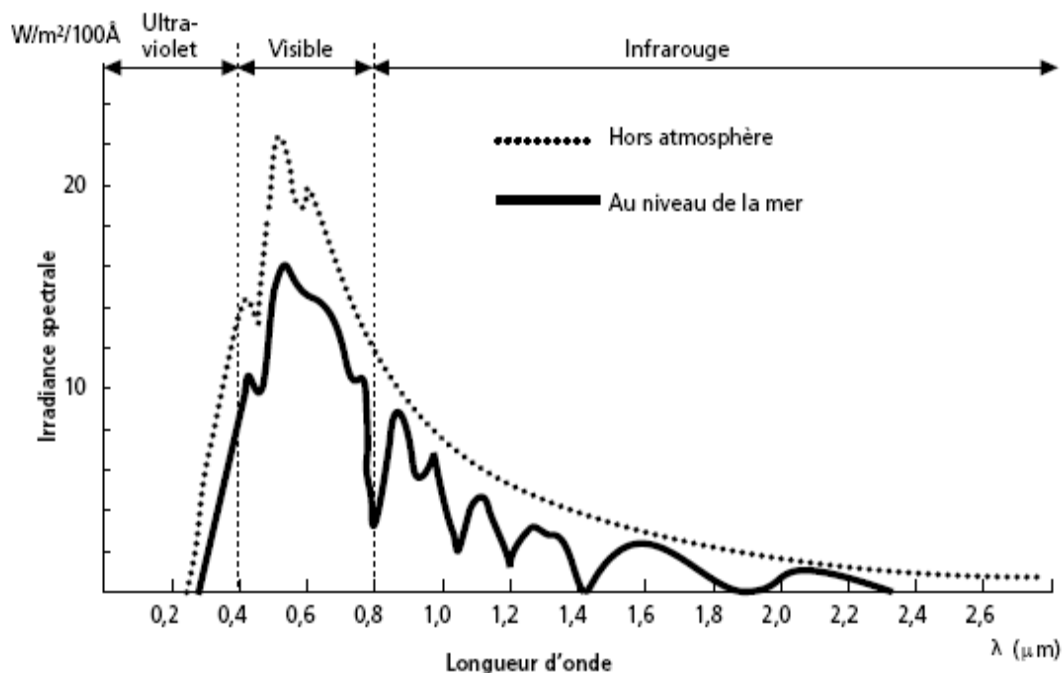


Figure (II-1) Analyse spectrale du rayonnement solaire [4].

Il y a quatre types de rayonnement :

- **Rayonnement direct** : rayonnement reçu directement du soleil. Il peut être mesuré par un **pyrhéliomètre**.
- **Rayonnement diffus** : rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un **pyranomètre** avec écran masquant le soleil.
- **Rayonnement solaire réfléchi** ou l'albédo du sol : le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).
- **Rayonnement global** : la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un **pyranomètre** ou un **solarimètre** sans écran.

À noter que certains capteurs solaires concentrent le rayonnement solaire afin d'augmenter le rendement du capteur par rapport à une surface donnée. Ces capteurs à concentration ne peuvent utiliser que le rayonnement direct provenant du soleil. Dans les endroits avec une forte proportion d'ensoleillement diffus, ces capteurs ne peuvent pas fonctionner efficacement car l'ensoleillement diffus ne peut être concentré en un point. [13]

## II- Conversion photovoltaïque :

La possibilité de transformer directement l'énergie lumineuse, et en particulier le rayonnement solaire en énergie électrique est apparue en 1954 avec la découverte de l'effet photovoltaïque. Cet effet utilise les propriétés quantiques de la lumière permettant la transformation de l'énergie incidente en courant électrique dont la cellule solaire ou photopile, est l'élément de base de cette conversion photovoltaïque.

### II-1 L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide de composant semi-conducteur appelé cellule solaire.

L'effet photovoltaïque ne peut se produire que s'il existe une barrière de potentiel dans le semi-conducteur avant qu'il ne soit éclairé. Une telle barrière existe, par exemple, à l'interface entre deux volumes dopés différemment c'est à dire où l'on a introduit deux types différents d'impuretés à concentration différente, par exemple de type P-N.

Si ce matériau est éclairé, les charges électriques, rendus mobiles par la lumière (l'effet photoélectrique), seront séparées par la barrière avec d'un côté les charges positives et de l'autre côté les charges négatives.

Parmi les matériaux semi-conducteurs les plus utilisés on trouve le silicium, le germanium, le sulfure de Gallium et l'arséniure de Gallium. [5]

## II- 2 Le principe de conversion photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p.

La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. 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. Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi un pair électron - trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel le courant électrique circule, voir la figure (I-2).

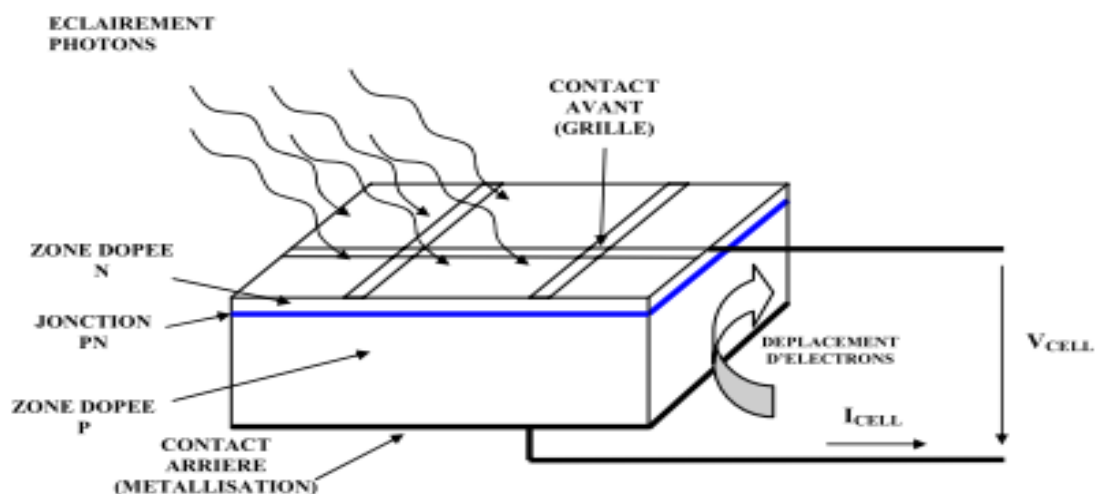
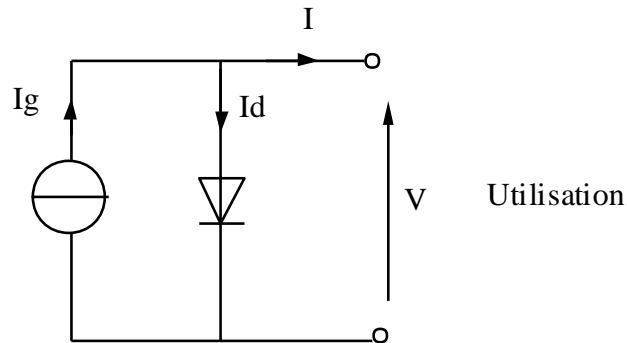


Figure (II-2) Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque.

### III-La cellule photovoltaïque :

#### III-1 Modélisation :

On peut modéliser une cellule photovoltaïque éclairée comme ci-dessous.



$I_g$  : courant généré  $I_d$  : courant de diode  $I$  : courant disponible

**Figure (II-3) : modèle d'une cellule photovoltaïque**

#### Cellule éclairée

Le courant disponible  $I$  sera :

$$I = I_g - I_d \text{ avec } I_g = K \cdot \emptyset$$

( $K$  étant une constante due à la fabrication de la cellule et  $\emptyset$  : l'insolation en  $W/m^2$ )

En court-circuit,  $V = 0$  donc  $I_d = 0$  d'où  $I_{cc} = I_g = K \cdot \emptyset$ .

**Le courant de court-circuit est donc proportionnel à l'insolation.**

En circuit ouvert,  $I = 0$  et  $I_d = I_g$ .

#### Cellule dans l'obscurité

Si la cellule n'est pas éclairée,  $I_g = 0$  et la cellule se comporte comme une diode, donc comme un récepteur.

#### III- 1-1 Groupement en série :

Dans un groupement en série figure (II-4-a), les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné. La figure (II-4-b) montre la caractéristique résultante ( $I_s$ ,  $V_s$ ) obtenue par l'association en série (indice  $s$ ) de  $ns$  cellules identiques ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ).

Avec :

$I_{scc} = I_{cc}$ : le courant de court-circuit.

$V_{sco} = nsV_{co}$ : la tension de circuit ouvert.

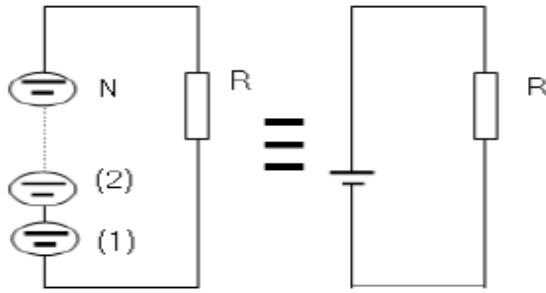


Figure (II-4-a) Association des modules en série.

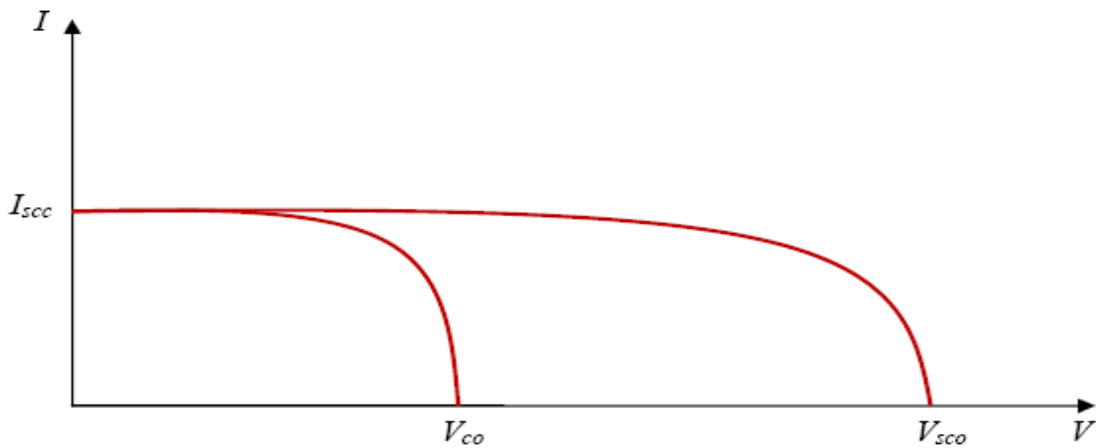


Figure (II-4-b) Caractéristique résultante d'un groupement en série de n cellules identiques.

III-1-2 Groupement en parallèle :

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle figure (II-5-a), les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée. La figure (II-5-b) montre la caractéristique résultante ( $I_{pcc}$ ,  $V_{pco}$ ) obtenue en associant en parallèle (indice p)  $np$  cellules identiques ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ). [6]

$I_{pcc} = npI_{cc}$ : le courant de court-circuit.

$V_{pco} = V_{co}$ : la tension de circuit ouvert.

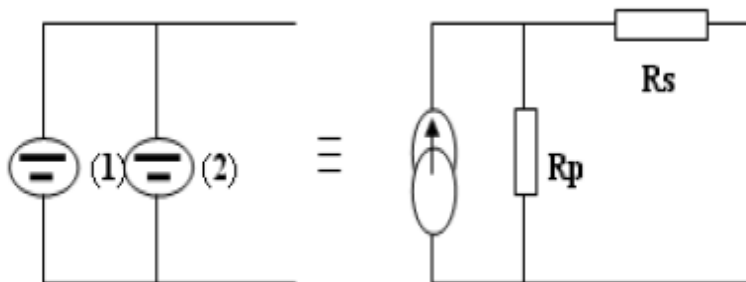


Figure (II-5-a) Association des modules en parallèle.

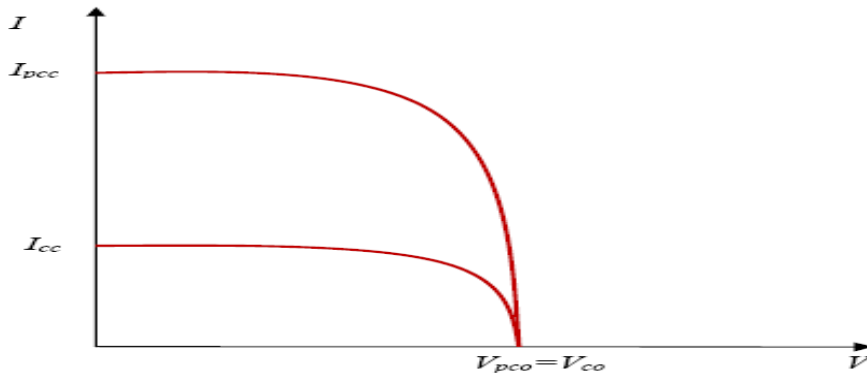


Figure (II-5-b) Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de n cellules identiques.

**III-1-3 Groupement mixte (série-parallèle) :**

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques regroupés par panneaux photovoltaïques figure (II-11-a). La caractéristique électrique globale courant/tension du GPV se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par deux affinités de rapport  $ns$  parallèlement à l'axe des tensions et de rapport  $np$  parallèlement à l'axe des courants, ainsi que l'illustre la figure (II-11-b),  $ns$  et  $np$  étant respectivement les nombres totaux de cellules en série et en parallèle.

$g_{cc} = np \cdot I_{cc}$ : courant de court-circuit du module résultant.

$V_{gco} = n \cdot V_{co}$ : tension du circuit ouvert du module résultant.

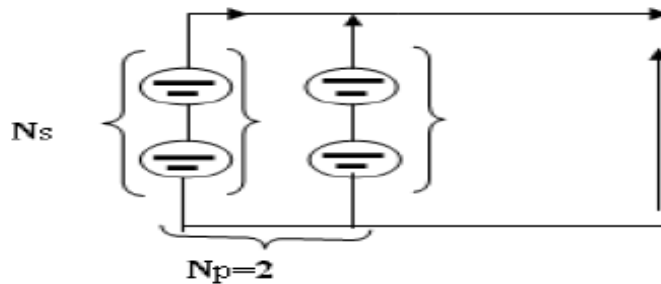


Figure (II-6-a) Association mixte des modules.

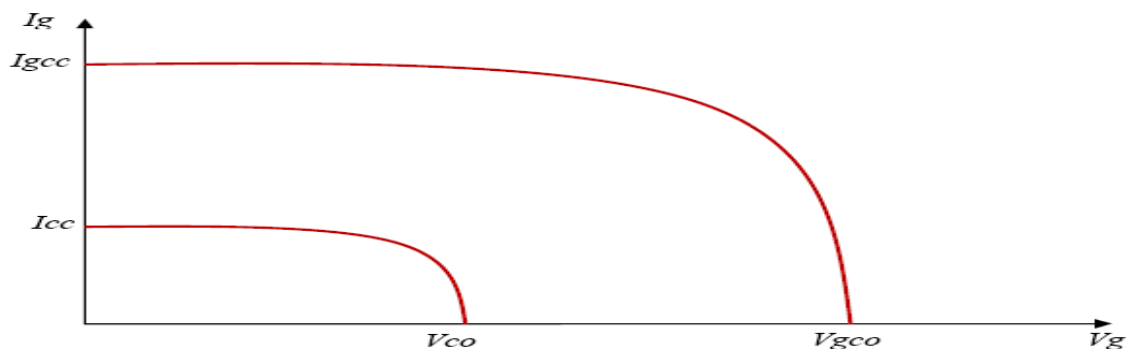


Figure (II-6-b) Caractéristique résultante d'un groupement mixte.

Les générateurs photovoltaïques sont alors réalisés en vue d'augmenter la tension (Groupement en série) ou augmenter le courant (Groupement en parallèle) par l'association d'un grand nombre de cellules élémentaires de même technologie et de caractéristiques identiques. Le câblage série-parallèle est donc utilisé pour obtenir un module PV (ou panneau PV) aux caractéristiques souhaitées (courant et tension suffisants).

### III-2 Caractéristique Tension – Courant :

La caractéristique tension – courant se déduit de la modélisation proposée ci-dessus

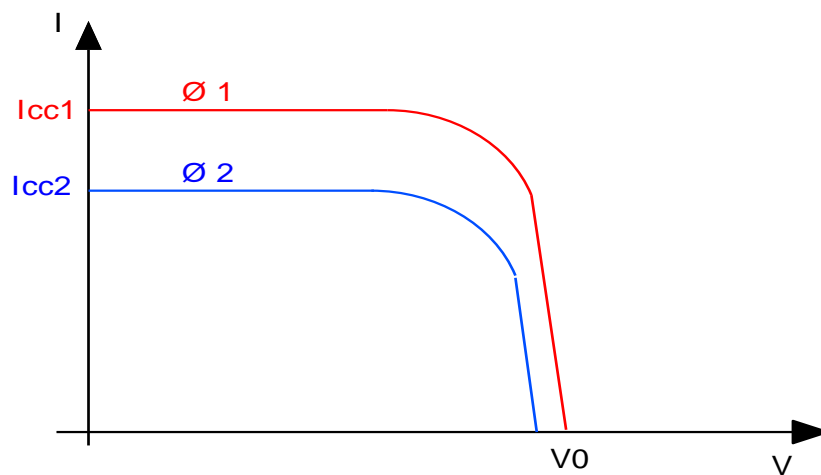


Figure (II-7) : Caractéristique tension – courant

La caractéristique tension – courant dépend de l'ensoleillement  $\varnothing$ .

### III-3 Caractéristique Puissance-Tension :

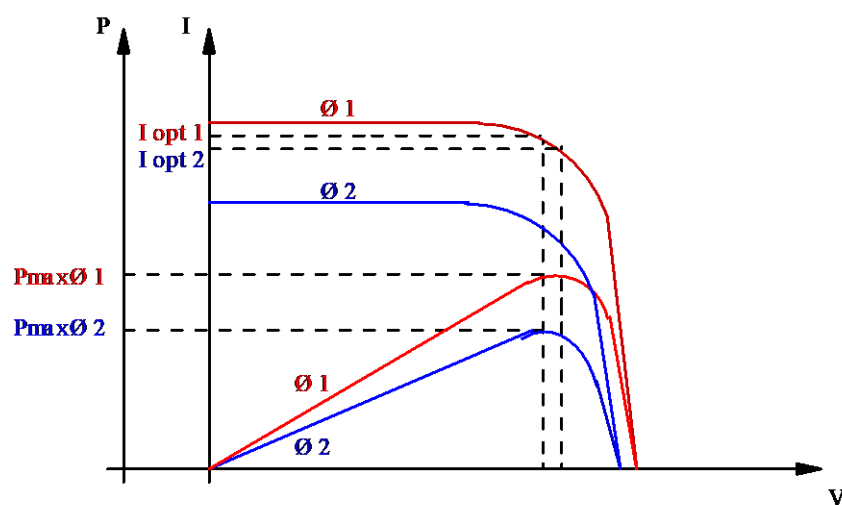


Figure (II-8) : Caractéristique tension – puissance

La puissance optimale (max) est pratiquement proportionnelle à l'ensoleillement  $\varnothing$  [7]

### III- 4 La cellule solaire :

On appelle cellule solaire un convertisseur qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. La photopile ou cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque.

Il existe trois grands types de silicium : mono cristallin, poly cristallin et amorphe.

#### III-4-1 Cellule au silicium monocristallin :

Pour ce genre d'applications technologiques, le silicium pur est obtenu à partir de la silice de quartz ou de sable par transformation chimique métallurgique.

Le silicium a un rendement électrique et une durée de vie de l'ordre de deux fois celle du silicium amorphe, mais il est nettement plus cher.

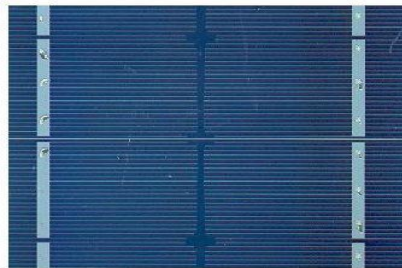


Figure (II-9) Cellule au Silicium Monocristallin.

#### III-4-2 Cellule au silicium poly-cristallin :

Le silicium poly-cristallin est un matériau composé de cristaux juxtaposés obtenus par moulage. Ce matériau est moins coûteux (que le mono-cristallin). Les cellules carrées ou rectangulaires sont faciles à utiliser.



Figure (II-10) Cellule au Silicium Poly cristallin.

#### III- 4-3 Cellule au silicium amorphe :

Le silicium absorbe le rayonnement solaire jusqu'à 100 fois mieux qu'en état cristallin ; les cellules sont constituées par des couches très minces. [8]

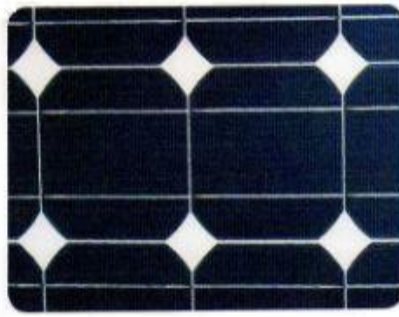


Figure (II-11) Cellule au Silicium amorphe (couche mince).

### III-5 Les modules photovoltaïques :

Les modules photovoltaïques sont généralement constitués de cellules connectées en série pour obtenir des tensions compatibles avec les charges à alimenter. On compte généralement entre 32 et 36 cellules en série pour une tension nominale de 12 V.

#### III-5-1 Association de modules :

##### Mise en série

En mettant  $N$  modules identiques en série, le courant dans la branche reste le même et la tension aux bornes de la branche est  $N$  fois plus grande que celle d'un module.

Afin de limiter la tension inverse aux bornes d'un module, il est nécessaire de placer une diode de by-pass aux bornes de chaque module.

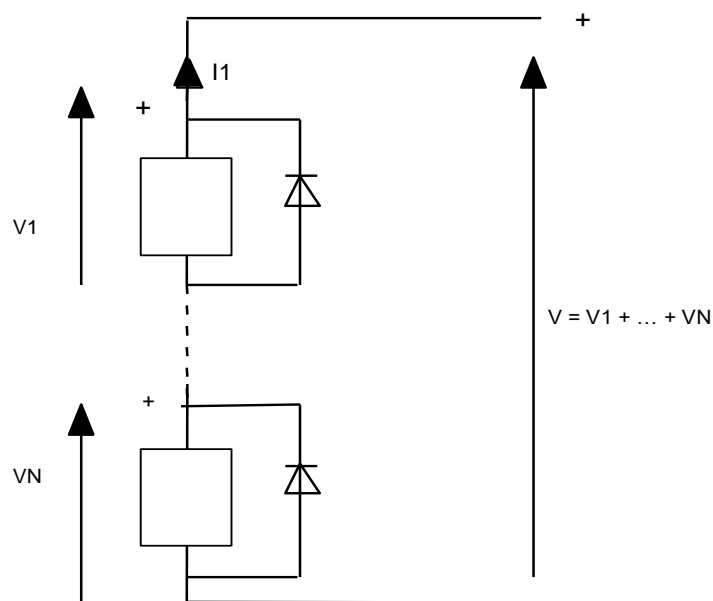


Figure (II-12) : Mise en série

### Mise en parallèle

En mettant N modules identiques en parallèle, la tension de la branche reste la même et le courant total est N fois le courant d'un module.

Afin d'éviter qu'un module devienne récepteur, il faut mettre une diode en série dans chaque branche. [9]

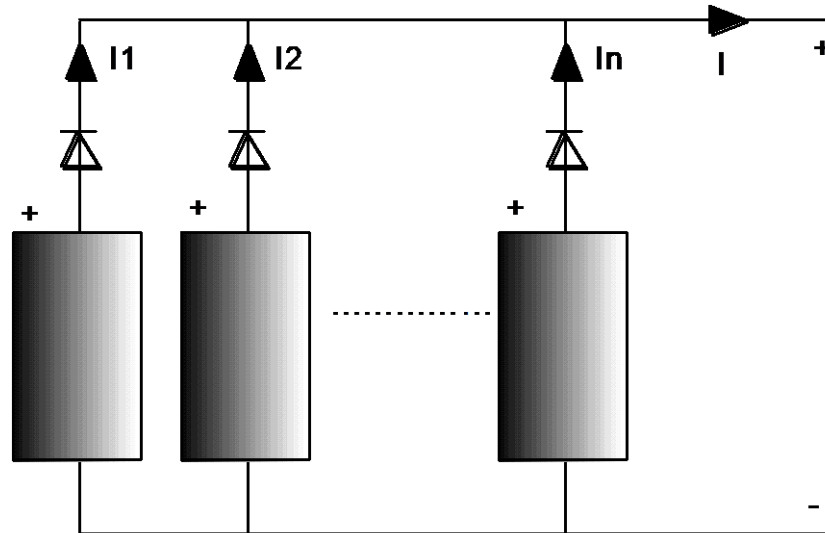


Figure (II-13) : Mise en parallèle

### III-5-2 Caractéristiques électriques :

La puissance des modules s'exprime en watts-crête : c'est la puissance électrique maximale délivrée dans les conditions suivantes :

- Éclairement de  $1 \text{ kW} / \text{m}^2$  (exposition perpendiculaire aux rayons du solaire à midi par temps clair)
- Répartition spectrale du rayonnement dit AM 1,5 correspondant au rayonnement solaire parvenant au sol après avoir traversé l'atmosphère à  $45^\circ$
- Température des photopiles à  $25^\circ \text{C}$

Le constructeur fournit également les coordonnées  $U_{\text{opt}}$ ,  $I_{\text{opt}}$ , points correspondant à la puissance maximale. Le constructeur donne aussi le courant de court-circuit pour un ensoleillement de  $1000 \text{ W} / \text{m}^2$ .

### III-6 Caractéristique d'un module solaire :

#### III- 6-1 Caractéristique courant-tension I(V) :

C'est une caractéristique fondamentale du module solaire type MSX62 d'un nombre de cellule ( $N_s=36$ ) définissant cet élément comme générateur. Elle est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalé le long de l'axe du courant d'une quantité

directement proportionnelle à l'éclairement. Elle se trace sous un éclairement fixe et une température constante figure (II- 14). [7]

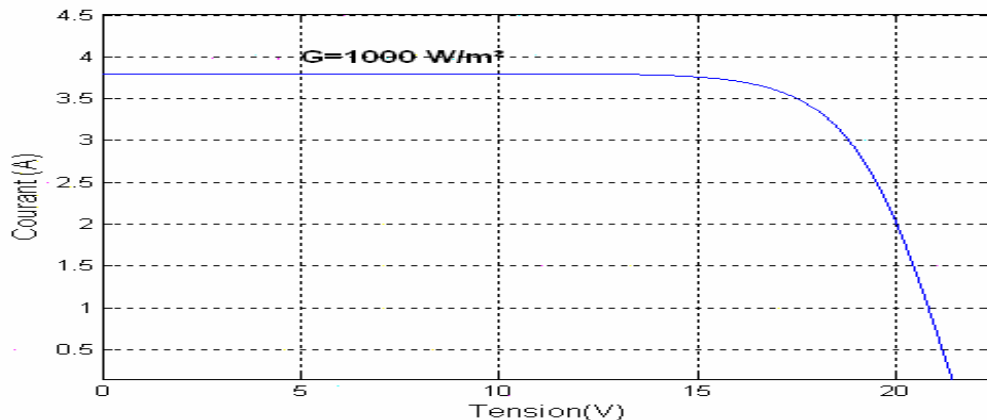


Figure (II-14) Caractéristique I(V) d'un module solaire, T=25°C.

**III- 6-2 Caractéristique puissance-tension P(V) :**

La puissance débitée par le module photovoltaïque dépend du point de fonctionnement de cette dernière ; c'est le produit de l'intensité de courant et de la tension entre ses bornes figure (I-8). Le point « M » représente la puissance maximale débitée par le module. [7]

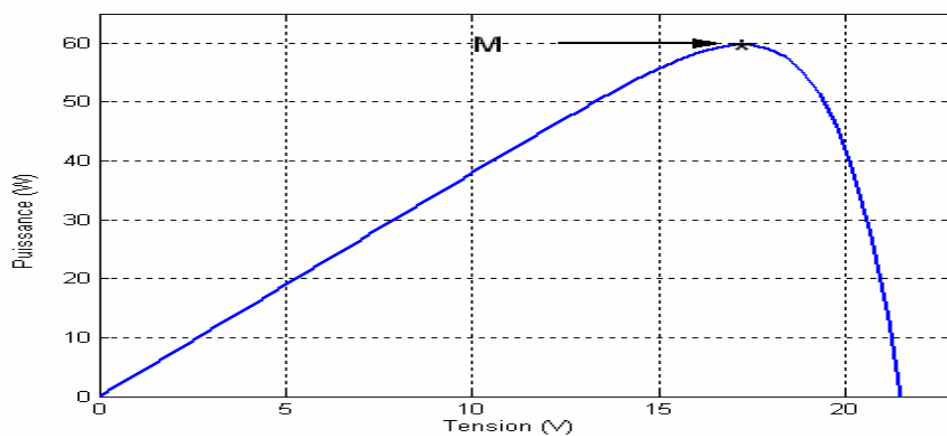


Figure (II-15) Caractéristiques P (V) d'un panneau solaire, T=25°C.

**IV-Facteur de forme :**

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairement dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée Pmax) pour un point de fonctionnement

PM (IM,VM) de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et ICC et tension comprise entre 0 et VOC) .

Ce point PM est obtenu en modifiant la valeur de la résistance externe, quand l'aire du rectangle défini par les axes Ox, Oy et les droites x = IM et y= VM passe par un maximum.

Le nom "facteur de forme" (fill factor) dérive de la représentation graphique. Il est défini par la relation suivante : [11]

$$ff = \frac{P_m}{V_{oc} \times I_{cc}} = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{cc}}$$

La puissance maximale délivrée à la charge est présentée :  $P_m = V_m \times I_m$

### V- Rendement de conversion :

Le rendement,  $\eta$  (efficiency) des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_{in}$ .

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{ff \times V_{oc} \times I_{cc}}{P_{in}}$$

$P_{in}$  : Puissance incidente = P solaire = 100 W/cm<sup>2</sup>.

La densité de puissance incidente égale à :  $\frac{P_{in}}{A}$

A : section de la cellule.

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert [3].

Le rendement varie généralement entre 8 à 13% pour le silicium mono-cristallin, entre 7 à 11% pour le poly-cristallin et entre 4 et 9% pour la cellule au silicium amorphe [11].

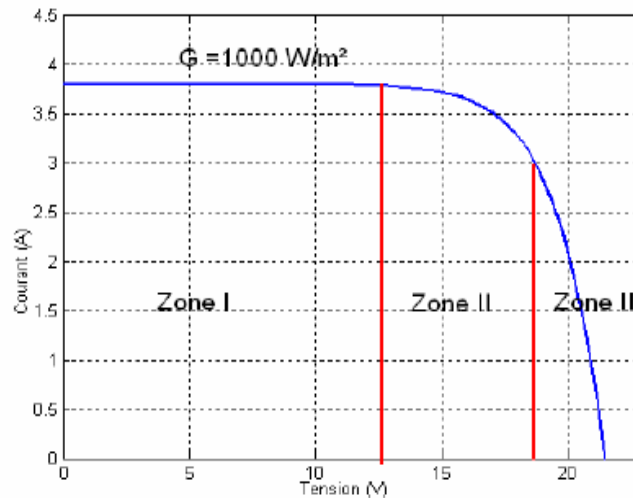
### VI-Zones de fonctionnement du module solaire :

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairage et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement ; seule la courbe  $I \square V \square$  est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure (I.12) représente trois zones essentielles :

**La zone (I)** : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

**- La zone (II)** : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

- **La zone (III)** : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension. [5]



**Figure (I.16) : Les différentes zones de la caractéristique I (V), T=25°C.**

### VII- Fonctionnement optimal du générateur :

Dans les conditions données, c'est au point de puissance maximale que l'on exploite au mieux la puissance crête installée. C'est pourquoi ce point est souvent qualifié de point de puissance optimale, terme traduisant mieux le caractérisé relatif aux conditions d'éclairement et de température de la puissance fournie, l'utilisation du générateur étant le plus souvent considérée comme optimal en ce point. Ce point est alors noté  $(V_{opt}, I_{opt})$ .

Le point fonctionnement  $(V_p, I_p)$  du générateur est défini par l'intersection de sa caractéristique électrique avec celle de la charge. Seule une charge dont la caractéristique passe par le point  $(V_{opt}, I_{opt})$  permet d'en extraire la puissance optimale disponible dans conditions considérées et l'impédance statique optimale de charge vaut alors

$$R_{opt} = V_m / I_m = V_{opt} / I_{opt}$$

Etant donné que ce point dépend totalement des conditions telles que l'éclairement  $G$  et la température, il en est de même de l'impédance de charge optimal.

L'utilisation optimale du générateur consiste alors à ce que sa charge conserve à chaque instant les valeurs optimales  $R_{opt}$  lorsque les conditions varient : il y a donc lieu d'effectuer en permanence l'adaptation d'impédance nécessaire.

### VIII- Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

Malgré les avantages qu'elle présente, l'énergie photovoltaïque présente certains inconvénients qui peuvent être résumés comme suit :

### VIII-1 Les avantages :

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages à savoir :

- une haute fiabilité – elle ne comporte pas de pièces mobiles – qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. D'où son utilisation sur les engins spatiaux.
- le caractère modulaire des panneaux photovoltaïque permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissance allant du milliwatt au Mégawatt.
- le coût de fonctionnement est faible vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni personnel hautement spécialisé.
- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions. [8]

### VIII-2 les inconvénients :

- la fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium est de 28%).
- les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.

Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru.

La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis. [8]

## IX- L'ensoleillement :

### IX-1 Le spectre solaire :

Le rayonnement solaire est un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10  $\mu\text{m}$ .

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- 9 % dans la bande des ultraviolets ( $\lambda < 0,4 \mu\text{m}$ )
- 47 % dans le visible ( $0,4 \mu\text{m} < \lambda < 0,8 \mu\text{m}$ )
- 44 % dans la bande des infrarouges ( $\lambda > 0,8 \mu\text{m}$ )

Sur Terre, le spectre solaire est modifié en intensité (de l'ordre de  $1000 \text{ W / m}^2$ ) et en distribution spectrale énergétique. Cette modification est due à l'absorption par l'atmosphère.

### **IX-2 Les saisons :**

La division de l'année en saisons résulte de l'inclinaison de  $23^\circ$  de l'axe de rotation de la terre par rapport à son plan de translation autour du soleil. Comme l'axe des pôles garde au cours de l'année, une direction fixe dans l'espace, c'est tantôt le pôle nord, tantôt le pôle sud qui est éclairé par le soleil, et la durée du jour aux différents points du globe varie.

Au solstice de juin, le soleil passe au zénith du tropique du Cancer et l'hémisphère sud connaît les jours les plus courts. Au solstice de décembre, le soleil passe au zénith du tropique du Capricorne et l'hémisphère sud connaît les jours les plus longs.

Aux équinoxes (qui signifie « égal à la nuit ») de mars et de septembre, le soleil se trouve exactement dans le plan de l'équateur, de sorte qu'en tout point du globe, la durée du jour est égale à celle de la nuit.

### **IX-3 La latitude :**

#### **IX-3-1 Situation géographique et climatique :**

L'île de la Réunion est située à la longitude  $55^\circ$  Est et à la latitude  $21^\circ$  dans l'hémisphère sud. Elle est toute proche du tropique du Capricorne.

Sous cette latitude, il n'y a que deux saisons, l'été et l'hiver. En été, c'est la saison des pluies et des cyclones. L'hiver est une saison plutôt sèche.

#### **IX-3-2 Inclinaison des modules suivant la latitude :**

En moyenne, sur une année, l'énergie maximale récupérée sera obtenue pour une inclinaison égale à la latitude avec une orientation vers l'équateur.

Une inclinaison plus forte que la latitude augmente l'énergie récupérée en hiver aux dépens de celle récupérée en été.

Inversement, une inclinaison plus faible que la latitude augmente l'énergie récupérée en été aux dépens de celle récupérée en hiver.

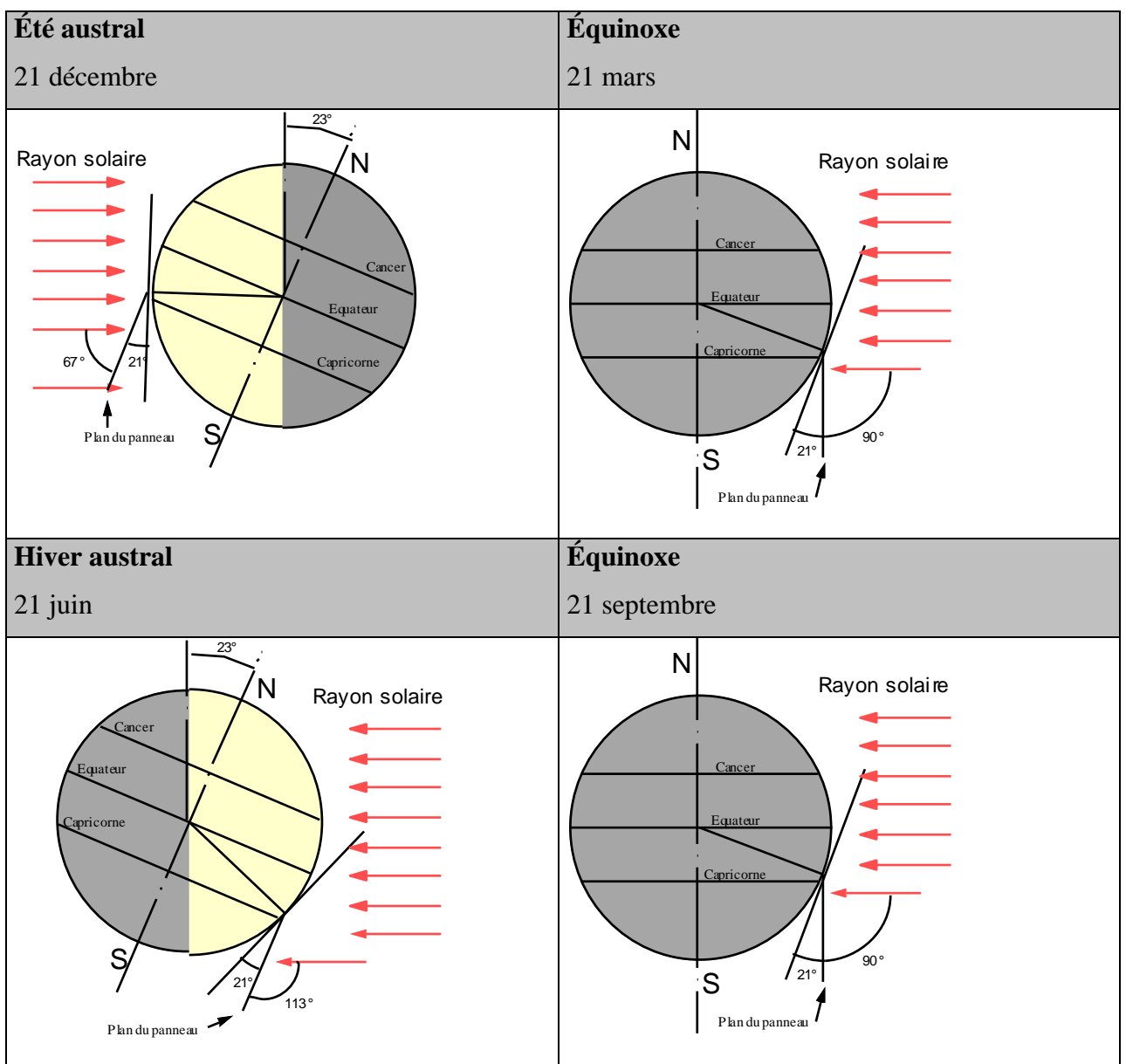
Ces considérations seront prises en compte lors du dimensionnement d'un système solaire.

Supposons que l'île est située dans l'hémisphère sud à la latitude  $21^\circ$ , les panneaux solaires seront donc orientés vers le nord, à une inclinaison de  $21^\circ$ .

**IX-3-3 Angle des rayons solaires en fonction des saisons sur le plan du panneau solaire :**

Le panneau solaire est incliné à  $21^\circ$  en direction du nord. Les angles des rayons solaires sont donnés **pour midi solaire**.

En été austral, les rayons solaires, à midi, ont un angle de  $67^\circ$  par rapport à la surface du panneau photovoltaïque incliné à  $21^\circ$  vers le nord.



**Figure (II-17) : Variation de l'ensoleillement au cours d'une journée**

**Remarque**

Pour le site de « l'île », l'ensoleillement moyen en hiver est moins intense qu'en été (environ 1/3 de moins). La durée du jour est peu fluctuante en fonction des saisons (13 heures en été et 11 heures en hivers).

**X- Avenir du photovoltaïque :**

Source d'énergie 100% propre et faible pour des usages très variés, elle figurera à l'avenir parmi les principales sources mondiales. Son handicap majeur reste un coût encore élevé comparée aux sources conventionnelles et aux filières renouvelables. Ce coût diminue de 10% par an, et pour accélérer cette baisse, les autorités nationales et internationales doivent engagés une politique de soutien à long terme de la filière photovoltaïque. C'est précisément l'objectif des programmes lancés depuis quelques années dans plusieurs pays industrialisés. Dans notre pays, l'application du PV reste encore modeste. La première utilisation été dans le domaine des télécommunications. Après, certain puits dans les hauts plateaux ont été équipés par des systèmes de pompes PV. A nos jours, quelques dizaines de village saharien de la région de Tamanrasset et Adrar jouissent des avantages de cette source d'énergie.

**XI- Secteurs d'applications :****➤ Domaine spatial**

C'est de loin le secteur le plus ancien puisque les premières utilisations de cellules solaires pour des engins spatiaux (satellites, navettes,...) remontent aux années soixante. Depuis lors, des recherches et développements nombreux ont été réalisés dans le domaine militaire (NASA aux Etats-Unis) et public (ESA en Europe) pour accroître les performances électriques tout en réduisant le poids des modules.

**➤ Habitation isolée**

L'approvisionnement en électricité dans les régions rurales isolées est un problème d'actualité, en particulier dans les pays en voie de développement. L'extension du réseau pour des demandes relativement faibles et isolées n'est pas rentable pour les sociétés d'électricité.

De nombreuses organisations internationales d'aide aux pays en voie de développement ont choisi la technologie photovoltaïque comme outil de développement social et économique pour fournir des services de base à la population, tels que :

- Le pompage de l'eau pour la consommation du village ou pour l'irrigation, la réfrigération pour la production de glace et la conservation de vaccins, sang, produits agricoles,...
- l'éclairage (lampe portative, éclairage public, électrification villageoise, ...)

➤ **Industrie isolée**

Beaucoup d'applications professionnelles exigent une source d'électricité hautement fiable, autonome, sans entretien et sans combustible. Le générateur photovoltaïque est de loin l'option la plus séduisante; on l'utilise avec succès dans les télécommunications (stations relais pour TV, radio, téléphonie, émetteur-récepteur,...), mais aussi pour d'autres applications telles que:

- protection cathodique,
- systèmes silencieux ou sans vibration,
- éclairage, balises et signaux pour la navigation,
- équipement de monitoring,
- télémétrie, etc.

➤ **Centrale de puissance**

Avec les applications photovoltaïques connectées au réseau d'électricité national, une nouvelle tendance se dégage ; elle est caractérisée par un fort potentiel de diffusion dans les pays industrialisés. La plupart des projets utilisent des champs de capteurs plans, mais on expérimente aussi les systèmes à concentration dans les régions riches en rayonnement direct.

Lorsque la pointe de la demande est en phase avec l'ensoleillement, la centrale photovoltaïque connectée au réseau permet de fournir les pointes. C'est le cas dans le sud des E.U. où la demande est maximum aux heures les plus ensoleillées à cause du conditionnement d'air omniprésent.

➤ **Résidence urbaine**

Le générateur photovoltaïque connecté au réseau est aussi envisagé en zone urbaine avec l'installation de modules sur les toits et façades de bâtiments.

La façade photovoltaïque suscite beaucoup d'enthousiasme en Europe et aux E.U.; le recouvrement des façades de bâtiments commerciaux - où la consommation est essentiellement diurne - correspond mieux aux heures d'ensoleillement. L'orientation verticale (ou quasi) peut être avantageuse dans nos régions de haute latitude pour rehausser la production au creux de l'hiver.

Cependant, l'apport énergétique d'une façade recouverte de modules photovoltaïques risque d'être assez négligeable par rapport aux consommations de bâtiments commerciaux. En réalité, l'enthousiasme découle du fait que le revêtement à l'aide de panneaux solaires photovoltaïques reviendrait pratiquement au même prix qu'un recouvrement à l'aide de matériaux classiques.

➤ **Biens de consommation**

L'électronique moderne requiert de très petites puissances - du milliwatt à la dizaine de Watt de sorte que beaucoup de petits appareils peuvent être alimentés par une petite surface de cellules photovoltaïques. Les calculatrices et les montres sont de loin les applications les plus connues.

Les chargeurs de batteries, radios, lampes de poche, luminaires de jardin, systèmes d'alarme, jouets, fontaines, tondeuses à gazon, etc., sont d'autres exemples et cette liste n'est pas limitative.

La plupart de ces mini-générateurs photovoltaïques utilisent des cellules au silicium amorphe, bon marché et mieux appropriées aux faibles illuminations et petites puissances. Ils constituent une alternative très intéressante aux piles qui comportent des risques divers de contamination de l'environnement par les métaux lourds principalement. Le Japon est le principal producteur et consommateur de ces articles. [7]

## **XII- Conclusion :**

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable qui provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein des matériaux bien particuliers tels que les semi-conducteurs (le silicium, le Germanium, l'Arséniure des Galium,...). Afin de la rendre réalisable physiquement, elle nécessite un équipement complémentaire dit Système photovoltaïque, contenant les composants d'amélioration nécessaires qui rendent l'électricité produite consommable (régulation, conversion CC/AC...).

Dans ce chapitre on a présentés des notions générales sur les systèmes photovoltaïques, synthèse d'assemblage des panneaux et une spécification des différentes zones de fonctionnement et les avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.



## **Chapitre 3**

# **Méthodes simples de calcul et de choix des éléments d'une installation photovoltaïque sur site isolé**



## **I- Introduction :**

Il existe de nombreux sites isolés alimentés par des systèmes autonomes de génération d'électricité. Ces générateurs utilisent les sources renouvelables locales. On y trouve des panneaux photovoltaïques, des éoliennes et des micro-turbines. L'électricité provenant des sources renouvelables est intermittente, et dépendante des conditions climatiques. Ces générateurs renouvelables sont couplés généralement à un système de stockage assurant une disponibilité en continue d'énergie.

Le dimensionnement d'une installation photovoltaïque revient à déterminer le nombre nécessaire de panneaux solaire constituant le champ photovoltaïque pour adopter un système PV suffisant pour couvrir les besoins de la charge à tout instant ainsi que la capacité de charge de la batterie.

## **II- Méthodes de dimensionnement d'un système PV :**

Il existe plusieurs méthodes de dimensionnement d'un système PV : par la fonction utilisabilité horaire, par la probabilité de pertes d'énergie, par les méthodes itératives...etc

Nous proposons une démarche simple quand il s'agit d'une alimentation d'un foyer domestique, cependant, la démarche est de plus en plus complexe, à mesure que l'installation devienne importante, indépendante et surtout de charge importante.

Les principales étapes pour réaliser une installation photovoltaïque peuvent se résumer comme suit :

- Définir les différents types de générateurs de production électrique.
- Opter pour un schéma de principe d'un système photovoltaïque.
- Etablir les fiches techniques et fonctions des différents éléments d'une alimentation électrique à énergie solaire.
- Concevoir un système photovoltaïque avec tous ses éléments indispensables.

### **II-1 Différents types de générateurs de production électrique :**

- Générateurs chimiques
- Générateurs thermiques
- Centrales hydroélectriques
- Centrales éoliennes
- Générateurs photovoltaïques

## Chapitre 3 Méthode simple de calcul et de choix des éléments d'une installation photovoltaïque sur site isolé

- Solution hybride

### II-2 Schéma de principe d'un système photovoltaïque :

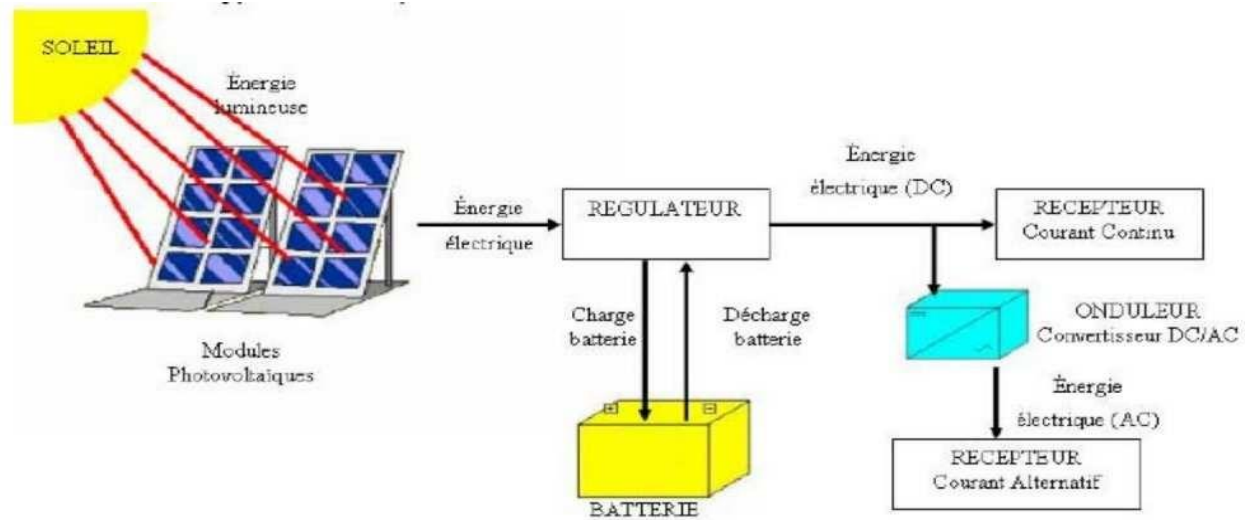


Figure 1: Schéma général d'un générateur photovoltaïque

### II-3 Fiches techniques du matériel solaire :

Gammes de panneaux solaires / Siemens

Type de module	SM110	SM100	SM110-L	SM100-L	SM55/SM50	SM50-H	SM46	SM20
<b>Caractéristiques électriques</b>								
Puissance nominale $P_{max}$ [ $W_p$ ]	110	100	110	100	55 / 50	50	46	20
Configuration	12/24 V	12/24 V	12/24V	12/24 V	12 V	12 V	12 V	12 V
Courant nominal $I_{U_{pp}}$ [A]	6,3/3,15	5,9/2,95	6,3/3,15	5,9/2,95	3,15 / 3,05	3,15	3,15	1,38
Tension nominale $U_{U_{pp}}$ [V]	17,5/35,0	17,0/34,0	17,5/35,0	17,0/34,0	17,4 / 16,6	15,9	14,6	14,5
Courant de court-circuit $I_{sc}$ [A]	6,9/3,45	6,5/3,25	6,9/3,45	6,5/3,25	3,45 / 3,4	3,35	3,35	1,6
Tension à vide $U_0$ [V]	21,7/43,5	21,0/42,0	21,7/43,5	21,0/42,0	21,7 / 21,4	19,8	18,0	18,0
<b>Caractéristiques physiques</b>								
Longueur $\text{ⓐ}$ [mm]	1321		1307		1293	1219	1083	567
Largeur $\text{ⓑ}$ [mm]	660		652		329	329	329	328
Profondeur $\text{ⓒ}$ [mm]	40		5,5		34	34	34	35
Profondeur avec boîte électrique [mm]	54		52		-	-	-	-

## Chapitre 3 Méthode simple de calcul et de choix des éléments d'une installation photovoltaïque sur site isolé

---

### ➤ Le Régulateur

Contrôleur de charge solaire : 8A / 12A / 20A / 30A

Optimisation de la charge de la batterie

Diagnostic de l'état de fonctionnement

Adaptation automatique à la tension 12 / 24V cc

Indication de l'état de charge

Protection de décharge



### ➤ Onduleur ou Convertisseur

Convertisseur continu / alternatif

Tension d'entrée : 12/24V cc

Tension de sortie : 230V ca – 50 Hz

Puissance : 550 W, 900 W



### ➤ Lampes à faible consommation d'énergie

Installation dans toute la douille standard E27

Puissance : 7 / 9 / ou 11 W

Rendement lumineux équivalent à une lampe standard de 60 W

Longue durée de service. [10]



## Chapitre 3 Méthode simple de calcul et de choix des éléments d'une installation photovoltaïque sur site isolé

### ➤ Réfrigérateur à faible consommation d'énergie



#### Technical Data:

	Sunfreezer 30	Sunfreezer 50	Sunfreezer 60
Kälteerzeuger Cold generator	Kompressor	Kompressor	Kompressor
Bau form	Kühlbox	Kühlbox	Kühlschrank
Design	Box	Box	Cabinet
Kühlvolumen	30 L	50 L	60 L
Cooling volume	30 L	50 L	60 L
Kühltemperatur	13°C bis 5°C	-20°C bis + 10°C	16°C bis 3°C
Cooling temperature	13°C bis 5°C	-20°C bis + 10°C	16°C bis 3°C
Abmessungen	42x37x51 cm	45x69,5x47,5 cm	47x62x46 cm
Dimensions	42x37x51 cm	45x69,5x47,5 cm	47x62x46 cm
Gewicht	17,5 Kg	23,6 Kg	22,5 Kg
Weight	17,5 Kg	23,6 Kg	22,5 Kg
Gefrierfach	-	-	12 L
Freezing Compartment	-	-	12 L
Energieverbrauch	*1) 90 Wh / Tag	*1) 200 Wh / Tag	*1) 90 Wh / Tag
Energy consumption	*1) 90 Wh / Tag	*1) 200 Wh / Tag	*1) 90 Wh / Tag

## Chapitre 3 Méthode simple de calcul et de choix des éléments d'une installation photovoltaïque sur site isolé

---

### II-4 Fonction des différents éléments d'un système photovoltaïque :

- La lumière du soleil : est le véritable « carburant » d'un système photovoltaïque.
- Le panneau solaire : convertit directement la lumière du soleil en tension continue.
- Le régulateur : fait la liaison entre les panneaux solaires, les batteries et les matériels qui consomment l'énergie. Il protège la batterie contre les surcharges et les décharges profondes.
- La ou les batterie(s) : stocke l'énergie électrique produite par les panneaux solaires.
- L'onduleur : transforme la tension continue en tension alternative.
- Les panneaux solaires doivent être placés dans les zones les plus ensoleillées et si possibles sans ombre.
- Entretien : les systèmes photovoltaïques sont un moyen simple et efficace de produire l'électricité. Les composants nécessitent peu d'entretien. Il est conseillé de contrôler régulièrement l'état de la batterie et des câbles. [11]

### III-Conception d'un système photovoltaïque, sur site isolé :

**Situation problème :** Dimensionner une installation photovoltaïque dans un site isolé

#### III-1 Démarche :

- Définir les besoins quotidiens en énergie électrique.
- Connaître le coefficient régional d'ensoleillement.
- Déterminer la puissance crête des panneaux solaires (Pcps).
- Calculer la capacité des batteries.

#### III-2 Calcul des besoins quotidiens en énergie :

##### Récepteurs alimentés sous tension continue cc

**Appareils**      Nombre N  
                         Puissance P  
                         Nb d'heures d'utilisation  
                         Consommation Wh/ jour

##### Lampes

Besoins quotidiens en énergie en courant continu :  $W_1 = N \times P \times t$

##### Récepteurs alimentés sous tension alternative

Besoins quotidiens en énergie en courant alternatif :  $W_2 = N \times P \times t$

## **Chapitre 3 Méthode simple de calcul et de choix des éléments d'une installation photovoltaïque sur site isolé**

---

Besoins quotidiens en énergie CC et CA :  $W_q = W_1 + W_2$

Coefficient de sécurité :  $W_p = 30 \% \text{ de } W_{12}$

Besoins quotidiens en énergie au total :  $W_t$

### **III-3 Coefficient régional d'ensoleillement :**

Une méthode simplifiée permet de calculer la puissance crête des panneaux solaires (**Pcps**) en déterminant un coefficient qui prend en compte :

- \* la situation géographique de la centrale solaire ;
- \* le rendement des batteries, de l'onduleur et des panneaux ;

Dans une zone où l'ensoleillement est important, le coefficient régional d'ensoleillement est de 0,20 / heure

Puissance crête des panneaux solaires (**Pcps**) :  $P_{cps} = W \cdot k_j$

**Pcps**: puissance crête des panneaux en Watt-crête (Wc)

**W** : Consommation en Wh

**k<sub>j</sub>** : Coefficient (prendre 0,20/heure)

### **III-4 Choix des panneaux solaires :**

La tension continue de l'installation est de 24 V par exemple :

Combien de panneaux de référence SM50 faut-il utiliser ? (Voir documentation sur panneaux Siemens) :

### **III-5 Calcul de la capacité des batteries :**

Pour cela, il faut utiliser la formule suivante :  $Q = \frac{W \cdot N}{U} \cdot k_s$

**Q** : Capacité(Ah)

**W** : Consommation en Wh **U** : Tension en V

**N** : Autonomie en Jours

**k<sub>s</sub>** : Coefficient de sécurité (prendre 1,25)

### **III-6 Choix des batteries :**

On peut choisir la batterie en fonction de ce que le fournisseur possède

Par exemple : deux types de batteries : **[10]**

- 63 Ah – 12V
- 100 Ah – 12V
- Etc

## **IV- Application à une installation solaire photovoltaïque :**

### **IV-1 Introduction :**

Dans cet exemple, nous proposons une étude simple juste pour mettre en évidence les paramètres essentiels à calculer afin d'atteindre le schéma électrique qui définira la disposition des panneaux solaires pour alimenter une installation isolée du réseau national. Pour ce faire, nous diviserons cette étude en trois parties :

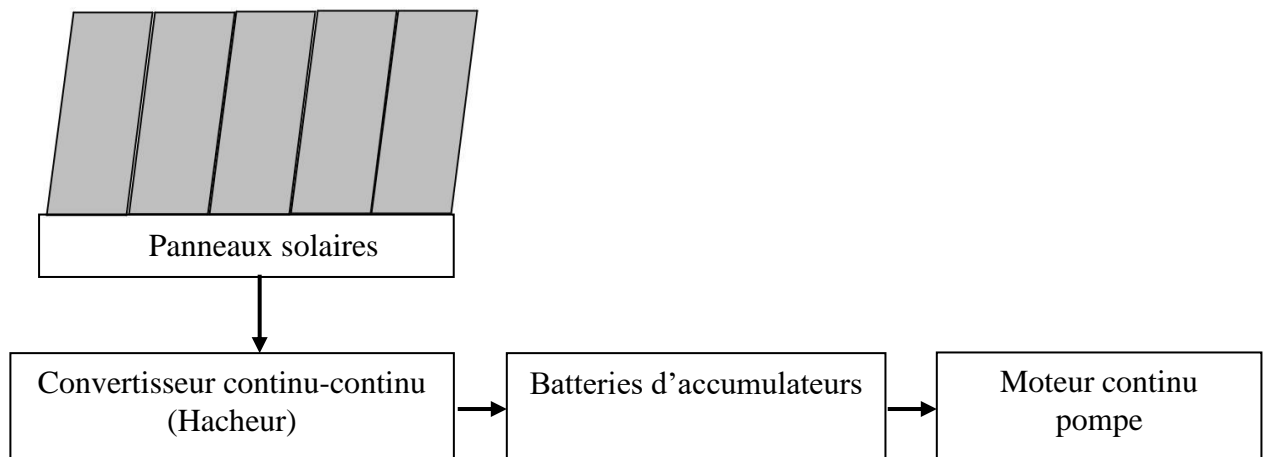
Partie A : Étude du Hacheur : convertisseur continu-continu

Partie B : Etude du moteur à courant continu entraînant la pompe

Partie C : Étude des panneaux solaires

### **IV-2 Données de l'installation :**

Une exploitation (peut être agricole) isolée, non raccordée au réseau national, produit l'énergie électrique dont elle a besoin à l'aide d'une installation solaire photovoltaïque. Le schéma de l'installation est représenté comme ci-dessous :



L'énergie électrique produite par les panneaux solaires peut être utilisée immédiatement, ou stockée dans des batteries d'accumulateurs, par l'intermédiaire d'un Hacheur (convertisseur continu-continu).

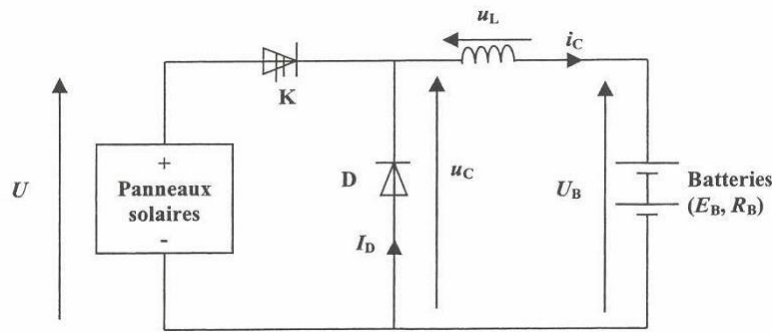
L'installation comporte une pompe, entraînée par un moteur à courant continu, permettant de fournir l'eau nécessaire à l'exploitation.

### **Partie A : Étude du Hacheur : convertisseur continu-continu**

- **Schéma du dispositif**

Pour charger les batteries d'accumulateurs on utilise un hacheur ; le schéma du dispositif est représenté comme suit :

## Chapitre 3 Méthode simple de calcul et de choix des éléments d'une installation photovoltaïque sur site isolé



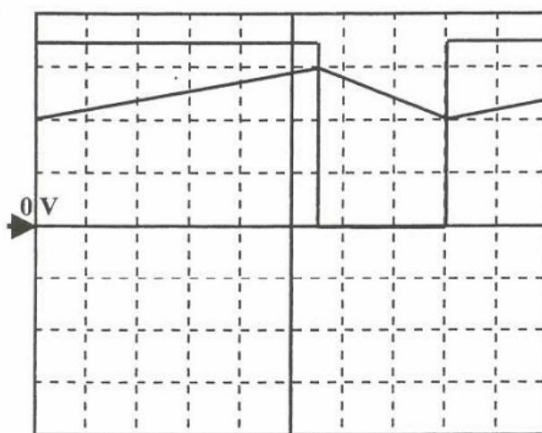
**K** est un interrupteur électronique, supposé parfait, commandé périodiquement.

Sur une période **T** de fonctionnement, **K** est fermé de **0** à  $\square T$  et ouvert de  $\square T$  à **T**.

La résistance de la bobine est négligeable : on pourra donc considérer que la valeur moyenne  $\langle u_L \rangle$  de la tension aux bornes de la bobine est nulle.

On visualise, sur la voie 1 d'un oscilloscope, la tension  $u_C$  aux bornes de la charge en fonction du temps.

Sur la voie 2 on visualise l'image de l'intensité  $i_C$  du courant dans la charge à l'aide d'une sonde de courant de sensibilité **100 mV/A**.



**Calibres :**  
 voie 1 : 20 V/Div  
 voie 2 : 0,5 V/Div

**Base de temps :**  
 5  $\mu$ s/Div

On peut aussi utiliser **un transistor de puissance** comme interrupteur électronique.

La bobine dans ce montage permet de lisser le courant dans le moteur (nécessité de la diode de roue libre)

Période et fréquence de fonctionnement du convertisseur.

$$T = 8 \times 5 \cdot 10^{-6} = 40 \mu\text{s} \quad f = 1/T = 25 \text{ KHz}$$

Valeur prend  $u_C$  quand l'interrupteur **K** est fermé et valeur prend  $u_C$  quand l'interrupteur **K** est ouvert

### Chapitre 3 Méthode simple de calcul et de choix des éléments d'une installation photovoltaïque sur site isolé

K fermé	K ouvert
$u_c = 70 \text{ V}$	$u_c = 0 \text{ V}$

La Valeur de la tension  $U$  aux bornes des panneaux solaires sera donc :  $U = 70 \text{ V}$

La Valeur du rapport cyclique  $\alpha$  de la tension  $u_c$  sera :  $\alpha = 5,6/8 = 0,7$

La valeur moyenne  $\langle u_c \rangle$  de la tension  $u_c$  :  $\langle u_c \rangle = \alpha \cdot U = 0,7 \times 70 = 49 \text{ V}$

- **En s'appuyant sur les relevés de la figure ci-dessus, déterminons les valeurs minimale et maximale de l'intensité  $i_c$  du courant. Calculons après sa valeur moyenne  $\langle i_c \rangle$ .**

Sur la voie 2, la valeur maximale correspond à 3 divisions, ce qui donnera :

3 divisions x 0,5 (calibre) = 1,5 V

D'après la sensibilité de la sonde utilisée qui de 100 mV/A on aura :

$$i_{max} = \frac{1,5 \cdot 1}{0,1} = 15 \text{ A}$$

Sur la voie 2, la valeur minimale correspond à 2 divisions, ce qui donnera :

2 divisions x 0,5 (calibre) = 1 V

D'après la sensibilité de la sonde utilisée qui de 100 mV/A on aura :

$$i_{max} = \frac{1,0 \cdot 1}{0,1} = 10 \text{ A}$$

On aura donc :  $I_{MAX} = 15 \text{ A}$   $I_{MIN} = 10 \text{ A}$

La valeur moyenne :  $\langle i_c \rangle = (I_{MAX} + I_{MIN})/2 = 12,5 \text{ A}$

#### Partie B : Etude du moteur à courant continu entraînant la pompe

La pompe fournissant l'eau nécessaire à l'exploitation agricole est entraînée par un moteur à courant continu à aimants permanents.

La plaque signalétique du moteur indique les données suivantes : **48V ; 3000 tr/min ; 550 W**

Les pertes mécaniques et magnétiques du moteur sont négligeables.

Les batteries d'accumulateurs délivrent une tension constante de valeur  $U_B = 48 \text{ V}$ .

Lors du fonctionnement de la pompe, on a mesuré l'intensité du courant dans le moteur :

**$I = 13,7 \text{ A}$ .**

## Chapitre 3 Méthode simple de calcul et de choix des éléments d'une installation photovoltaïque sur site isolé

- Déterminons le moment  $C_u$  du couple utile du moteur.

$$C_u = P_u / \Omega = (550 \times 60) / (2\pi \times 3000) = 1,75 \text{ Nm}$$

- Déterminons la puissance absorbée par le moteur.

$$P_a = U \cdot I = 48 \times 13,7 = 657,6 \text{ W}$$

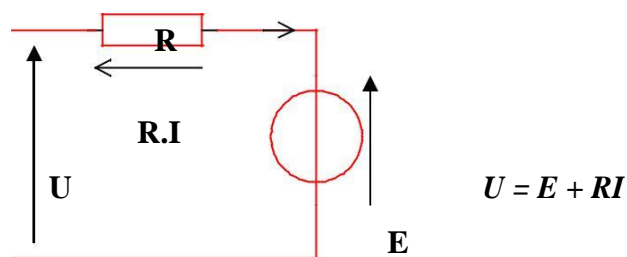
- Déterminons le rendement  $\eta$  du moteur.

$$\eta = P_u / P_a = 83,63 \%$$

- Déterminons les pertes par effet Joule dans l'induit du moteur et en déduire sa résistance  $R$ .

$$RI^2 = P_a - P_u = 657,6 - 550 = 107,6 \text{ W} \quad R = 107,6 / 13,7^2 = 0,57 \Omega$$

- Représentons le schéma du modèle équivalent de l'induit du moteur.



- Déterminons la valeur de la force électromotrice  $E$  du moteur.

$$E = U - R \cdot I = 48 - (0,57 \times 13,7) = 40,2 \text{ V}$$

- Relation entre la force électromotrice  $E$  et la fréquence de rotation  $n$  peut s'écrire :  $E = kn$  où  $k$  est une constante.  $E = K \cdot \Phi \cdot \Omega = (K \cdot \Phi \cdot 2\pi) \cdot n = k \cdot n$

- Calculer la valeur de  $k$  en précisant son unité.

$$k = E/n = 40,2/3000 = 0,0134 \text{ V/tr.min}^{-1}$$

- Déterminer, en donnant les justifications nécessaires, l'intensité  $I_d$  du courant de démarrage du moteur sous la **tension nominale**. Comparons  $I_d$  à  $I$  (13,7 A).

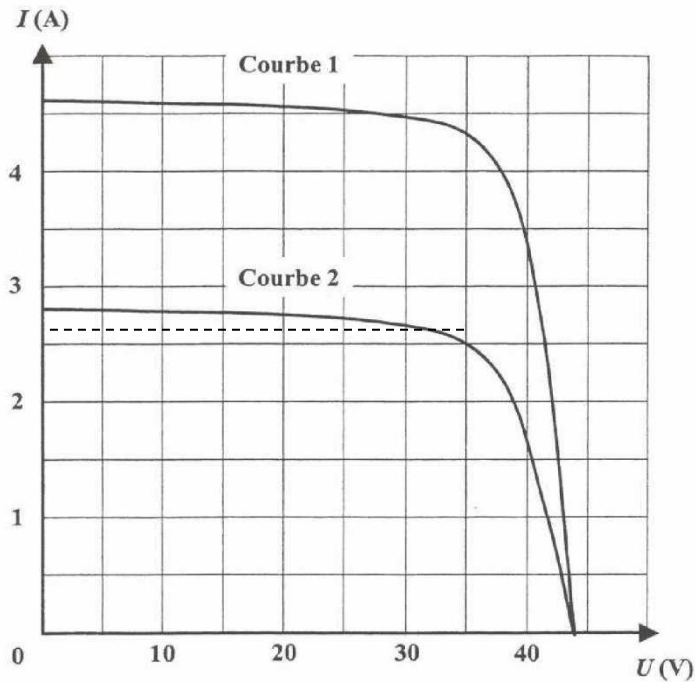
$$I_d = U/R = 48/0,57 = 84,21 \text{ A} \quad I_d \approx 6 \cdot I$$

### Partie C : Étude des panneaux solaires

Aucune connaissance préalable sur les panneaux solaires n'est nécessaire.

Un panneau solaire photovoltaïque produit de l'énergie électrique à partir de l'énergie lumineuse reçue. Il peut être considéré comme un générateur continu.

Les caractéristiques courant-tension d'un panneau solaire, pour deux ensoleillements différents, sont représentées sur la figure ci-dessous :



**1/ Etude dans le cas d'un ensoleillement optimal : la caractéristique courant-tension correspond à la courbe 1.**

- Déterminons la valeur de la tension à vide d'un panneau solaire.

La tension à vide  $U_{s0}$  du panneau solaire correspond à l'intersection de la courbe 1 avec l'axe des abscisses, c'est-à-dire l'axe des tensions, ce qui donne la valeur de 44V, on prendra donc

$$U_{s0} = 44V$$

- Déterminons l'intensité du courant de court-circuit.

Le courant de court-circuit  $I_{CC}$  correspond à l'intersection de la courbe 1 avec l'axe des ordonnées, c'est-à-dire l'axe des courants, ce qui donne la valeur de 4,6A on prendra donc

$$I_{sCC} = 4,6A$$

- Déterminons la puissance électrique fournie par le panneau pour une tension de fonctionnement égale à 35 V.

Si on considère une tension de fonctionnement de 35V, (*La tension de fonctionnement nominal d'un panneau à puissance maximale est égale à 35 V*)

on cherche sur la courbe 1 le courant correspondant qui est dans notre cas, d'après la courbe 1 égal à 4,3A ; on aura donc la puissance  $P_{\text{fonctionnement}} = P_f$ :

$$P_f = 35 \times 4,3 = 150,5 \text{ W}$$

- En déduire l'énergie électrique produite en 10 heures d'ensoleillement.

$$W_e = P_f \cdot t = 150,5 \times 10 = 1505 \text{ Wh}$$

## Chapitre 3 Méthode simple de calcul et de choix des éléments d'une installation photovoltaïque sur site isolé

### 2/ Etude dans le cas d'un ensoleillement plus faible : la caractéristique courant-tension correspond à la courbe 2.

- Déterminer la puissance électrique fournie par un panneau pour une tension de fonctionnement égale à **35 V**.

Si on considère une tension de fonctionnement de de 35V, on cherche sur la courbe 2 le courant correspondant, qui est dans notre cas, d'après la courbe 2 égal à 2,5A ; on aura donc la puissance  $P_{\text{fonctionnement}} = P_f$ :

$$P_f = 35 \times 2,5 = 87,5 \text{ W}$$

- Pour disposer d'une puissance suffisante pour alimenter l'exploitation, il faut associer plusieurs panneaux. Il faut combiner entre l'association série et l'association parallèle

L'intérêt d'une association en série : **Permet d'augmenter la tension**

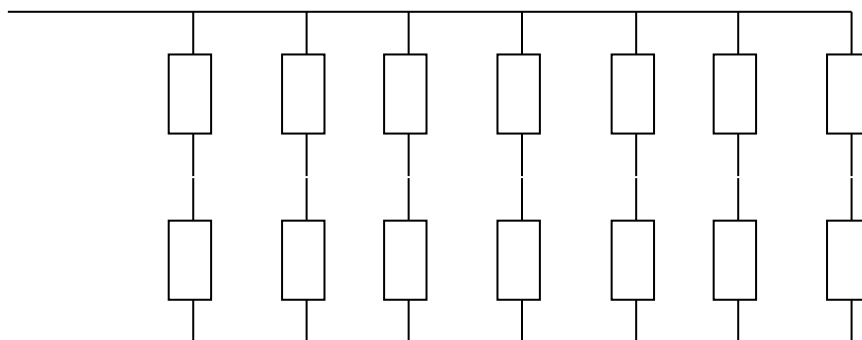
L'intérêt d'une association en parallèle : **Permet d'augmenter le courant**

- Supposons que la puissance maximale délivrée par chaque panneau vaut **150 W** et que l'installation doit pouvoir fournir une puissance maximale égale à **2100 W**. Combien de panneaux donc faut-il utiliser ?

$$n = \frac{2100}{150} = 14 \text{ panneaux}$$

- Nous avons souligné précédemment que la tension de fonctionnement nominal d'un panneau à puissance maximale est égale à **35 V** ; si l'installation doit délivrer une tension de **70 V**. Comment peut-on associer les panneaux

Nous donnons ci-dessous un schéma illustrant le mode d'association des 14 panneaux pour fournir une puissance maximale de 2100W.



- Déterminons alors l'intensité du courant débité par l'installation lors d'un fonctionnement à puissance maximale.

$$I = P/U = 2100/70 = 30 \text{ A}$$

**V- Conclusion :**

Nous pouvons conclure qu'avant toute installation électrique en photovoltaïque, il est nécessaire de suivre certaines étapes essentielles pour satisfaire le besoin en énergie et assurer la continuité de l'alimentation, pour cela, il faut tenir compte de certains paramètres comme : la puissance instantanée maximale de consommation, la tension de la batterie ou du parc de batterie, la consommation journalière, le coefficient de rendement global de l'installation et enfin, l'énergie électrique à produire chaque jour, pour déterminer la puissance totale des panneaux solaires à installer.

## **Chapitre 4**

# **Etude d'une alimentation d'une habitation par l'énergie photovoltaïque**

### I- Introduction :

Les panneaux solaires ou kits solaires ou systèmes photovoltaïques sont des systèmes qui permettent de transformer l'énergie du rayonnement solaire directement en électricité. Les panneaux solaires sont utilisés dans différents secteurs socio-économiques : habitat (éclairage, audiovisuel) rural, centres de santé, éclairage public.

Beaucoup de personnes l'utilisent dans leur habitation, dans les lieux de culte (mosquées, églises). Les panneaux solaires photovoltaïques assurent l'accès à l'énergie dans les zones enclavées et non desservies. Ils permettent d'éviter l'utilisation des énergies fossiles et d'atténuer les émissions de gaz à effet de serre en fournissant de l'énergie propre. Ses avantages économiques, sociaux et environnementaux sont significatifs comparés à d'autres technologies.

Notre étude consiste à alimenter, en énergie électrique, une maison individuelle, très éloignée du réseau électrique National. Cette maison est située dans une zone éloignée, une île par exemple. Nous prenons comme départ que l'habitation est, alimentée par un groupe électrogène de 4 kVA. La solution Groupe Electrogène étant trop coûteuse, trop bruyante, on envisage un autre moyen d'alimentation.

### II- Caractéristiques générales de l'énergie :

Tension alternative 230 V efficace

Fréquence 50 Hz

Forme sinusoïdale

Puissance nécessaire 2 kW

Régime de neutre TT

#### II-1 Les équipements :

- Séjour :**
- 4 prises de courant confort 2 P + T
  - 2 points lumineux en applique en va et vient
  - 1 point lumineux en applique en simple allumage
- Cuisine :**
- 3 prises de courant confort 2 P + T
  - 1 point lumineux au centre en va et vient
  - 1 point lumineux en applique en simple allumage
- Chambres 1 à 7 :**
- 3 prises de courant confort 2 P + T
  - 1 point lumineux au centre en va et vient
- SDB 1, 2, 3 :** 1 point lumineux au centre en simple allumage

1 point lumineux en applique en simple allumage

1 prise de courant confort 2 P + T

**WC 1, 2, 3 :** 1 point lumineux au centre en simple allumage

**Extérieur :** 2 points lumineux en montage minuterie

L'eau chaude sanitaire sera produite par un chauffe-eau solaire.

L'usage de cuisinière électrique est exclu, on optera plutôt pour 2 cuisinières, une fonctionnant au bois et l'autre au gaz.

### II-2 Les besoins énergétiques/

Soit à alimenter les éléments résumés dans le tableau suivant

	<b>Élément à alimenter</b>	<b>Nombre</b>	<b>Tension/Puissance</b>	<b>Temps d'alimentation</b>
<b>Séjour</b>	<b>Lampes</b>	<b>3</b>	<b>230V/25W</b>	<b>4 Heures</b>
<b>Cuisine</b>	<b>Lampes</b>	<b>2</b>	<b>230V/25W</b>	<b>2 Heures</b>
<b>Chambres</b>	<b>Lampes</b>	<b>7</b>	<b>230V/18W</b>	<b>1 Heure</b>
<b>SDB</b>	<b>Lampes</b>	<b>3</b>	<b>230V/18W</b>	<b>1,5 Heures</b>
	<b>Enseigne</b>	<b>1</b>	<b>24V/18W</b>	<b>3 Heures/jour</b>
	<b>Réfrigérateur</b>	<b>1</b>	<b>0,83 kWh/jour</b>	
	<b>Congélateur</b>	<b>1</b>	<b>0,72 kWh/jour</b>	
	<b>Téléviseur</b>	<b>1</b>	<b>230V/60W</b>	<b>3 Heures/jour</b>
	<b>Machine à laver</b>	<b>1</b>	<b>1 kWh/cycle</b>	
	<b>Fer à repasser</b>	<b>1</b>	<b>230V/1200W</b>	<b>2 Heures/Semaine</b>

**Tableaux IV (1) : tableau des besoins énergétiques du système**

**On sur-dimensionnera l'installation de 25 %.**

### II-3 Contraintes :

- Il n'est pas envisageable de raccorder ce site au réseau national, du fait de son éloignement.
- L'exploitation de l'installation ne devra pas nécessiter de personnel, l'entretien devra être minime.
- L'éloignement du site du réseau routier, impose que le réapprovisionnement en énergie devra se faire le moins souvent possible (4 fois par mois au maximum)
- On souhaite avoir au moins 4 jours d'autonomie en énergie.
- L'installation sera aussi soumise à des contraintes climatiques difficiles (fortes averses, vents violents, ...)

- Le site peut être touristique, il devra être préservé, autant que possible, de toute pollution (sonore, chimique, visuelle, ...)
- On posera comme exigence l'utilisation de constituants industriels courants.

### **III- Solution technologique :**

#### **III-1 Diverses possibilités :**

Lorsqu'une installation, ne peut pas être raccordée au réseau National en raison de son éloignement ou de contraintes d'environnement, on doit résoudre le problème de son alimentation en utilisant d'autres sources d'énergie.

Les solutions conventionnelles de remplacement utilisées (groupe électrogène, éclairage à gaz) présentent des inconvénients importants : approvisionnement et achat de carburant, fonctionnement intermittent, risques de défaillance, nuisances dues au bruit, frais d'exploitation et de maintenance élevés...

Les générateurs solaires, ou aussi les éoliennes, éliminent ces contraintes. Ils permettent de disposer de l'électricité de manière automatique, à tout moment, tout en garantissant sécurité et confort à l'utilisateur.

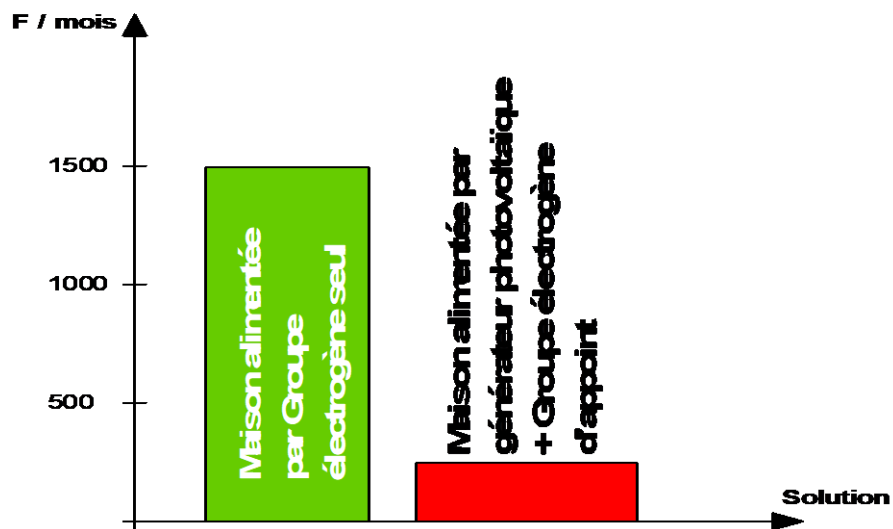
#### **III-2 Choix technologique : choix du photovoltaïque :**

Le site est supposé ne pas être très ventilé, le choix se portera donc sur la solution « générateur photovoltaïque + groupe électrogène d'appoint ». Les données d'ensoleillement fournies par le centre de météorologie doivent montrer que la zone concernée présente un ensoleillement satisfaisant tout au long de l'année.

#### **III-3 Critère économique :**

La solution mixte, générateur photovoltaïque + Groupe électrogène d'appoint permet de réduire le nombre de modules photovoltaïques installés.

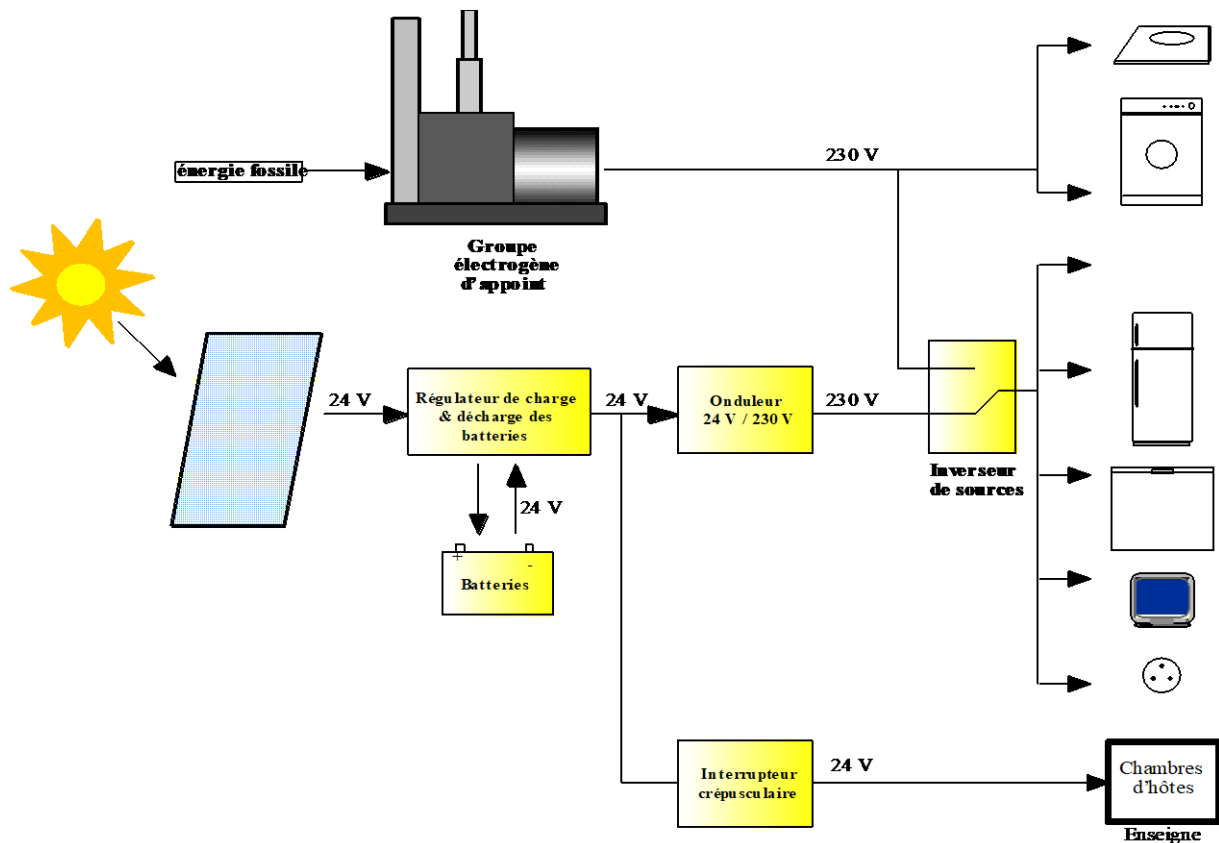
Le groupe électrogène est mis en fonctionnement uniquement en cas d'utilisation d'appareils de fortes puissances (machine à laver, fer à repasser, ...). Il fonctionne seulement quelques heures par semaine.



## IV-Description du système étudié

### IV-1 Présentation

Le système décrit ci-dessous est une homothétie de l'installation domestique réelle. L'équipement complet coûterait trop cher et n'apporterait rien de plus au niveau technologique et pédagogique.



Synoptique de l'installation

### IV-2 Description du fonctionnement :

L'énergie produite par les panneaux photovoltaïques est utilisée directement par les appareils d'utilisation de petites puissances. Le surplus est stocké dans les batteries pour compenser la décharge des batteries due à la consommation dans la nuit.

La charge et la décharge des batteries est contrôlée par un régulateur pour éviter la surcharge ou la décharge complète, facteur de vieillissement prématuré des batteries.

Un interrupteur crépusculaire assure l'allumage et l'extinction d'une enseigne publicitaire signalant l'établissement « Chambres d'hôtes ».

Le petit appareillage est alimenté par l'énergie photovoltaïque à travers un onduleur. Le groupe électrogène d'appoint est mis en fonctionnement lors de l'utilisation d'appareils de fortes puissances pendant quelques heures par semaine.

En cas d'absence de soleil pendant plusieurs jours, et ou en cas d'épuisement des batteries, il est possible de basculer toutes les charges sur le groupe électrogène.

### IV-3 Equipement du système étudié :

L'équipement du système étudié est résumé dans le tableau suivant

Elément à alimenter	Nombre	Tension/Puissance	sortie
<b>Panneaux</b>	<b>4</b>	<b>12V/48W</b>	
<b>Batteries</b>	<b>4</b>	<b>12V /105Ah</b>	<b>24/210Ah</b>
<b>Régulateur/décharge</b>	<b>1</b>	<b>24V - 30A</b>	
<b>Onduleur de tension</b>	<b>1</b>	<b>24V</b>	<b>230V/250VA</b>
<b>Interrupteur + Temporisateur</b>	<b>1</b>	<b>10s à 16 H</b>	
<b>Module d'acquisition de données, de télé contrôle et de télésurveillance</b>			
PC + logiciel SUNSOFT			
Groupe électrogène 4 KVA			

**Tableaux IV (2) : tableau des équipements du système étudié**

### IV-4 L'enregistrement des données :

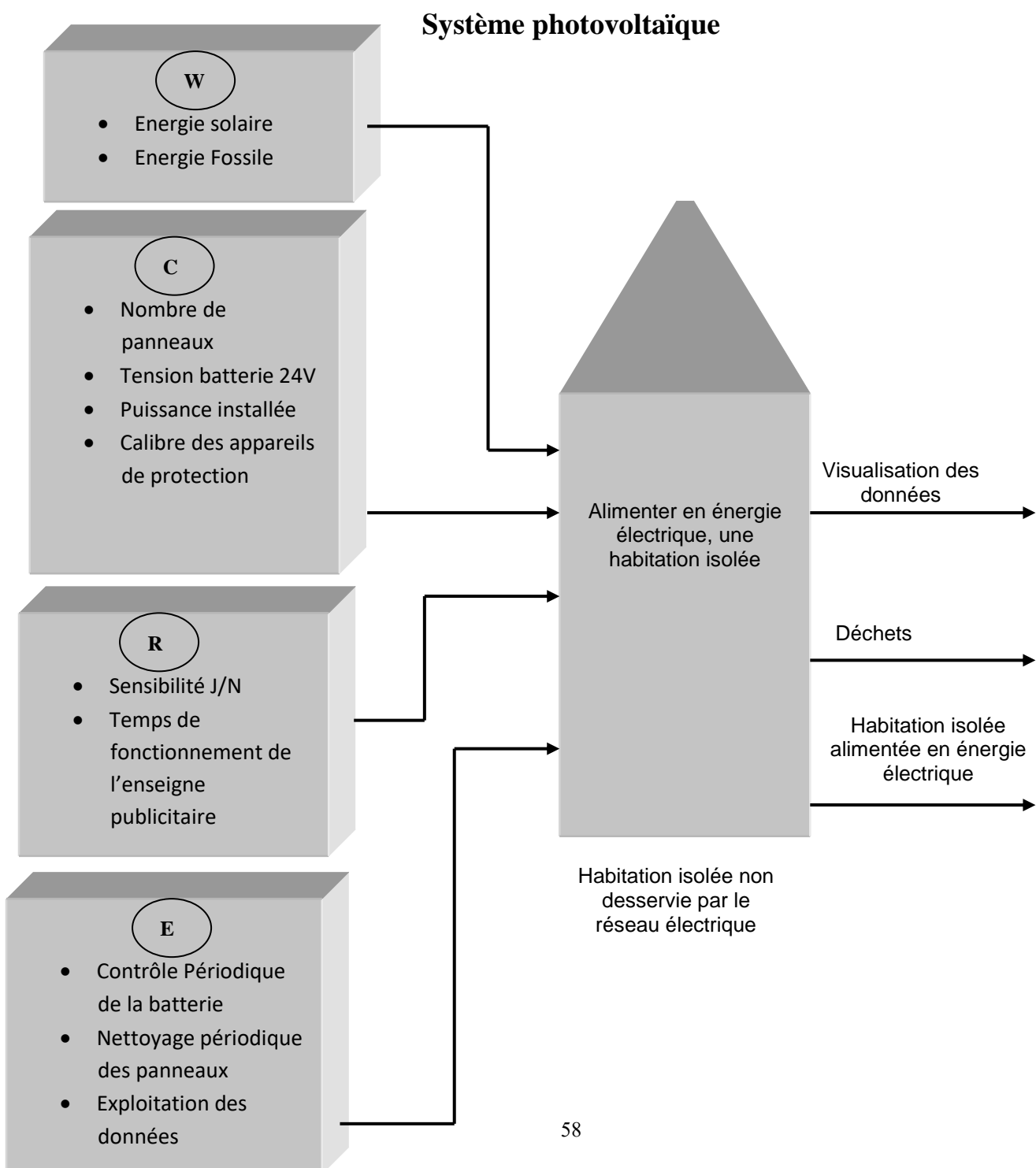
Les données surveillées sont :

- État de charge des batteries,
- Tension batterie,
- Courant panneaux solaires,
- Courant utilisation,
- Température batterie,
- Énergie potentielle des panneaux solaires,
- Énergie effectivement fournie par les panneaux solaires,

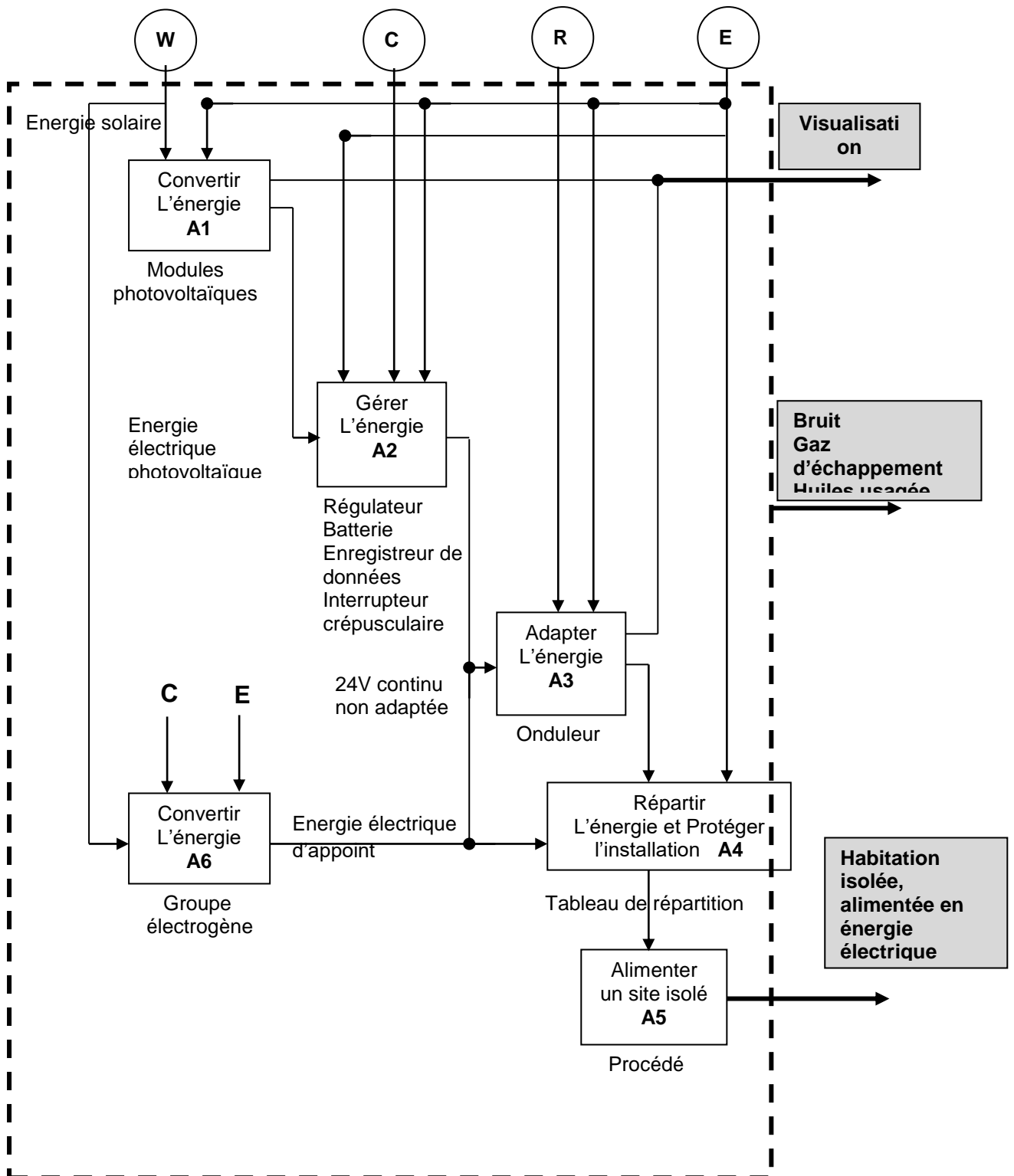
- Énergie consommée par l'utilisation,
- Durée d'utilisation récepteur,
- Solde de crédit de fonctionnement.

### IV-5 Les alarmes affichées sont :

- État de charge batterie trop faible,
- Défaillance du régulateur,
- Température critique de batterie,
- Tension d'alimentation hors tolérance,
- Absence de courant panneau solaire,
- Fin de crédit de fonctionnement.



Niveau de décomposition



Alimenter en énergie électrique une habitation isolée

Fonction : Gérer l'énergie

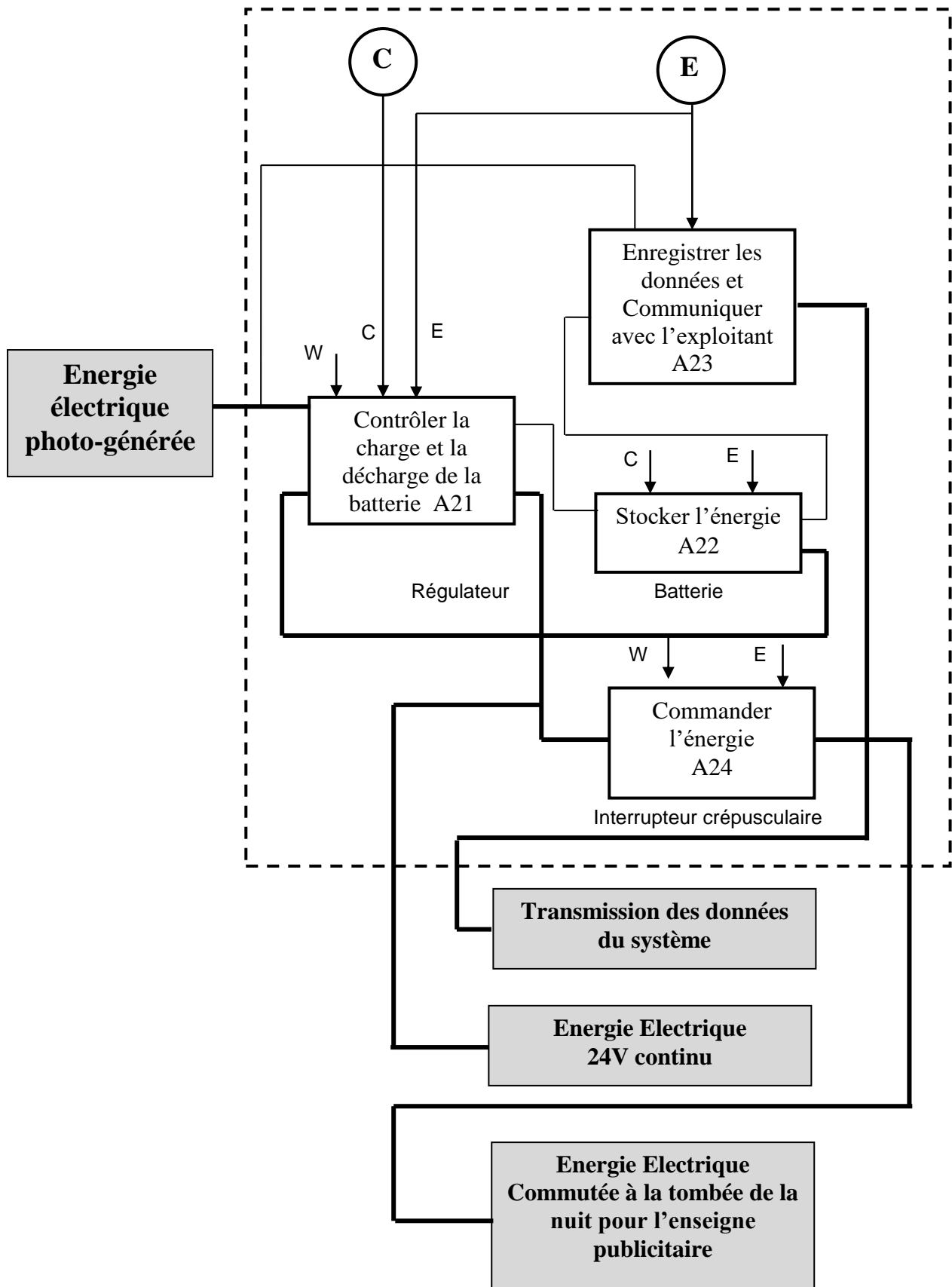


Schéma de principe

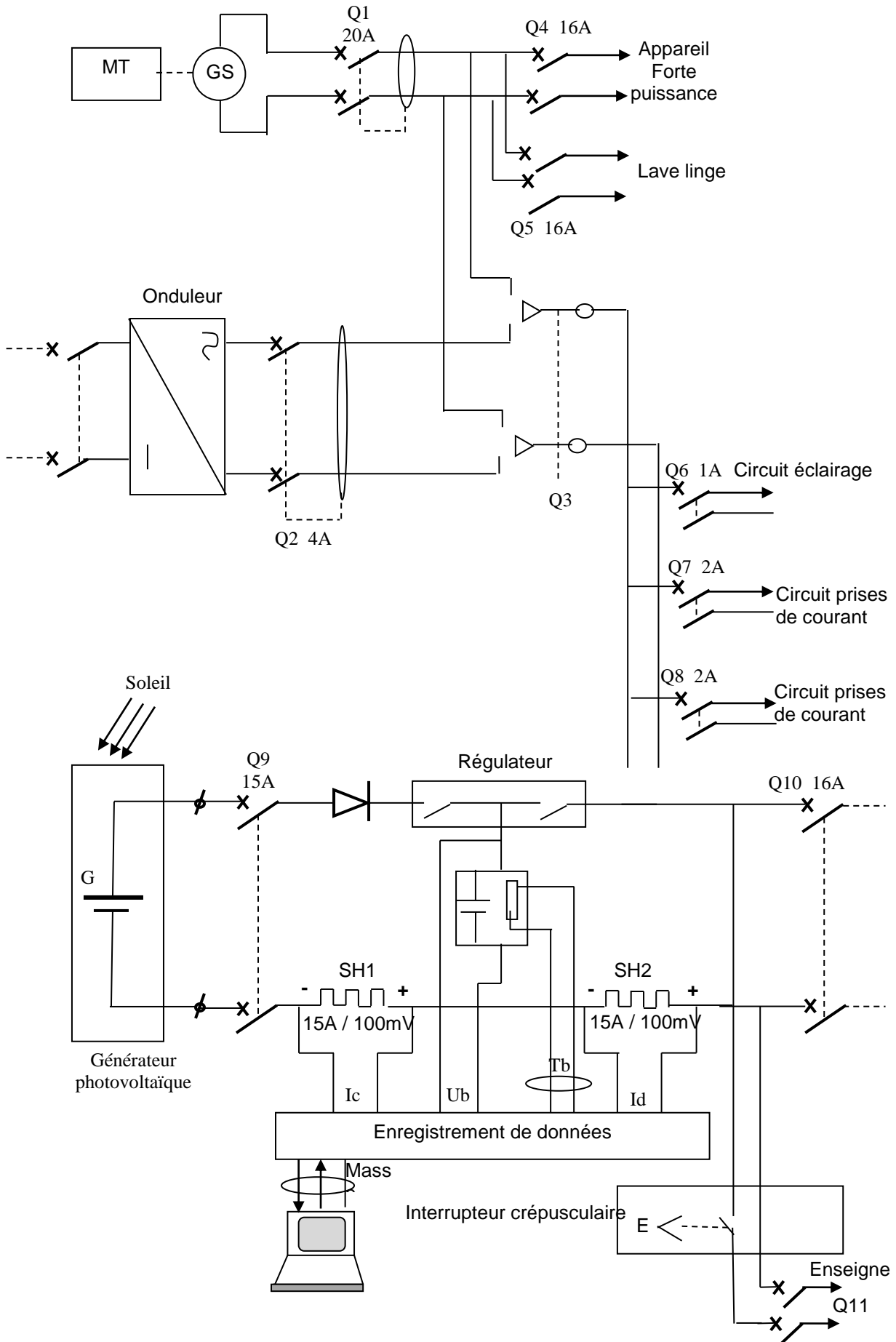


Schéma de câblage

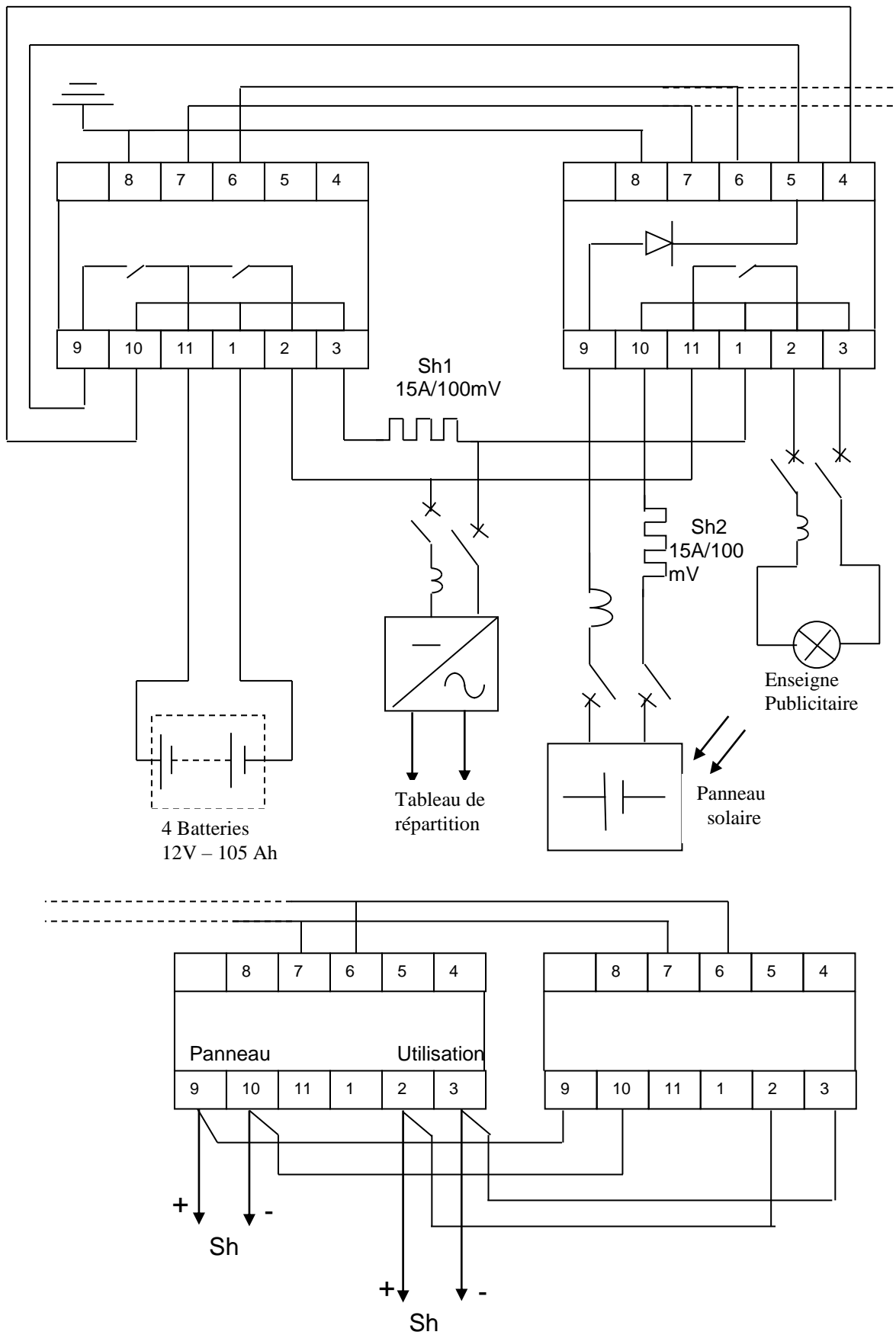
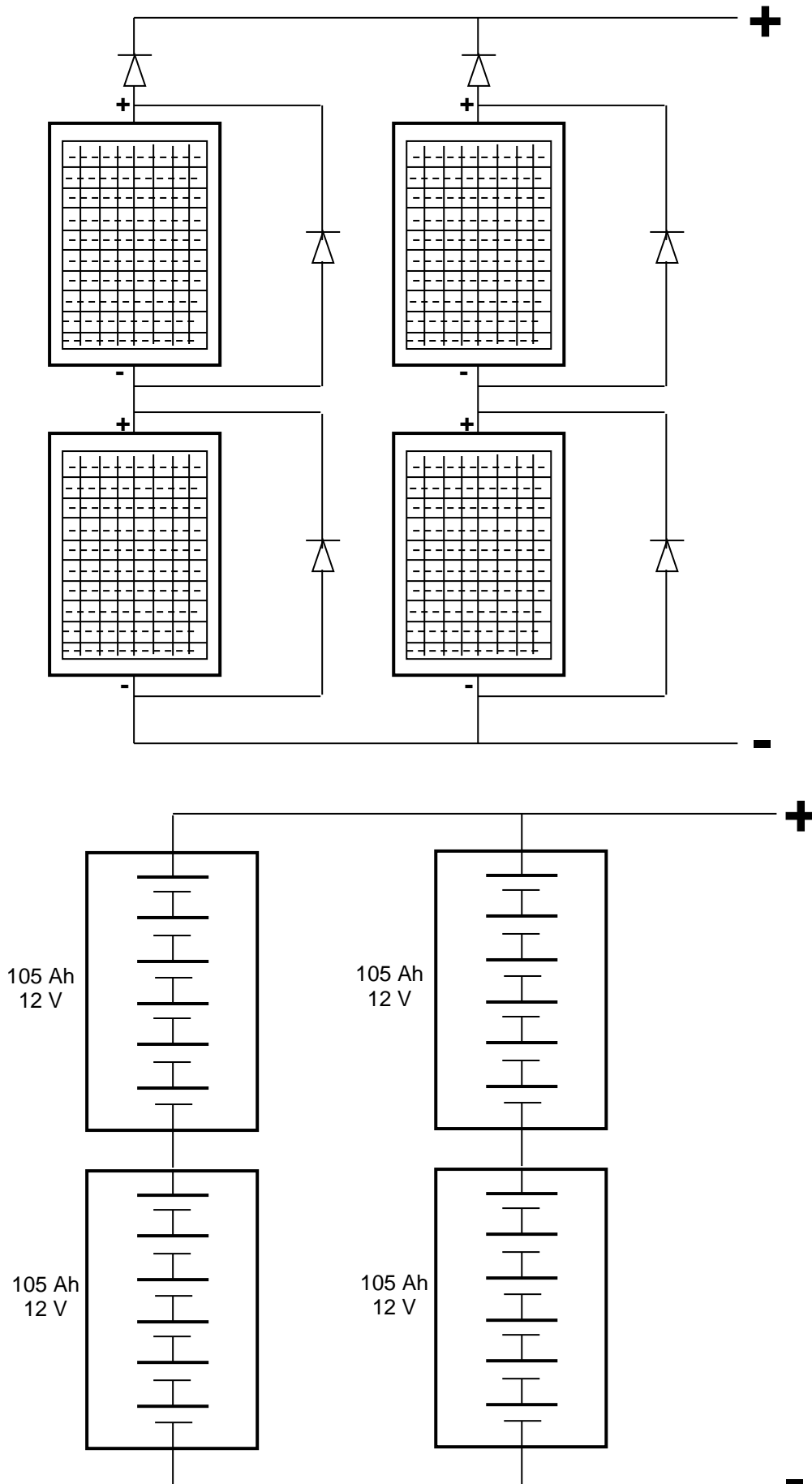


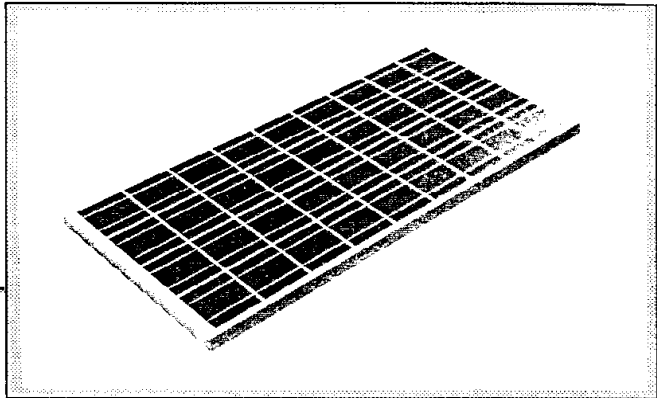
Schéma de montage des modules photovoltaïques et des batteries





Module Photovoltaïque  
LA 361J48

**LA 361J48**  
MODULE  
PHOTOVOLTAIQUE  
48 W 12V  
POLYCRISTALLIN



**TECHNOLOGIE**

- ◊ Cellules photovoltaïques en silicium multicristallin.
- ◊ Rendement de conversion élevé.
- ◊ Stabilité des performances.
- ◊ Encapsulation par feuillette de film polymérisé à chaud, résistant aux températures élevées.
- ◊ Stabilisé anti UV, (transmission stable de la lumière).
- ◊ Face avant en verre trempé à faible teneur en fer à haut coefficient de transmission lumineuse, auto-nettoyante sous la pluie.

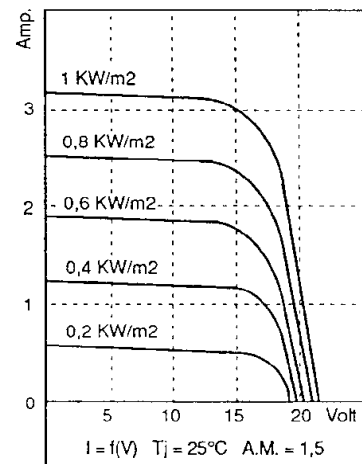
- ◊ Face arrière en tedlar assurant la protection des cellules et parfaite étanchéité des connexions.
- ◊ Encapsulation verre-tedlar supportant des cycles thermiques élevés évitant ainsi toute décomposition du feuillette.
- ◊ Cadre auto-porteur en aluminium anodisé.

**CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES**

Température de jonction (°C)	25
Puissance maximale (W)	48
Tension à puissance max. (V)	16,7
Courant à puissance max. (A)	2,88
Courant de court circuit (A)	3,10
Tension de circuit ouvert (V)	20,7

Valeurs typiques à  
1 KW/m<sup>2</sup> - AM 1,5

**PERFORMANCES**



**TEST**

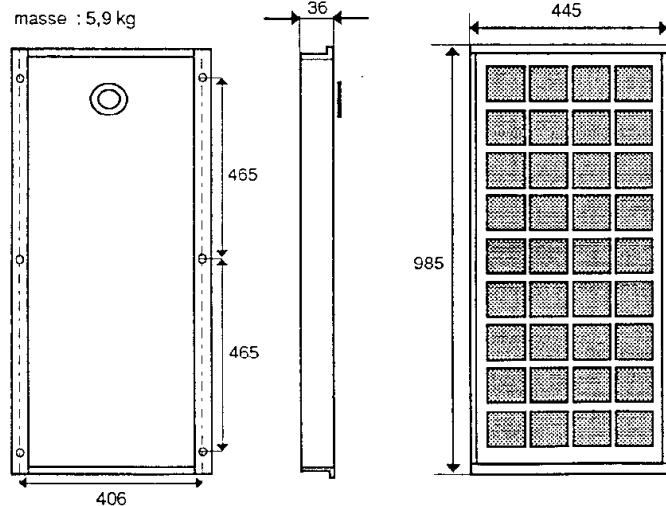
Spécification DOE/JPL  
et recommandations ISPR.

**CONDITIONS D'EMPLOI**

Température d'utilisation : - 40 à + 85 °C.  
Température de stockage : - 40 à + 85 °C.  
Humidité relative : 0 à 100%.  
Vent : 280 km/h.

11/02/93

**CARACTERISTIQUES MECANIQUES**



TOTAL ENERGIE  
7, chemin du plateau  
69570 Dardilly (FRANCE)

Tel. : (33) 78 47 44 55  
Tlx. : 306 115 F  
Fax. : (33) 78 64 91 00

### V- Conclusion

Les habitations isolées disposent de plusieurs options pour générer de l'électricité. Traditionnellement, on utilisait un groupe électrogène, souvent alimenté par du diesel ou de l'essence. Ces appareils fournissent une solution immédiate de production d'électricité mais sont polluants et coûteux à l'usage.

Ce chapitre est consacré essentiellement à l'étude qualitative d'une installation pour alimenter une habitation isolée

Dans notre étude, on a utilisé un kit solaire pour, ces panneaux solaires, couplés à des batteries pour le stockage de l'énergie, offrent une alternative économique basée sur les énergies renouvelables. De cette manière, on peut produire de l'électricité grâce au rayonnement solaire et diminuer les dépenses en combustible.

La mise en place des batteries permet de conserver le surplus d'électricité produite pour l'utiliser lorsque les panneaux solaires ne produisent pas ou peu d'énergie, comme la nuit ou par temps gris. Ainsi, il est possible d'alimenter en continu certains appareils essentiels.

Nous avons aussi opté pour les deux systèmes de manière complémentaire. Nous avons utilisé principalement l'énergie solaire et avons complété le manque de production avec un générateur à hydrocarbures : un moteur électrogène.

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale

Il existe deux classes de production : les énergies renouvelables et les énergies non renouvelables. Les énergies non renouvelables ont la capacité de répondre aux deux critères de disponibilité et puissance, cependant elles présentent le défaut d'être polluantes et d'épuiser les ressources naturelles. Les énergies renouvelables sont en général de faible capacité, d'un fonctionnement aléatoire et sont limitées par les lois de la physique ou tout simplement par les possibilités d'implantation.

Dans notre étude, nous avons commencé par une étude théorique nécessaire pour l'utilisation de l'énergie solaire et les différents paramètres électriques dont il faut tenir compte pour installer et dimensionner un système photovoltaïque dans l'alimentation d'une Habitation. Nous avons aussi illustré cette étude par un exemple pratique simple de calcul et de choix des éléments d'une installation photovoltaïque sur site isolé. Enfin, nous avons présenté la manière avec laquelle on réalise une alimentation d'une habitation isolée en fonction des besoins en énergie de chaque récepteur, avec les schémas détaillés des différents circuits électriques.

On peut conclure, qu'à travers l'effet photovoltaïque l'énergie contenue dans la lumière solaire peut être convertie directement à une énergie électrique. Cette méthode de conversion d'énergie présente quelques avantages parmi lesquelles : la simplicité : en construction modulaire, flexibilité d'utilisation, temps court de l'installation et de fonctionnement, régularité élevée et basse maintenance.

On note aussi que les modules photovoltaïques génèrent du courant continu. Donc, selon les applications, un système photovoltaïque comprendra des appareils permettant de convertir l'électricité en courant alternatif, nécessaire au fonctionnement des appareils les plus communs. Les systèmes photovoltaïques autonomes comprendront également des accumulateurs Électriques permettant de stocker l'électricité produite pendant les heures ensoleillées pour la rendre disponible la nuit et par temps nuageux.

Dans un autre côté, les systèmes photovoltaïques représentent une source d'énergie électrique silencieuse, sûre, non polluée et renouvelable fortement appropriée pour l'intégration dans les régions urbaines. L'énergie provenant du Soleil pourrait donc combler les besoins de l'Homme. Cependant, l'alimentation en énergie électrique doit faire l'objet d'un équilibre raisonné entre les différentes sources primaires et les moyens de production, en intégrant les paramètres propres à chaque pays.

# **Bibliographie**

## Bibliographie

---

### Bibliographie

- [01] : Mohamed Abd Setar Selman, Mohamed El Amine Taibi, « *Étude des panneaux solaires photovoltaïques* », Mémoire 2021, Faculté : Sciences de L'Ingénierat, université d'ANNABA.
- [02] : NDIAYE Papa Amadou et KAWTHER Achari, « *Production d'énergie électrique à partir d'un système photovoltaïque* », Mémoire de Master, Université de GUELMA, 2019.
- [03] : BOUZID Alla. M et AZIZE. M, « *Dimensionnement d'un système photovoltaïque l'alimentation d'une ferme. Etude de l'onduleur triphasé lié à cette application* », Mémoire de projet fin d'étude, Université d'Oran « Mohamed Boudiaf », 23 juin 2008.
- [04] : « *Manuel d'enseignement des énergies renouvelables* », Horizon Fuel Cell.
- [05] : Rafik BELABED, « *Etude et dimensionnement d'une installation photovoltaïque* », Mémoire de Master, 2017, Département de Génie Mécanique, UMMTO.
- [06] : Dinh An NGUYEN, « *Modélisation dynamique du coeur de pile a combustible de type PEM* », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 09 Juillet 2010.
- [07] : Abdelkader Gamni, « *Etude et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique (étude de cas réseau d'Adrar)* », Mémoire d'Ingénieur, 2012, Faculté des Sciences et de la Technologique, ADRAR.
- [08] : Doctorat MAKHLOUFI Salim, « *Contribution à l'optimisation des installations photovoltaïques par des commandes intelligents* », Thèse de doctorat, Université HADJILA KHDAR, BATNA, 19 janvier 2013.
- [09] : Mebarka ABED, Mebrouka BADJEDI, « *Dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome par les algorithmes génétiques* », Mémoire de Master, Université d'ADRAR, Décembre 2013.
- [10] : Boudellal M., « *La pile à combustible : Structure. Fonctionnement. Application* », 2007, Dunod, 1st ed., Paris, France.
- [11] : BERNARD BSSEMEL « *Cours les énergies nouvelles et renouvelables, cas de l'énergie solaire* », Douala, Cameroun.

[12] : Rémi SAISSET, « *Contribution à l'étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques* ». Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2 Avril 2004.

[13] : Blunier B., Miraoui A., « *Piles à Combustible : Principes , modélisation, applications avec exercices et problèmes corrigés* », 2007, ellipses éditions Technosup Génie Energétique, 1st ed., Paris.

[14] : MATALLAH SORAYA « *Dimensionnement et simulation d'un système photovoltaïque pour alimenter un habitat dans la wilaya d'Ouargla* », Mémoire de master, 2015.

[15] : BELAID LALOUANI Sofia « *Cours énergie solaire photovoltaïque* », Université A. Mira de Bejaia.

**Résume :**

La réduction des réserves de pétrole, gaz naturel et charbon pousse à chercher de nouvelles sources d'énergie. L'énergie solaire, abondante et renouvelable, est une solution prometteuse, surtout pour les pays en développement. Les systèmes photovoltaïques en site isolé offrent une alternative économique et fiable, permettant des réseaux électriques stables et contribuant à la protection du climat.

Mots clefs : photovoltaïque, site isolé, énergie renouvelable, système hybride, module.

**Summary :**

The reduction in oil, natural gas and coal reserves is pushing the search for new sources of energy. Solar energy, abundant and renewable, is a promising solution, especially for developing countries. Isolated photovoltaic systems offer an economical and reliable alternative, enabling stable electricity networks and contributing to climate protection.