

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur

et de la Recherche Scientifique

Université Kasdi Merbah Ouargla

Faculté De sciences appliquées

Département de Génie Mécanique



## Mémoire

Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de master en

Génie Mécanique énergétique

Domaine: Sciences et Technologies

Filière: Génie Mécanique

Spécialité: Energétique

Présenté par:

Gohmes Abdennour

Gherara Nasreddine

Thème

**Etude du Stockage de l'Energie Solaire  
photovoltaïque sous forme d'air comprimé**

Soutenu publiquement le:

Devant le jury composé de :

Président : Dr. Guermit Tahar

MCA

UKM. Ouargla

Examineur : Mr. Gherfi Abdellhafid

MAA

UKM. Ouargla

Encadreur : Dr. Noureddine Cherrad

MCA

UKM. Ouargla

Année Universitaire 2021/2022

## **Remerciements**

Nous remercions ALLAH de nous  
avoir donné le courage,  
la volonté et la patience de mener à  
terme ce présent travail

Nous exprimons notre gratitude et  
notre appréciation et

Nos sincères remerciements à  
**Mr. Cherrad noureddine**

Pour

Superviser notre encadrement tout le  
.long de notre projet

## **Dédicace**

Je dédie ce modeste travail

A nos chers parents et nos frères

A nos encadreur Mr Cherrad  
noureddine et Dr. Mohamed eltahar  
massoudi et Lazher Massoudi

A Tous nos enseignants du  
département de génie mécanique

Egalement tous les étudiants du génie

Mécanique

# Sommaire

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Introduction générale.....1

## **Sommaire**

**page**

### **Chapitre I: Généralité sur l'énergie solaire**

1. Introduction.....	4
2. Energie solaire.....	5
2.1. Rayonnement reçue sur Terre.....	6
2.2. Gisement solaire en Algérie.....	8
2.3. Situation énergétique en Algérie.....	9
3. Descriptions des différentes technologies de l'énergie solaire.....	10
3.1. L'énergie solaire thermique.....	10
3.2. Technologie photovoltaïque.....	11
4. Conclusion.....	12

### **Chapitre II: System solaire photovoltaïque**

1. Introduction.....	14
2. Histoire.....	14
3. Cellule photovoltaïque (PV).....	15
3.1. Principe d'une cellule photovoltaïque.....	15
3.2. Modélisation des caractéristiques électriques de cellule PV.....	16
4. Modules photovoltaïques.....	18
4.1 Constitution d'un module de photovoltaïque.....	18
5. Générateur photovoltaïque.....	19
6. Définition d'un système photovoltaïque (PV).....	20
7. Type des systèmes.....	21
7.1. Les systèmes autonomes.....	21
7.2. Les systèmes PV hybrides.....	22
7.3. Les systèmes raccordés aux réseaux.....	23
8. Comparaison entre le solaire thermique et le photovoltaïque.....	24
9. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	24

## Sommaire

9.1. Avantage.....	24
9.2. Inconvénients.....	24
10. Conclusion.....	25

### **Chapitre III: Méthodes de stockage de l'énergie solaire**

1. Introduction.....	27
2. Stockage d'énergie solaire.....	28
2.1. Principe de stockage d'énergie solaire.....	29
2.2. Classification des moyens de stockage d'énergie solaire.....	31
2.2.1. Stockage de l'énergie thermique.....	32
2.2.1.1. Stockage sensible.....	32
2.2.1.2. Stockage latent.....	34
2.2.2. Stockage électrique direct.....	34
2.2.2.1. Stockage par inductance Supraconductrice (SMES).....	34
2.2.2.2. Stockage par super condensateur.....	35
2.3. Stockage à grande échelle.....	35
2.3.1. Stockage gravitaire hydraulique.....	35
2.3.2. Batteries.....	36
2.4. Stockage sous forme d'énergie cinétique.....	37
2.5. Le stockage sous forme d'énergie potentielle.....	37
2.6. Stockage sous forme d'énergie interne.....	37
2.7. Stockage active direct.....	38
2.8. Stockage par voie chimique.....	38
2.8.1. Stockage par conversion H <sub>2</sub> .....	39
2.8.2. Stockage en batteries électrochimiques.....	39
2.9. Stockage par air comprimé.....	39
3. Comparaison entre les des différents types de stockage d'énergie.....	40
4. Conclusion.....	41

### **Chapitre IV: System de stockage de l'énergie solaire par l'air comprimé**

1. Introduction.....	43
2. Description d'un système de Stockage d'Energie par Air Comprimé .....	43
3. Modélisation de system.....	45
3.1. Modélisation de la production photovoltaïque.....	45
3.2. Modélisation du système de stockage à air comprimé.....	46
3.2.1. Puissance consommée par le système de compression.....	48

# Sommaire

3.2.2. Stockage d'air comprimé.....	48
3.2.3. Puissance produite par le système de détente.....	49
3.3. Performance du système de stockage.....	49
3.3.1. Rendement global de stockage.....	49
3.3.2. Taux de couverture du stockage.....	50
3.4. Résultats et discussion.....	50
3.4.1. Données.....	50
3.4.2. Organigramme de calcul.....	51
3.4.3. Résultats de calcul.....	52
3.4.3.1. Influence de la surface de capteur PV.....	52
3.4.3.2. Influence du débit volumique.....	53
3.4.4. Influence de la température.....	54
4. Conclusion.....	54
Conclusion Générale.....	57
Référence.....	59
Résumé.....	67

# **Liste des figure**

## **Liste des figure**

<b>Figure</b>	<b>Page</b>
<b>Chapitre I : Généralité sur l'énergie solaire</b>	
<b>Figure 1.1</b> : Analyse spectrale du rayonnement solaire	<b>7</b>
<b>Figure 1.2</b> : rayonnement solaire globale quotidien moyen en KWh /m <sup>2</sup>	<b>8</b>
<b>Figure 1.3</b> : Composante du rayonnement global sur un plan horizontal	<b>9</b>
<b>Figure 1.4</b> : Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontal aux mois de Juillet et Décembre	<b>10</b>
<b>Figure 1.5</b> : Répartition de la production nationale d'électricité en Algérie	<b>11</b>
<b>Figure 1.6</b> : Croissance annuelle du marché mondial du solaire thermique	<b>12</b>
<b>Figure 1.7</b> : Production de l'énergie solaire thermique	<b>12</b>
<b>Chapitre II System solaire photovoltaïque</b>	
<b>Figure 2.1</b> : Structure basique d'une cellule solaire	<b>15</b>
<b>Figure 2.2</b> : Exemple de cellule et de module photovoltaïque en silicium	<b>16</b>
a) Plaquettes sans connectique,	
b) Cellule PV élémentaire, c) Générateur photovoltaïque,	
d) Photo d'un générateur PV poly-cristallin commercial	
<b>Figure 2.3</b> : Principe d'une cellule photovoltaïque	<b>17</b>
<b>Figure 2.4</b> : Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque	<b>18</b>
<b>Figure 2.5</b> : Circuit équivalent complet d'une cellule PV	<b>18</b>
<b>Figure 2.6</b> : Module photovoltaïque	<b>19</b>
<b>Figure 2.7</b> : Composition d'un module solaire photovoltaïque	<b>20</b>
<b>Figure 2.8</b> : Modules photovoltaïques connectés en série et en parallèle	<b>21</b>
<b>Figure.2.9a</b> : Chemin système photovoltaïque	<b>21</b>
<b>Figure. 2.9b</b> Système photovoltaïque plus détaillé	<b>22</b>
<b>Figure 2.10</b> :Système PV autonome avec batterie	<b>23</b>
<b>Figure 2.11</b> : System PV hybride	<b>24</b>
<b>Figure 2.12</b> : Structure d'un système PV connecté au réseau	<b>24</b>
<b>Chapitre III Méthodes de stockage de l'énergie solaire</b>	
<b>Figure 3.1</b> : Irradiation solaire au sommet de l'atmosphère (AM 0), globale au	<b>29</b>

## **Liste des figure**

niveau du sol (AM 1.5 Global) et directe au sol (AM 1.5 — Directe) ; d'après

<b>Figure 3.2 :</b> Consommation mondiale d'énergie primaire de 1971 à 2012 en Million de tonnes équivalent pétrole (Mtep) d'après	<b>30</b>
<b>Figure 3.3 :</b> Classification des techniques de stockage de chaleur.	<b>33</b>
<b>Figure 3.4</b> Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état	<b>35</b>
<b>Figure 3.5 :</b> Graphe de la température-enthalpie présentant l'énergie stockée dans un système de stockage latent en comparaison avec un système de stockage sensible.	<b>37</b>
<b>Figure 3.6:</b> Stockage gravitaire hydraulique	<b>37</b>
<b>Figure 3.7. :</b> Schéma de a) batterie à circulation b) batterie sodium-soufre	<b>38</b>
<b>Figure 3.8 –</b> Schéma de principe de la centrale solaire PS10.	<b>40</b>
<b>Figure 3.9 :</b> Composition simplifiée du système de stockage à air comprimé	<b>41</b>
<b>Chapitre IV System de stockage de l'énergie solaire par l'air comprimé</b>	
<b>Figure 4.1 :</b> Configuration du système global étudié composé des quatre parties principales (Champ PV, Bâtiment, CAES et réseau électrique)	<b>46</b>
<b>Figure 4.2. :</b> Système de stockage à air comprimé	<b>49</b>
<b>Figure 4.3:</b> Réservoir de stockage d'air comprimé	<b>51</b>
<b>Figure 4.4:</b> Organigramme de calcul	<b>52</b>
<b>Figure 4.5:</b> La puissance de ( $P_{PV}$ , $P_c$ , $P_t$ ) en fonction de la taille du champ PV.	<b>54</b>
<b>Figure 4.6 :</b> Puissance de compresseur et de turbine en fonction du débit volumique.	<b>55</b>
<b>Figure 4.7:</b> La puissance de ( $P_{PV}$ , $P_c$ , $P_t$ ) en fonction de la température.	<b>56</b>



# **Liste des tableaux**

## **Liste des tableaux**

<b>Tableau</b>	<b>Page</b>
<b>Chapitre I :Généralité sur l'énergie solaire</b>	
<b>Tableau 1.1</b> : Composition chimique du soleil	<b>6</b>
<b>Chapitre III Méthodes de stockage de l'énergie solaire</b>	
<b>Tableau 3.1</b> : Formes d'énergie intermédiaires de stockage	<b>32</b>
<b>Table 3.2:</b> Comparaison de différentes technologies de stockage	<b>42</b>
<b>Chapitre IV System de stockage de l'énergie solaire par l'air comprimé</b>	
<b>Tableau 4.1</b> : Description des principaux points de transformation de l'air	<b>49</b>
<b>Tableau 4.2:</b> Paramètres et données d'entrées pour le calcul	<b>52</b>
<b>Table 4.3:</b> Résultat âpre le premier état	<b>54</b>

## Nomenclature

### Liste des symboles

	$\dot{Q}_{res}$	perts thermiques	W
A		Surface	m <sup>2</sup>
C		la vitesse de la lumière	m/s
C <sub>p</sub>		Capacité calorifique	J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
E		L'énergie de chaque photon	Joule
e <sub>isl</sub>		Epaisseur isolée	Cm
GNI		Irradiance Normal Global,	W.m <sup>-2</sup>
H		la hauteur du chute	M
h		Enthalpie spécifique	J.kg <sup>-1</sup>
k <sub>pv</sub>		l'efficacité des onduleurs photovoltaïques	%
M		Masse,	Kg
ṁ		Débit massique	kg.s <sup>-1</sup>
P		Pression	Pa
Q <sub>v</sub>		Débit volumique	m <sup>3</sup> /h
R		Constant de gaz parfaite	J/kg.K
T		Température	K
U		la vitesse de l'eau	m/s
U <sub>res</sub>		le coefficient global d'échange	W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>
V		Volume	m <sup>3</sup>
ẇ		Puissance électrique	W
β		coefficient β <sub>ref</sub> est parfois donné par le fabricant des cellules solaires	K <sup>-1</sup>
η		Rendement	%
ρ		Masse volumique	Kg/m <sup>3</sup>
τ		Taux de couverture	%
λ		la longueur d'onde	Mm

### Accronymes:

CAES ou SEAC	Compressed Air Energy Storage
ENR	Energies Renouvelables
PV	Photovoltaïques
IEA	l'Agence Internationale de l'Energie
CSP	Concentrating Solar Power
V <sub>co</sub>	Tension en circuit ouvert

I cc

court-circuit

MCP

Matériaux à Changement de Phase

# **Introduction générale**

# Introduction générale

## **Introduction général**

La demande d'énergie est en progression permanente dans tout le monde pour faire face aux développements industriels continus et pour assurer aux habitants une qualité de vie confortable. En effet, cette demande croissante a suscité la réduction des ressources fossiles, et a provoqué de façon directe l'émission des gaz à effet de serre dans l'espace, ce qui a accéléré le réchauffement climatique de la terre. De même, ces problèmes ont mené progressivement le monde à chercher d'autres sources des énergies alternatives [1-3].

Les énergies renouvelables ont été mises en avant afin de réduire notre dépendance au pétrole en convertissant l'énergie du soleil, du vent, ou encore de la biomasse en nos vecteurs énergétiques principaux : la chaleur et l'électricité. Le solaire photovoltaïque est l'une des techniques les plus prometteuses de l'énergie solaire, la puissance lumineuse du soleil est directement convertie en courant électrique grâce à l'effet photoélectrique [2,3].

Dans ce mémoire, nous aborderons les enjeux les plus importants de cette énergie d'effet photovoltaïque, à savoir son stockage, et nous concentrerons sur le stockage sous forme d'air comprimé.

Le premier chapitre est une généralité traitant un ensemble des points essentiels concernant l'énergie solaire, à savoir : le rayonnement reçu sur terre, le gisement solaire en Algérie, la situation énergétique en Algérie, la description des différentes technologies de l'énergie solaire, l'énergie solaire thermique et la technologie photovoltaïque.

Le deuxième chapitre décrit l'effet photovoltaïque à travers la notion de la cellule photovoltaïque, le principe d'une cellule photovoltaïque, la modélisation des caractéristiques électriques de cellule photovoltaïque, les modules photovoltaïques et les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

Le troisième chapitre est consacré au stockage d'énergie solaire. Il s'agit du principe de stockage d'énergie solaire, de la classification des moyens de stockage d'énergie solaire, en particulier le stockage de l'énergie sous forme thermique, le stockage électrique direct et le stockage à grande échelle, et puis une comparaison entre ces différents types de stockage est présentée.

## **Introduction générale**

Le quatrième chapitre est les résultats et la discussion de l'étude du système de stockage d'énergie par air comprimé en se basant sur la modélisation de ce system et un organigramme de calcul proposé. Dans ce chapitre on procède alors au calcul de la puissance consommée par le système de compression, le débit d'air comprimé, la puissance produite par le système de détente, la performance du système de stockage, le rendement global de stockage et le taux de couverture du stockage.

En fin une conclusion générale clôturant les résultats obtenus par rapport aux objectifs du présent travail.

# **Chapitre I**

## **Généralité sur l'énergie solaire**

# Chapitre I : Généralité sur l'énergie solaire

## **1 .Introduction**

Jusqu' à 1954 l'énergie solaire n'est pas développée car elle n'est pas assez rentable par rapport aux énergies fossiles. Il faut attendre la conquête spatiale pour voir apparaître les premières cellules photovoltaïques [6]. En effet, c'est en 1958 qu'a lieu le premier lancement d'un satellite fonctionnant à l'énergie photovoltaïque. L'industrie spatiale investira beaucoup de fonds dans le développement des panneaux solaires. C'est la première utilisation importante de la technologie solaire photovoltaïque [8].

Pendant les années 1970 et 1980, des efforts sont faits pour réduire les coûts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres. L'énergie solaire connaîtra un second élan au cours du premier choc pétrolier dans les années 1970. Alors que le prix du pétrole augmente de façon spectaculaire, les panneaux solaires photovoltaïques commencent à être utilisés pour la première fois dans les maisons. En effet, en 1973, la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université du Delaware, et en 1983 la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie [8].

Depuis les panneaux solaires se sont développés lentement pendant longtemps, ils ont été considérés comme des sources d'énergies naturelles. L'énergie solaire est de nouveau en plein essor car on prévoit une pénurie de pétrole prochaine, on se préoccupe du réchauffement de la planète et les prix de l'énergie n'ont jamais été aussi hauts. L'énergie solaire devient une priorité pour de plus en plus de pays. Des centrales solaires sont en cours de construction dans le monde entier et les entreprises investissent également. Les entreprises d'électricité et les gouvernements ont offert des subventions et des réductions pour encourager les propriétaires à investir dans l'énergie solaire pour leur maison. En effet, en 1995, des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001 [8].



# Chapitre I : Généralité sur l'énergie solaire

## 2. Energie solaire

Il y a 4,6 milliards d'années, le soleil est né d'un énorme nuage interstellaire. Il est à 150 millions de kilomètres de la terre et plus de 100 fois son diamètre. Il est constitué de matière gazeuse constituée majoritairement d'éléments légers : 74 % d'hydrogène et 24 % d'hélium (voir tableau 1). Ces derniers sont moins abondants sur Terre, qui est composée de matière lourde, ne constituant que 0,1 % de la composition du Soleil [7]

**Tableau 1.1** : Composition chimique du soleil[8].

Composition photosphérique(en masse)	
Hydrogène	73.46 %
Hélium	24.85 %
Oxygène	0.77 %
Carbone	0.29 %
Fer	0.16 %
Néon	0.12 %
Azote	0.09 %
Silicium	0.07 %
Magnésium	0.05 %
Soufre	0.04 %

Albert Einstein décrit les réactions de fusion thermonucléaire qui se déroulent dans le noyau de la Terre. Il s'agit d'environ 627 millions de tonnes de fusées à hydrogène par seconde. Chaque million de tonnes d'hydrogène sont converties en 4,1026 joules d'énergie lumineuse. L'énergie lumineuse migre lentement vers la surface du soleil par le rayonnement et la convection [9].

Les rayons du soleil continuent d'atteindre la terre et de chauffer la surface de notre planète et sans cet approvisionnement énergétique, la Terre gèlerait. Le soleil émet un rayonnement électromagnétique ; il est constitué de particules lumineuses appelées photons.

L'énergie de chaque photon  $E$  est directement liée à la longueur d'onde  $\lambda$  et à la vitesse de la lumière  $[c]$ , soit 299 792 458 m/s [10], ce qui est donné par :

$$E = h \cdot u = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1.1)$$

# Chapitre I : Généralité sur l'énergie solaire

## 2.1 Rayonnement reçue sur Terre

Le rayonnement solaire se compose de plusieurs types de rayons, certains filtrés ou bloqués par l'atmosphère et les nuages, alors que d'autres ne le sont pas (voir Figure 1). Rayons du soleil sont aussi connus sous le nom de rayonnement [11].

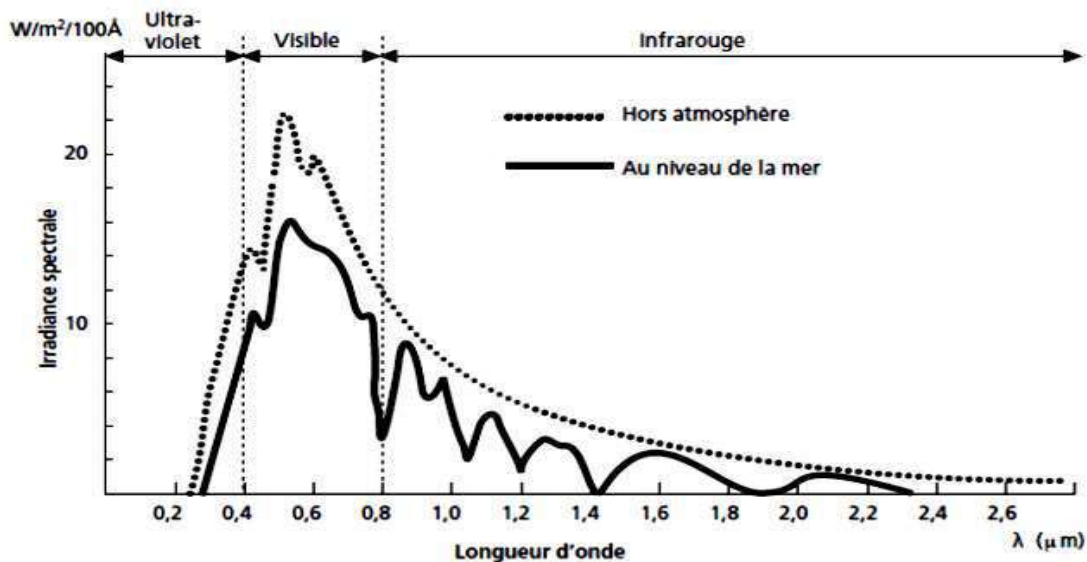


Figure 1.1 : Analyse spectrale du rayonnement solaire [12].

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps Noir porté à 5800° K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom d'AM0. Sa distribution en énergie est répartie en : [13].

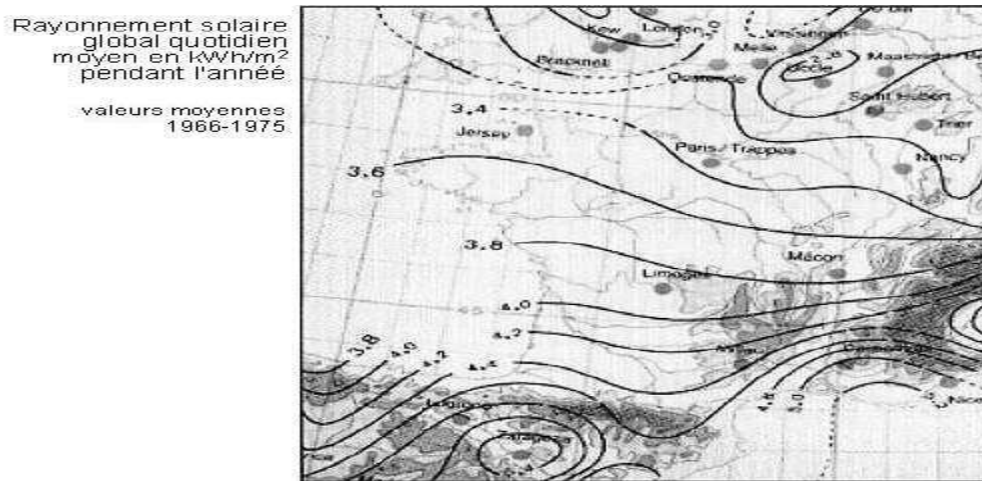
- Ultraviolet UV  $0.20 < \lambda < 0.38 \mu$  [6.4%]
- Visible  $0.38 < \lambda < 0.78 \mu$  [48.0%]
- Infrarouge IR  $0.78 < \lambda < 10 \mu$  [45.6%]

La Terre est située à 150 millions de km du Soleil et celui-ci émet en permanence 1026 Watt sous forme de rayonnement et la Terre reçoit 178 millions de milliard de Watt sur sa face éclairée, soit 350 Watt par m<sup>2</sup> à l'équateur [14].

L'atmosphère (via le dioxyde de carbone, l'ozone, la vapeur d'eau...) absorbe en grande partie les IR et les UV et un peu la lumière visible. Ainsi plus l'épaisseur d'atmosphère traversée est importante, plus la quantité d'énergie solaire reçue par le sol est faible. Quand on se rapproche des pôles, les rayons sont plus inclinés : la même quantité d'énergie se répartie sur une plus grande surface. C'est pourquoi le rayonnement solaire par unité de surface reçu diminue de l'équateur vers les pôles.

## Chapitre I : Généralité sur l'énergie solaire

Ceci, avec l'inclinaison de l'axe de la Terre, est à l'origine du phénomène des saisons [14].



**Figure 1.2 :** Rayonnement solaire globale quotidien moyen en KWh /m<sup>2</sup> [14].

L'énergie solaire est également réduite:

- par l'alternance des jours et des nuits ;
- par la couverture nuageuse (celle-ci réduit à 50 % l'énergie solaire) ;
- par la variation saisonnière.

Le flux d'énergie reçu par la terre est-il est appelé irradiante et abrégé en éclairement. Moyenne annuelle de cette illumination reçue sur un plan perpendiculaire aux rayons du soleil au sommet de l'atmosphère constante solaire [15]. Le rayonnement solaire se devise en deux parties: [16-18]

- Rayonnement global Le rayonnement global est la somme de tous les rayonnements reçus (rayonnement direct, diffus et albédo).
- Rayonnement réfléchi C'est la partie inutile des rayonnements solaires qu'il diffuse par les obstacles atmosphériques.

Dans la figure ci-dessous (Figure I.4) est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçu sur une surface terrestre [19].

## Chapitre I : Généralité sur l'énergie solaire

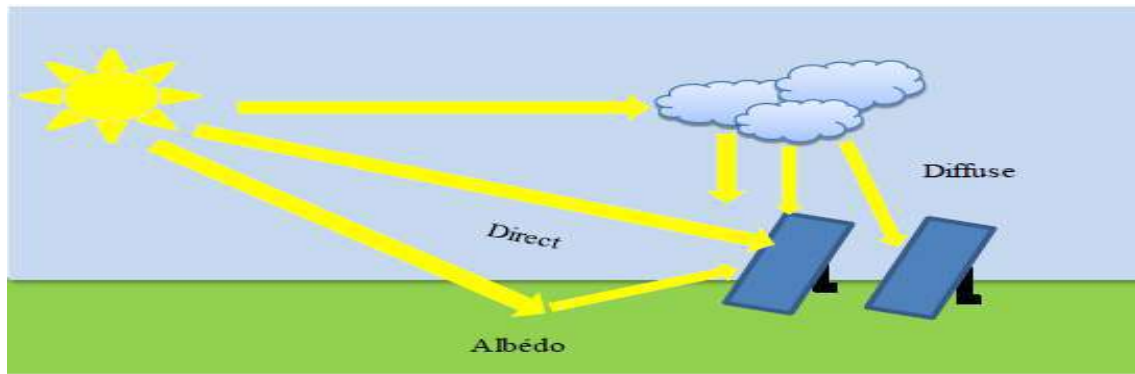


Figure 1.3 : Composantes du rayonnement global sur un plan horizontal [19].

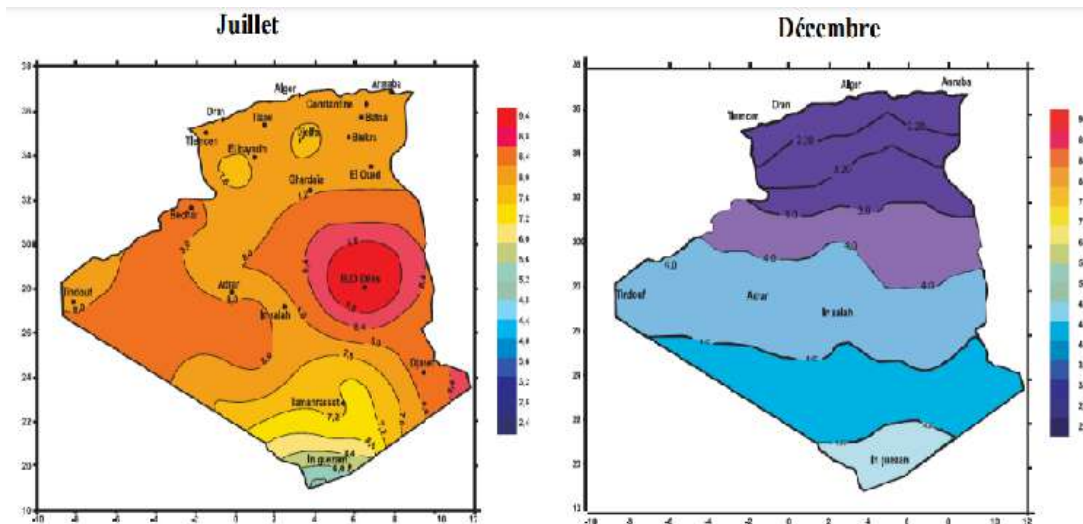
### **2.2. Gisement solaire en Algérie**

Les dépôts solaires sont un ensemble de données qui décrivent l'évolution du rayonnement solaire disponible à un endroit donné et sur une période de temps donnée. Il permet de simuler le fonctionnement possible d'une installation solaire, ainsi son dimensionnement le plus précis peut être effectué en fonction de la demande d'énergie à satisfaire [65].

De par sa situation géographique, l'Algérie possède l'un des gisements solaires les plus élevés au monde [20]. Presque toutes les régions du pays ont plus de 2000 heures d'ensoleillement par an, avec un maximum de 3900 heures (hauts plateaux et désert du Sahara). La majeure partie du pays reçoit environ 5 kWh d'énergie par jour au niveau de 1 m<sup>2</sup>, soit près de 1700 kWh/m<sup>2</sup>/an au nord et 2263 kWh/m<sup>2</sup>/an au sud [21,22].

La Figure. 1.4 montre l'irradiation solaire globale quotidienne reçue sur un plan horizontal pour les mois de Décembre et Juillet [20].

# Chapitre I : Généralité sur l'énergie solaire



**Figure 1.4 :** Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontal aux mois de Juillet et Décembre [20].

## **2. 3. Situation énergétique en Algérie**

L'énergie solaire est l'une des premières sources d'énergie utilisées par les humains (juste après l'énergie musculaire). Elle est à l'origine de la formation de réserves d'énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) et de sources d'énergies renouvelables (bois, vent, eau)[14].

En effet, le vent est créé par des différences de température (et de pression), et le rayonnement solaire en est l'origine. Ce rayonnement provoque également l'évaporation de l'eau sous forme de pluie et entraîne les roues du moulin, elle est vitale pour les organismes à l'origine du charbon, du pétrole et du gaz. Récemment, il y a eu un regain d'intérêt pour l'utilisation directe du rayonnement solaire par les centrales solaires, les fours solaires, les chauffe-eau solaires, le chauffage solaire, les cellules solaires ou les cellules photovoltaïques [14].

En Algérie, 99.2% de la production totale d'électricité (soit 57.2 TWh en 2012) provient des combustibles fossiles, notamment le gaz naturel qui est l'énergie la plus disponible. Le peu qui reste (0,8%) provient des énergies renouvelables qui se résument pratiquement à une production hydraulique avec 0.7% et 0.1% pour la filière solaire photovoltaïque [23]. La figure ci-après montre cette répartition des ressources sur la production d'électricité dans l'Algérie.

## Chapitre I : Généralité sur l'énergie solaire

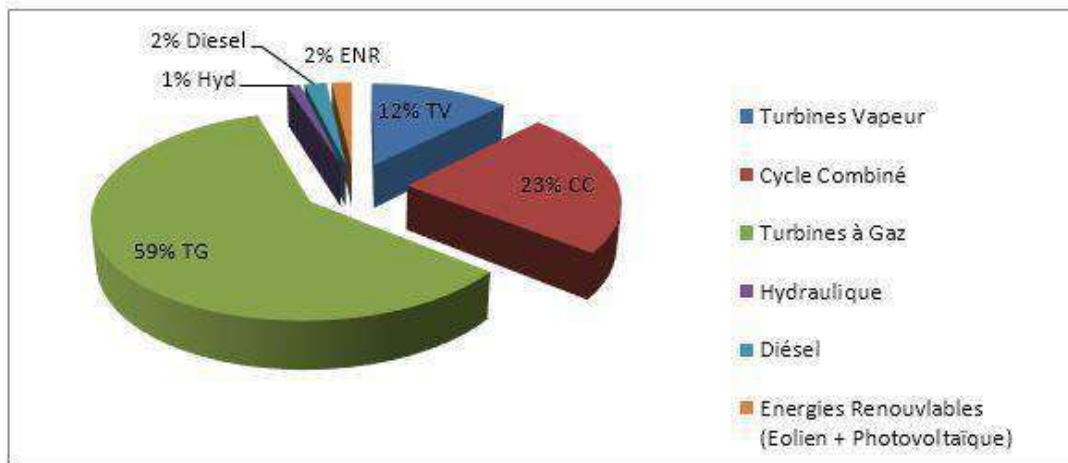


Figure 1.5 : Répartition de la production nationale d'électricité en Algérie [23].

### 3. Description des différentes technologies de l'énergie solaire

#### 3.1. L'énergie solaire thermique

Ces dernières années, la filière du solaire thermique semble la plus prometteuse parmi les différents technologies de la génération d'énergie à partir du soleil vue l'adéquation qu'elle offre cette technologie pour la production de l'énergie en grande échelle. Cette adéquation est issue du coût qui diminue avec la capacité de production des centrales solaires thermiques. Cette filière fournira 10 % de la production mondiale de l'énergie renouvelable à l'horizon de 2050 selon l'Agence Internationale de l'Energie (IEA)[27].

L'IEA prévoit des sérieuses perspectives pour l'énergie solaire thermique, environ 2000 TW/h sera produite annuellement par la technologie du solaire thermique à 2050. En plus le solaire thermique va continuer à se développer après l'an 2050. En fait le solaire thermique a fait déjà ces preuves et de nombreuses centrales sont opérationnelles dans plusieurs pays dont les leaders sont l'Espagne et les États-Unis. Cette technologie présente la meilleure solution pour le bassin méditerranéen et surtout le nord-africain les pays comme l'Algérie le Maroc et la Lybie, qui ont un immense potentiel de production dans ce domaine [27]. Ces pays ont une capacité de production moyenne de  $32\text{MW}/\text{km}^2$ , ce qui rend cette région la plus favorable pour des investissements dans les centrales solaires thermiques [28].

# Chapitre I : Généralité sur l'énergie solaire

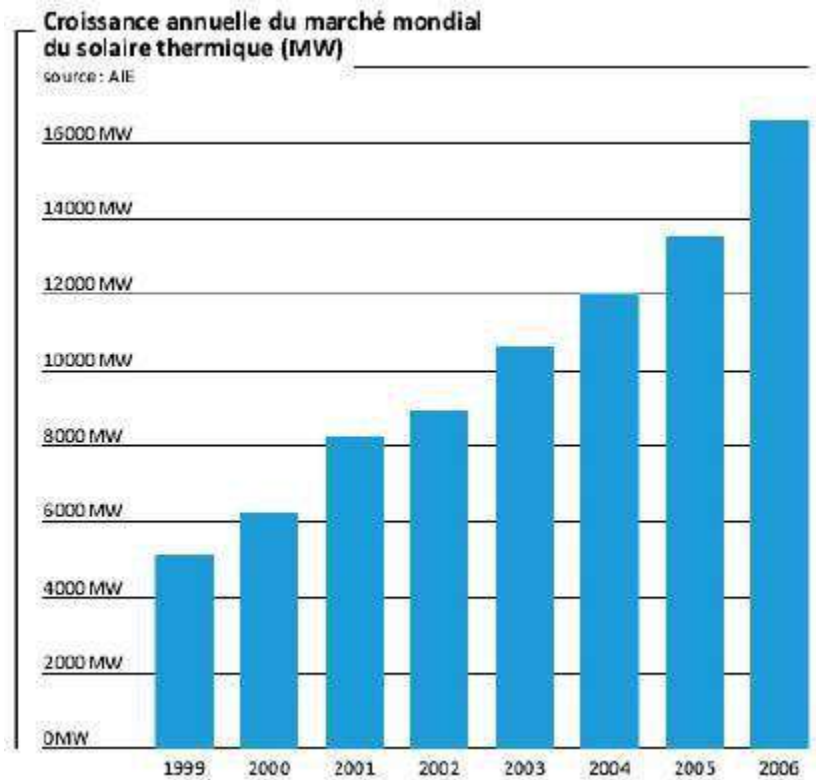


Figure 1.6: Croissance annuelle du marché mondial du solaire thermique [27].

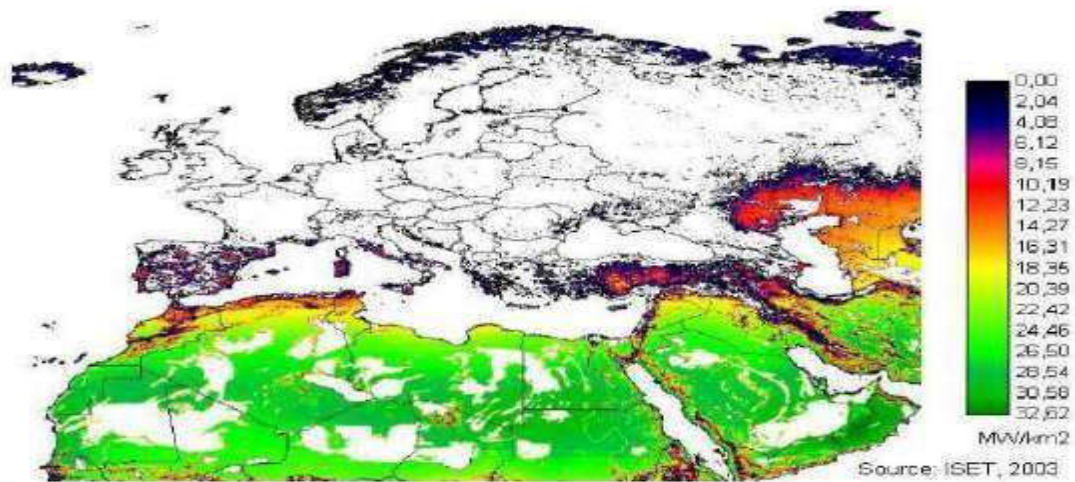


Figure 1.7: Production de l'énergie solaire thermique [28].

## 3.2. Technologie photovoltaïque

Comme son nom indique, cette technologie est basée sur l'effet photovoltaïque qui est composé par photo-volt, ce qui signifie la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Le principe photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839 et expliqué par Albert Einstein en 1905. Son principe

## Chapitre I : Généralité sur l'énergie solaire

peut être illustré par une simple diode qui fonctionne en inverse où le champ intrinsèque fait migrer les électrons d'une jonction à autre jonction. Cela est possible grâce à l'effet photovoltaïque qui permet la transition des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction. Ces électrons vont constituer le courant qui traverse les cellules du panneau photovoltaïque, donc le rôle de la lumière c'est l'augmentation du nombre des électrons disponibles à la conduction électrique et non pas la conduction électrique. Les électrons provient des atomes du dopage (Phosphore, Bore), l'utilisation des semi-conducteurs est nécessaire pour la fabrication des panneaux photovoltaïques vue leurs conductivité moyenne [27].

### **5. Conclusion**

L'énergie solaire présente de nombreux avantages et peut être exploitée de différentes manières. Dans ce chapitre, nous avons traité de l'énergie du soleil sous sa forme brute et de la quantité d'énergie dont on peut bénéficier grâce à l'énergie solaire, qui est divisée en deux parties : l'énergie solaire thermique et l'énergie solaire photovoltaïque. A travers ce chapitre, nous concluons que l'exploitation de cette énergie en Algérie semble plus importante et respectueuse de l'environnement. Dans le chapitre suivant, nous verrons en détail comment exploiter l'énergie solaire en la convertissant en énergie électrique via le système solaire photovoltaïque.



# **Chapitre II**

## **System solaire photovoltaïque**

## Chapitre II : System solaire photovoltaïque

### 1. Introduction

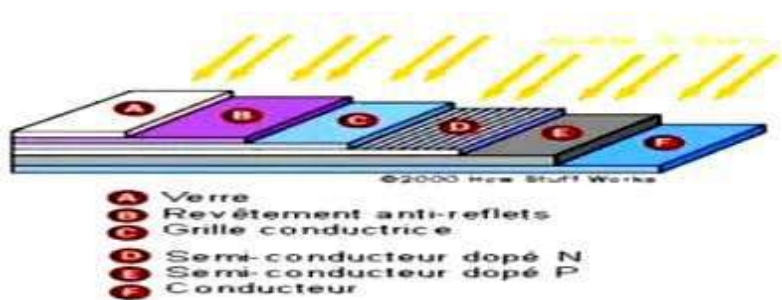
L'énergie du soleil peut être convertie directement en électricité à courant continu et en énergie thermique. Des panneaux solaires ou des systèmes solaires photovoltaïques sont disposés sur les toits ou dans les fermes de sorte que le rayonnement solaire tombe sur les panneaux solaires photovoltaïques pour faciliter l'interaction qui convertit le rayonnement solaire en électricité. L'énergie solaire peut également être utilisée pour alimenter un seul bâtiment ou à l'échelle industrielle. Lorsqu'il est utilisé à petite échelle, de l'électricité supplémentaire peut être stockée ou injectée dans le réseau électrique. L'énergie solaire n'a pas de limites, la seule limite est notre capacité à la convertir de manière rentable en électricité.

Dans ce chapitre, nous verrons comment bénéficier de l'énergie solaire à l'aide de panneaux solaires photovoltaïques.

### 2. Histoire

La science de la conversion directe de l'énergie solaire en électricité est les batteries à l'oxyde cuivreux et au sélénium qui sont apparues en 1930. Mais ce n'est que les premières cellules photovoltaïques au sélénium ont été produites dans un laboratoire américain en 1954 (Société Bell Téléphone laboratoires). Le premier générateur a été utilisé sur le satellite Pioneer en 1958 et dans les années 1980, la technologie photovoltaïque terrestre a été Installation de plusieurs centrales électriques de plusieurs mégawatts [47].

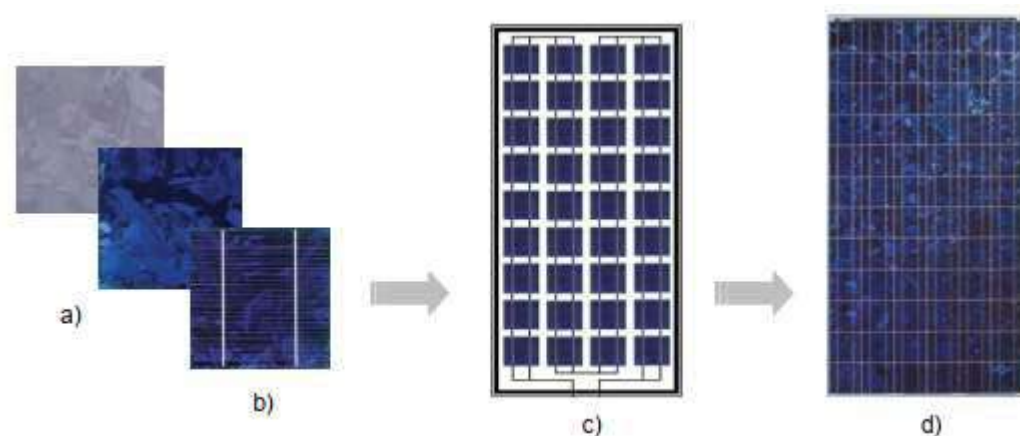
Le mot « photovoltaïque » (PV) est composé de deux mots ; « photo » qui veut dire lumière et « voltaïque » (d'après le nom du physicien italien Alessandro Volta (1745-1825) ayant découvert la première batterie électrochimique) qui veut dire électricité [48,49].



**Figure 2.1** : Structure basique d'une cellule solaire [50].

### **3.Cellule photovoltaïque (PV)**

La cellule PV ou encore photopile est un dispositif optoélectronique capable de capter et convertir directement la lumière solaire par un processus appelé « effet photovoltaïque» [50-52] établissant une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut alors varier entre 0,3V et 0,7V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [53].



a) Plaquettes sans connectique, b) Cellule PV élémentaire, c) Générateur photovoltaïque, d) Photo d'un générateur PV poly-cristallin commercial

**Figure 2.2 :** Exemple de cellule et de module photovoltaïque en silicium [53].

#### **3.1. Principe d'une cellule photovoltaïque:**

Une cellule photovoltaïque est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur absorbant l'énergie lumineuse et la convertir directement en courant électrique.

L'effet photovoltaïque est donc un phénomène physique propre à certains matériaux semi-conducteurs exposés à la lumière produisant de l'électricité. Le plus connu d'entre eux est le silicium cristallin qui est utilisé aujourd'hui dans la fabrication des panneaux solaires [41].Le Principe de la fonction de cette cellule nécessite la propriété d'absorber le rayonnement émet de la lumière à partir de matériaux semi-conducteurs.

Ainsi, sur la base le choix des matériaux utilisés, la conception des cellules photovoltaïques se fait en fonction de certaines de leurs propriétés physiques de sorte que les électrons facilement libérés des atomes lorsqu'ils sont excités par des photons.

## Chapitre II : System solaire photovoltaïque

Ils proviennent du spectre solaire et possède une certaine quantité d'énergie selon sa longueur vagues de l'océan. Lorsque cette cellule est exposée à un rayonnement, les photons produisent des trous d'électrons d'énergie supérieure à la bande d'énergie d'un semi-conducteur. Les porteurs de charge nouvellement créés dans la région d'appauvrissement sont séparés par le champ électrique existant. Il en résulte l'établissement d'un potentiel de tension appelé la photo voltage. Une fois la charge connectée à la batterie, cette tension produit un courant (appelé photo courant) qui circulera dans le circuit. Cela est connu sous le nom d'effet photovoltaïque, il a été découvert par Edmond Becquerel en 1889 [54].

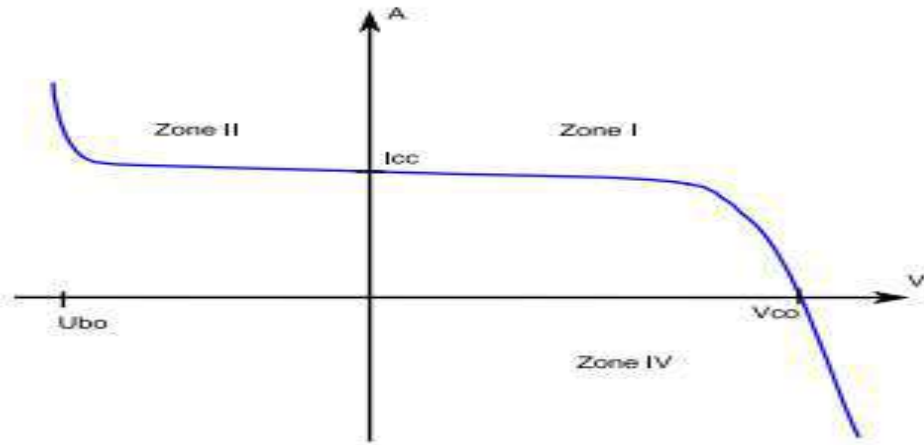


**Figure 2.3:** Principe d'une cellule photovoltaïque [54].

### **3.2. Modélisation des caractéristiques électriques de cellule PV**

La cellule photovoltaïque possède une caractéristique  $I(V)$  non linéaire balais 3 quadrants sur les 4 existants [35] et elle est un récepteur dans le quadrant 2 et dans le quadrant 4. Le fonctionnement dans ces deux quadrants est à proscrire car un risque de destruction par phénomène d'échauffement local (hot spot) est possible, tandis que le fonctionnement dans le quadrant 1 est le fonctionnement normal. En effet, dans ce cas, la cellule est un générateur, elle produit donc de l'énergie et l'objectif alors donc de faire travailler la cellule dans ce quadrant [66].

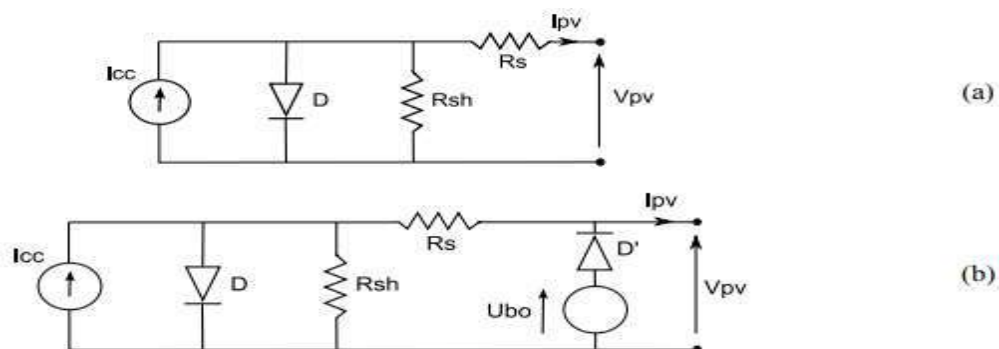
## Chapitre II : System solaire photovoltaïque



**Figure 2.4 :** Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque [35].

La tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ) d'une cellule PV est comprise entre 0,3V et 0,7V selon le matériau utilisé, la température et son état de vieillissement. Son courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) varie principalement selon le niveau d'éclairement et selon les technologies et les tailles de cellules (entre 5 et 8A pour le silicium cristallin). Une cellule PV peut être modélisée par les schémas présentés sur la Figure 2-5. La Figure 2-5a modélise la cellule PV dans les 1er et 4ème quadrants. Pour simuler la caractéristique de la cellule dans le 2ème quadrant une quatrième branche est rajoutée en parallèle (voir Figure 2-5b)[66].

Cette branche est constituée d'un générateur de tension  $U_{bo}$  ( $U_{bo}$  est la tension d'avalanche) et d'une diode mise en série. Elle simule le fonctionnement de la cellule PV lorsqu'elle est polarisée en inverse[37].



**Figure 2.5 :** Circuit équivalent complet d'une cellule PV[36].

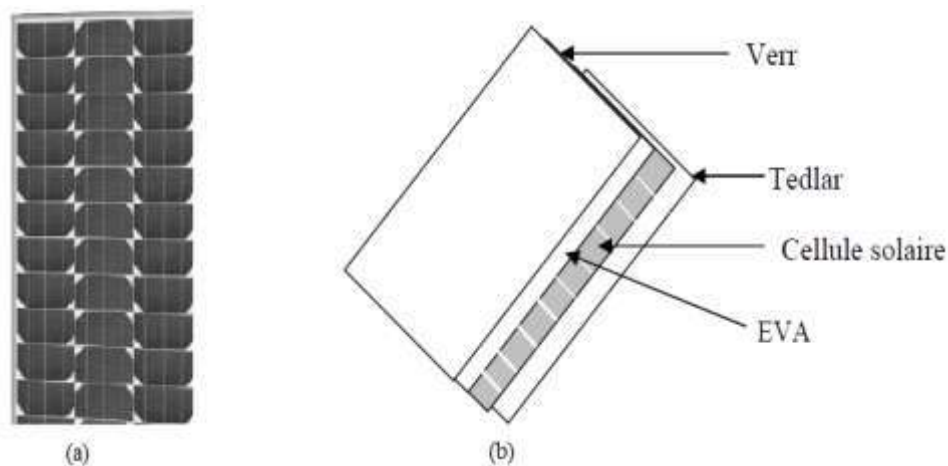
Dans le cas où la cellule PV fonctionne en générateur (quadrant 1) elle produit un courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) proportionnel à l'éclairement. Cette modélisation statique d'une cellule PV polarisée est très simple et peut être facilement mise en

## Chapitre II : System solaire photovoltaïque

œuvre dans les outils de simulation. Les limites de ce modèle sont l'absence de modélisation de la dynamique de la cellule et des phénomènes d'échauffement au sein de la cellule. Néanmoins ce modèle permet de reproduire les principaux comportements d'une cellule PV dans les conditions réelles de fonctionnement et ses interactions avec les autres éléments du système [37].

### 4. Modules photovoltaïques

Pour augmenter la quantité produite de puissance, les cellules PV sont reliées entre elles pour former un module PV comme indiqué en Figure 2.6. Les cellules sont branchées en série afin d'augmenter la tension en conservant le courant, par contre la mise en parallèle augmente le courant pour la même tension. Chaque série est protégée au moyen d'une diode by-pass (ou diode anti retour). En effet, quand une cellule est mal éclairée la diode permet d'éviter que l'échauffement résultant ne provoque pas une dégradation ou une panne [38,39].



**Figure 2.6 :** Module photovoltaïque [38].

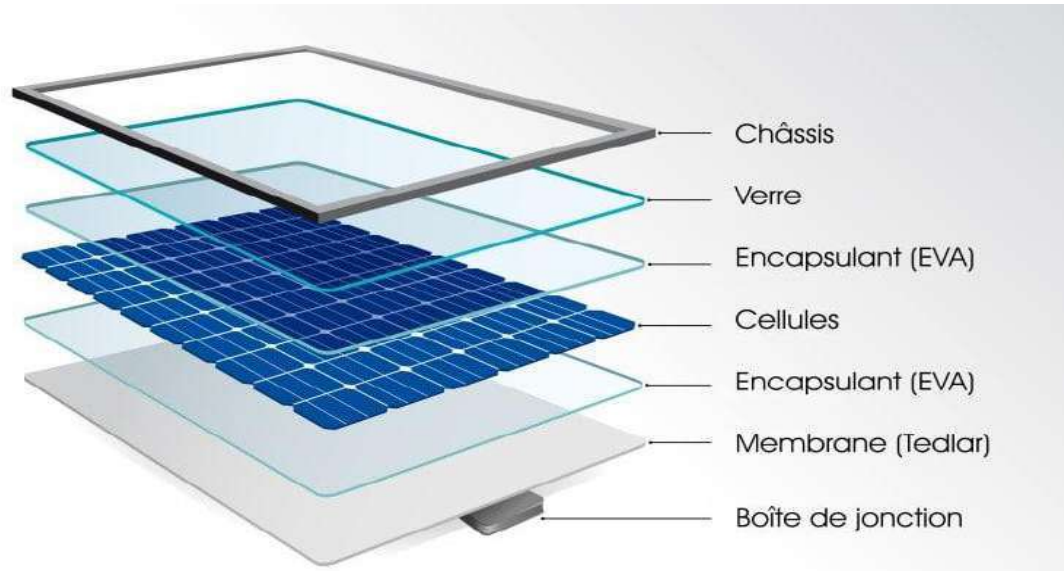
#### 4.1. Constitution d'un module de photovoltaïque

Un module solaire photovoltaïque est composé généralement de six éléments (Figure 2.7): [40]

- Cadre en aluminium ;
- Joint pour fixer le module ;
- Verre pour la protection du module ;

## Chapitre II : System solaire photovoltaïque

- Couche de l'EVA (EVA : éthylène-acétate de vinyle) pour résister aux intempéries et à l'humidité ;
- Cellules photovoltaïques ;
- Feuille de Tedlar blanc pour plus de résistance mécanique des grands modules.

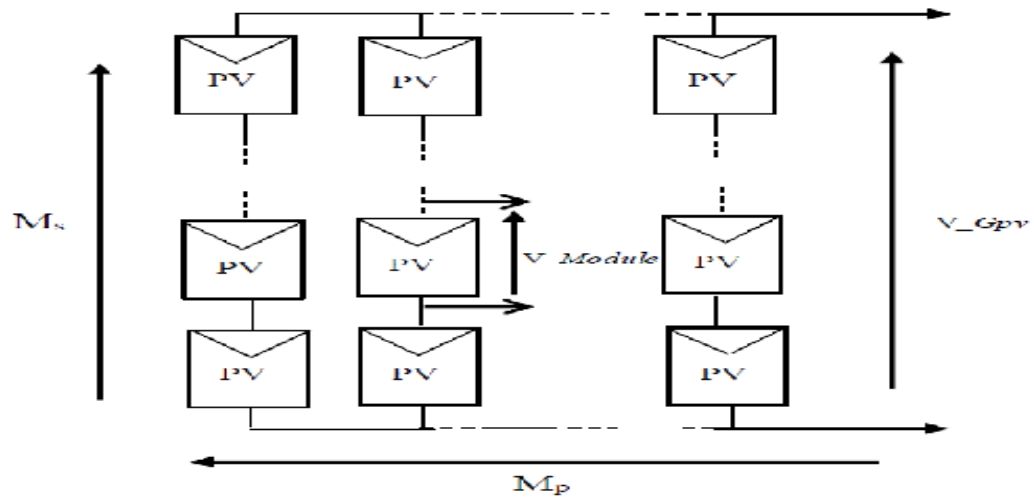


**Figure 2.7** : Composition d'un module solaire photovoltaïque [40].

### **5. Générateur photovoltaïque**

Pour obtenir une puissance plus élevée, plusieurs modules doivent être connectés en série et/ou en parallèle, comme illustré à la Figure 2.8. La courbe de fonctionnement de la combinaison série-parallèle de modules est similaire à la courbe de la batterie de base, bien sûr, il existe différents paramètres électriques. On note ici que pour les batteries également, seuls des modules identiques doivent être connectés en série et en parallèle [42,43].

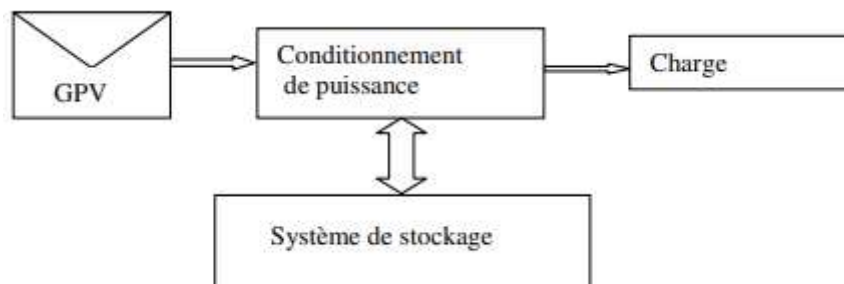
## Chapitre II : System solaire photovoltaïque



**Figure 2.8 :** Modules photovoltaïques connectés en série et en parallèle [42,43].

### **6. Définition d'un système photovoltaïque (PV)**

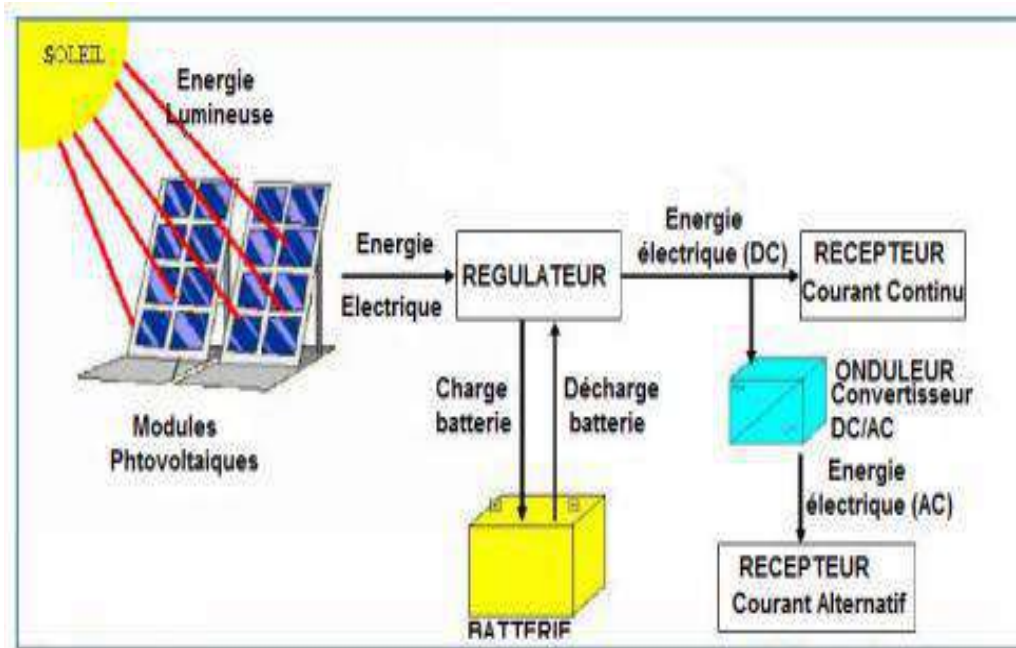
Un système photovoltaïque(PV) est un ensemble d'éléments (constituants) de production d'électricité en utilisant une source solaire. Ces constituants sont essentiellement le champ PV, le conditionnement de puissance, le système de stockage (dans un certain cas), et la charge (voir Figure 2.9a). Le conditionnement de puissance peut comprendre: un régulateur seul, un régulateur avec un convertisseur (DC /DC ou/et DC/ AC) ou un convertisseur seul. Un exemple d'un système plus détaillé est montré sur la Figure 2.9b[44].



**Figure.2.9a :** Chemin système photovoltaïque [44].



## Chapitre II : System solaire photovoltaïque



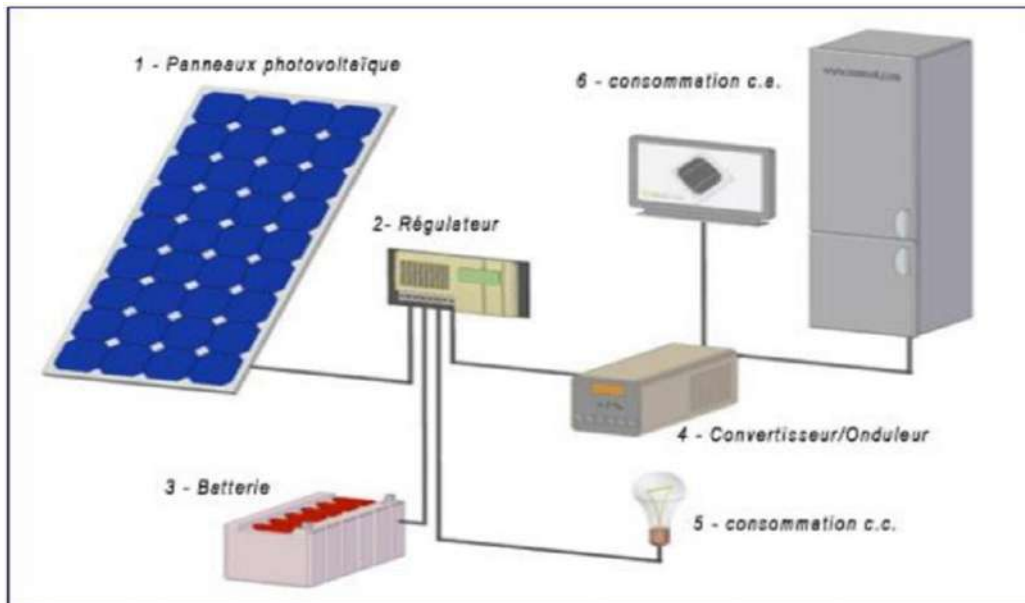
**Figure 2.9b** : Système photovoltaïque plus détaillé [44].

### **7. Type des systèmes PV**

Selon la manière dont l'énergie est utilisée, il existe trois différents types de systèmes PV ; à savoir : les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes raccordés au réseau.

#### **7.1. Les systèmes autonomes**

Une installation PV autonome est une installation qui fonctionne indépendamment du réseau électrique ou toutes autres sources d'énergies. Cette installation est utilisée pour alimenter un ou plusieurs consommateurs situés, comme les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignés ainsi que des applications comme la surveillance et le pompage d'eau. Il existe deux types de systèmes PV autonomes, avec stockage et sans stockage. Le schéma général d'un système PV autonome est représenté sur la Figure 2.10[45].



**Figure 2.10:** Système PV autonome avec batterie[45].

### **7.2. Les systèmes PV hybrides**

Les systèmes PV hybrides intègrent un générateur PV et un autre générateur tels que: groupe électrogène éolien, système hydroélectrique et même parfois le réseau public d'électricité. Ces systèmes s'appliquent particulièrement bien à des sites éloignés nécessitant d'avoir de l'électricité à tout moment où les coûts de transport du carburant sont élevés et il n'est pas encore rentable d'utiliser le système PV seul avec les batteries. Ils sont souvent utilisés pour de très nombreuses applications d'intérêt sensible et stratégique comme les relais de télécommunication, les postes frontaliers, l'habitat isolé, etc., hors réseau d'électricité conventionnelle [46]. Un système hybride est représenté par la Figure 2.11.

## Chapitre II : System solaire photovoltaïque

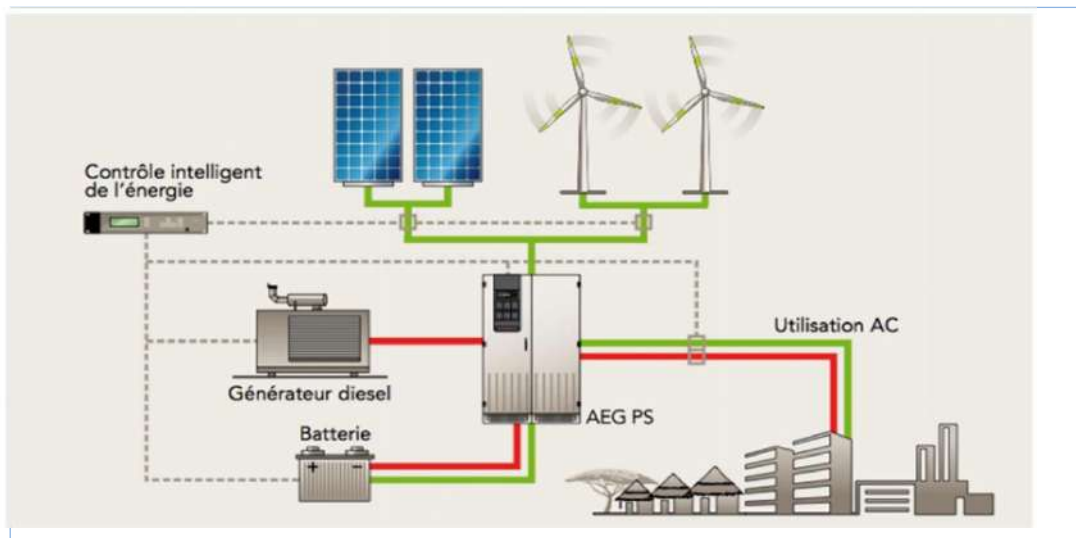


Figure 2.11: System PV hybride [46].

### 7.3. Les systèmes raccordés aux réseaux :

Dans ces systèmes PV, le générateur PV est couplé directement au réseau électrique. Le système est muni de convertisseurs de puissance pour adapter l'énergie produite par les panneaux PV. Ces convertisseurs sont composés d'un hacheur muni d'un MPPT, d'un filtre, d'un onduleur et d'une électronique appropriée pour assurer l'adaptation en amplitude et en fréquence avec le réseau[47]. La structure d'un système PV connecté au réseau est montrée par la Figure 2.12.

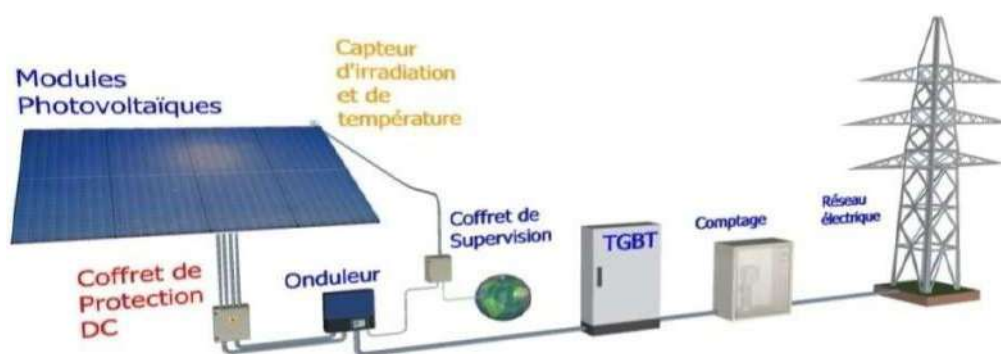


Figure 2.12: Structure d'un système PV connecté au réseau [47].

## Chapitre II : System solaire photovoltaïque

### **8. Comparaison entre le solaire thermique et le photovoltaïque**

En fait, aucune des technologies n'est actuellement dominante, car chaque technologie a ses propres avantages. Pour le PV, il privilégie la petite et la moyenne production, par opposition au solaire thermique, plus adapté à la production à grande échelle, avec des capacités allant de 10 MW à 100 MW, et le PV présente également des avantages pour les zones rurales où le réseau à installer est très cher. D'autre part, le solaire thermique a un avantage très important de stocker l'énergie à travers des réservoirs de sel fondu, ce qui est une chose difficile pour le photovoltaïque, et pour les endroits où la lumière du soleil est importante, le solaire thermique offre un coût de production inférieur au photovoltaïque [48].

### **9. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque**

Les systèmes photovoltaïques présentent un grand nombre d'avantages et d'inconvénients qui sont :

#### **9.1 Avantage**

Les systèmes photovoltaïques ont plusieurs avantages :

- ✓ La production d'énergie photovoltaïque a été choisie en premier lieu pour sa nature non-polluante et renouvelable
- ✓ Le montage de ces systèmes est simple et facile à adapter aux besoins énergétiques.
- ✓ Les couts de réalisation et d'installation sont minimales et les entretiens sont réduits
- ✓ L'installation ne nécessite pas de grands investissements ni une haute expérience
- ✓ Elle ne cause aussi aucune perturbation au niveau de troubles sonores au problème d'espace

#### **9.2 Inconvénients**

- ✓ la technologie photovoltaïque est la méthode de production énergétique la plus fiable pour les zones isolées

## Chapitre II : System solaire photovoltaïque

- ✓ L'utilisation de la technologie photovoltaïque n'est pas aussi propagée que les énergies fossiles pour des raisons économiques
- ✓ Les pays pauvres ou en cours d'évolution ne peuvent pas se permettre d'utiliser cette méthode
- ✓ Lorsque l'énergie électrique doit être stockée sous forme chimique (batterie), cela augmente le coût du générateur
- ✓ Il y a encore beaucoup de problèmes avec le stockage de l'énergie électrique

### **10. Conclusion**

Bien que le soleil nous fournisse une énorme énergie lumineuse, celle-ci est actuellement sous-utilisée de manière rationnelle, en raison des nombreux problèmes liés à ce type d'énergie. Dans ce chapitre nous avons fait révéler les concepts de base de l'énergie photovoltaïque et le principe de l'effet photovoltaïque, le générateur photovoltaïque et les paramètres électriques qu'un module photovoltaïque est introduit. C'est une bonne section consacrée pour les différents types de systèmes PV, les différentes topologies PV et les systèmes PV connectés au réseau. Dans le troisième chapitre, nous aborderons les méthodes de captage de l'énergie des panneaux solaires en traitant de la solution au problème qui prévaut dans ce domaine, à savoir les méthodes de stockage les plus efficaces et les plus répandues.

## **Chapitre III**

# **Méthodes de stockage de l'énergie solaire**

## Chapitre III : Méthodes de stockage de l'énergie solaire

### **1. Introduction**

Les appareils ou les supports physiques peuvent stocker une certaine forme d'énergie pour effectuer une opération utile à un moment ultérieur ou à un endroit différent. Le stockage d'énergie réduit l'inadéquation entre la production et la demande d'énergie. Par exemple, l'énergie solaire stockée serait toujours disponible pendant la nuit. En outre, l'énergie stockée peut être un supplément pendant la demande de pointe d'énergie. En outre, l'énergie stockée peut être transportée. Une batterie, par exemple, permet d'utiliser une montre-bracelet, un téléphone portable ou un ordinateur portable.

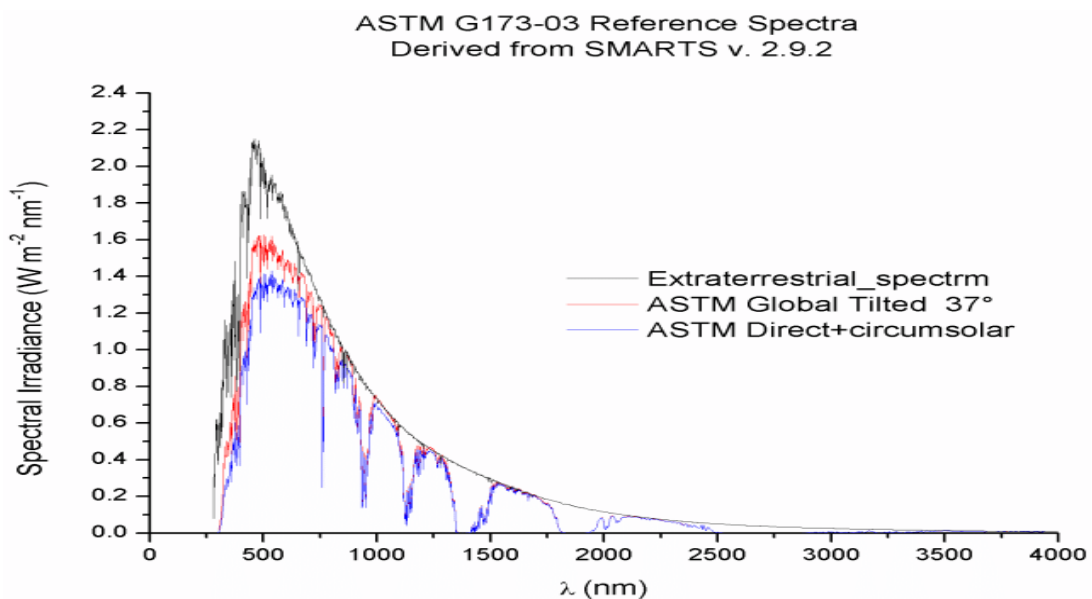
Ce chapitre souligne l'importance du stockage et traite des systèmes de stockage d'énergie thermique, électrique, chimique et mécanique. Le stockage d'énergie solaire par chaleur sensible et/ou latente et pour des applications à court et long terme est brièvement discuté. Certains matériaux courants de changement de phase et leur utilisation pour la technique de stockage de chaleur latente sont décrits. Les systèmes thermiques souterrains, le condensateur, l'hydroélectricité, la batterie, le stockage d'énergie chimique par biosynthèse sont brièvement discutés, et enfin on aborde au stockage d'énergie mécanique par air comprimé.

## Chapitre III : Méthodes de stockage de l'énergie solaire

### 2. Stockage d'énergie solaire

Le soleil fournit en permanence à la Terre de l'énergie avec une densité de puissance de  $1361 \text{ W.m}^2$  sous forme de rayonnement.

Ce rayonnement électromagnétique qui arrive au sommet de l'atmosphère s'étale sur une large plage de longueur d'onde de 100 nm à 2500 nm se répartissant pour moitié dans la plage du visible (400-700 nm) et pour moitié dans la plage de l'infrarouge (700-2500 nm), avec 1 % dans la gamme ultraviolet[57].



**Figure 3.1 :** Irradiation solaire au sommet de l'atmosphère (AM 0), globale au niveau du sol (AM 1.5 Global) et directe au sol (AM 1.5 Directe) [58].

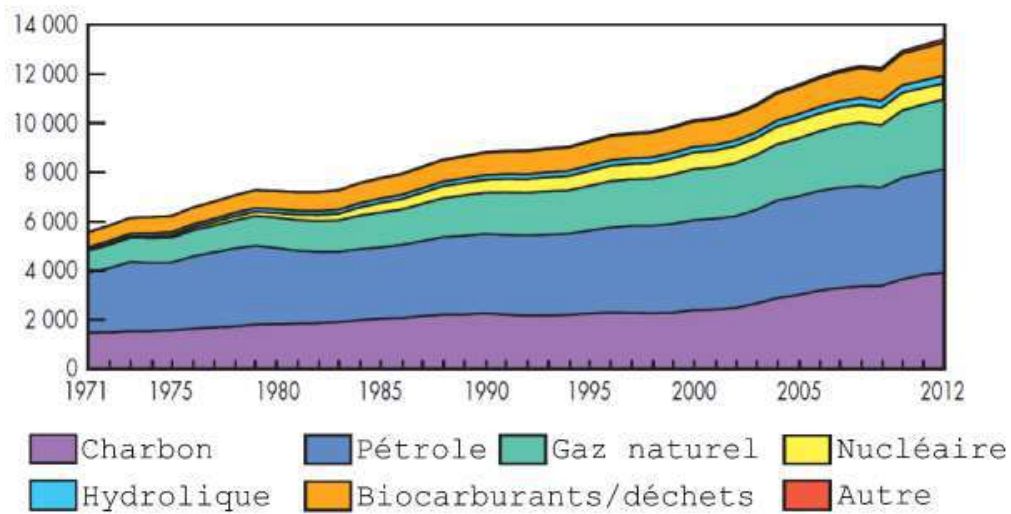
Le soleil apporte ainsi à la Terre de la chaleur et de la lumière, devenant la principale source d'énergie naturelle. Une source permet en effet d'alimenter la photosynthèse et de générer le cycle de l'eau et des vents. Enfin elle tient un rôle dans la géothermie de faible profondeur en réchauffant les premières strates du sol[57].

Néanmoins, l'énergie solaire est intermittente, et la société humaine s'est développée autour de sources d'énergie plus flexible. Pour preuve, la Figure 3.2 présente la répartition de la consommation d'énergie primaire mondiale entre ces différentes sources, que sont principalement les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz), l'énergie nucléaire ou encore les biocarburants. Ces ressources énergétiques, outre le fait qu'elles soient pour la plupart consommées beaucoup plus vite qu'elles ne sont produites, ne sont pas sans impact sur l'écosystème mondial. En effet elles



## Chapitre III : Méthodes de stockage de l'énergie solaire

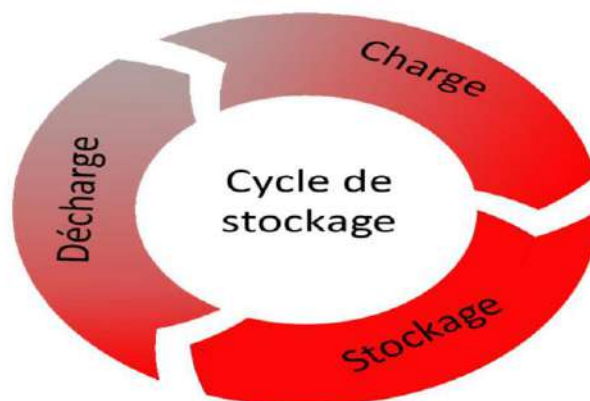
engendrent la production de divers déchets, à savoir : gaz à effet de serre, particules fines, déchets radioactifs qui nuisent à l'équilibre de cet écosystème[57].



**Figure 3.2 :** Consommation mondiale d'énergie primaire de 1971 à 2012 en Million de tonnes équivalent pétrole (Mtep) [59].

### 2.1. Principe de stockage d'énergie solaire

Le stockage de l'énergie est l'action qui consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure. L'opération de stockage d'énergie est toujours associée à l'opération inverse consistant à récupérer l'énergie stockée (le déstockage). Ces deux opérations de stockage/déstockage constituent un cycle[48].



Le stockage d'énergie fonctionne par cycle dans lequel nous pouvons observer trois phases : [67]

- La charge. Cette phase correspond au moment où la source produit de l'énergie et que le milieu de stockage n'est pas saturé en énergie.

## Chapitre III : Méthodes de stockage de l'énergie solaire

- Le stockage. Cette phase correspond au moment où le dispositif de stockage ne reçoit plus d'énergie venant de la source (soit car la source n'émet plus, soit car le système de stockage est plein) et que le consommateur ne demande pas d'énergie du système de stockage.
- La décharge. Cette phase correspond au moment où afin de satisfaire ses besoins en énergie, le consommateur puise dans le système de stockage.

## Chapitre III : Méthodes de stockage de l'énergie solaire

### 2.2. Classification des moyens de stockage d'énergie solaire

Le stockage de l'énergie électrique passe le plus souvent par une forme d'énergie intermédiaire (gravitaire, de compression, chimique, cinétique, thermique...) que l'on accumule, puis transforme à nouveau en électricité. Seules l'énergie électrostatique avec les condensateurs ou super condensateurs, et l'énergie électrodynamique avec le stockage magnétique supraconducteur, font quelque peu exception en stockant des charges électriques statiques ou en mouvement. Les systèmes de stockage et les différentes formes d'énergies intermédiaires sont présentés dans le tableau 2.1 ci-dessous [48].

**Tableau 3.1 :** Formes d'énergie intermédiaires de stockage

<b>Energie</b>	<b>Systèmes de stockage</b>
Gravitaire	Pompage hydraulique
Thermique	Stockage de chaleur latente ou sensible avant production électrique
De pression	Compression d'air
Chimique	Batteries d'accumulateurs électrochimiques
	Stockage H <sub>2</sub> par électrolyse et pile à combustible
Cinétique	Volant d'inertie
Electromagnétique	Courant permanent à bobine super conductrice
Electrostatique	Condensateur classique
	Supercondensateur à électrolyte double couche

Il existe également plusieurs méthodes différentes qui ne se limitent pas à ce tableau.

## Chapitre III : Méthodes de stockage de l'énergie solaire

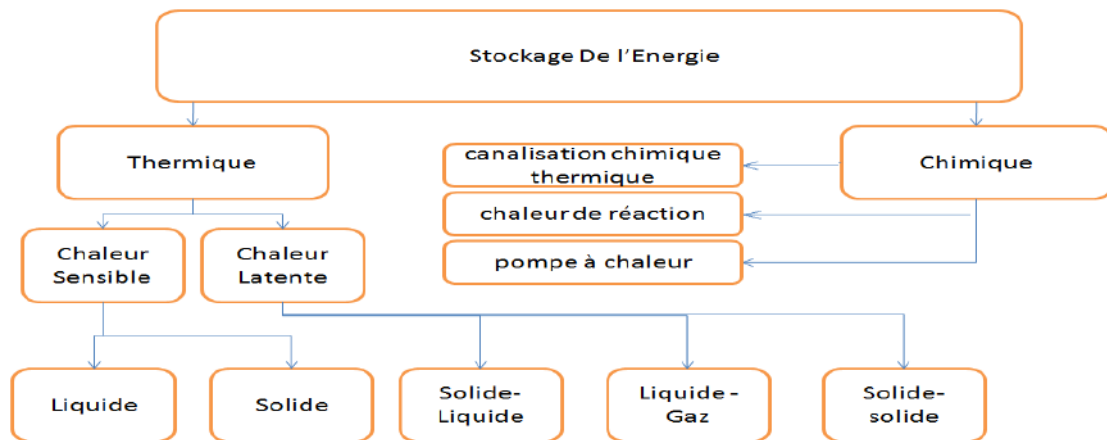
### 2.2.1. Stockage de l'énergie thermique

Le stockage de la chaleur a toujours été un problème important. Nous sommes en présence d'un décalage entre les apports de chaleur et les besoins (jour/nuit,été/hiver).

Le stockage de L'énergie thermique permet à la chaleur d'être utilisée en digéré.

La chaleur peut être stockée sous plusieurs formes :[49]

- La chaleur sensible : stockage dans des matériaux inertes
- La chaleur latente : utilisation de matériaux à changement de phase qui emmagasinent l'énergie à mesure qu'ils changent de phase.
- La chaleur des réactions : thermochimie et absorption, chimique.



**Figure 3.3 :** Classification des techniques de stockage de chaleur [49].

#### 2.2.1.1 Stockage sensible

Le stockage sensible est le moyen le plus commun de réutiliser la chaleur [50]. Dans les enceintes de stockage sensible, la température du moyen de stockage augmente avec la chaleur transférée. Ce stockage non isotherme accumule une quantité de chaleur proportionnelle à sa masse et à sa capacité calorifique telle que présentée dans l'équation (2.1).

$$E_{\text{sensible}} = m.c.p.\Delta T \quad (3.1)$$

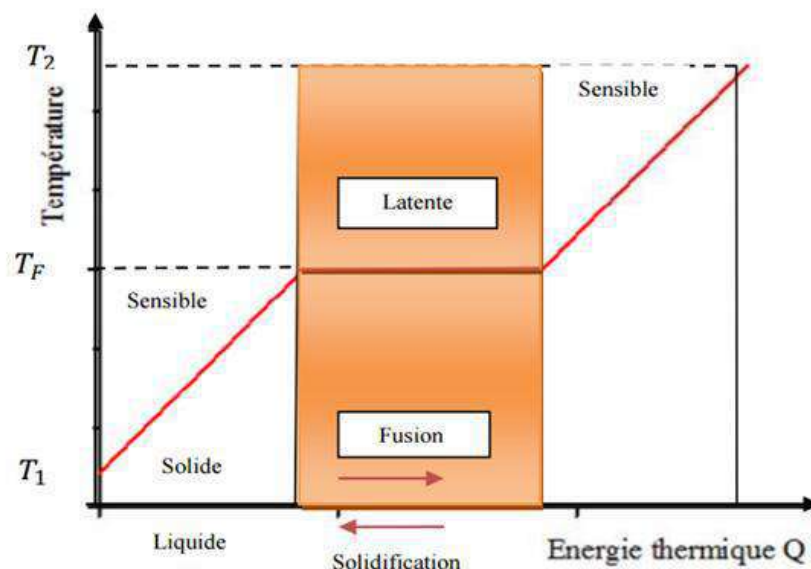
Dans ces types de stockage, le matériau de stockage se présente soit sous forme liquide, soit sous forme solide, soit les deux. Dans les réservoirs de stockage solide, le matériau de stockage est conditionné sous forme de lit granulaire ou matriciel fixe et l'échange de chaleur est réalisé via un fluide caloporteur qui transfère sa chaleur via un échangeur de chaleur ou qui traverse directement le matériau de stockage poreux. Dans ce cas, le réservoir de stockage s'appelle un régénérateur. Lorsque le fluide caloporteur est un gaz, sa capacité calorifique étant très faible devant le matériau de

## Chapitre III : Méthodes de stockage de l'énergie solaire

stockage et sa contribution au stockage est négligeable. Lorsque le fluide caloporteur est un liquide, alors, sa contribution au stockage n'est pas négligeable et le système est appelé dual. Le solide le plus utilisé est le béton en raison de son faible coût, sa facilité d'usage et sa disponibilité, ses propriétés de résistance mécanique mais surtout sa capacité calorifique élevée[51].

D'autres matériaux peuvent être considérés comme les roches, le sable ou encore les matériaux réfractaires comme la silice ou l'alumine.

Dans les réservoirs de stockage liquide, il est possible de profiter de la stratification naturelle du matériau et de stocker du fluide chaud et du fluide froid dans un même réservoir. Ce type de réservoir s'appelle thermocline et présente une couche chaude dans la partie supérieure et une couche froide dans la partie inférieure ainsi que d'une zone de gradient thermique entre les deux[51].



**Figure 3.4** Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état[54].

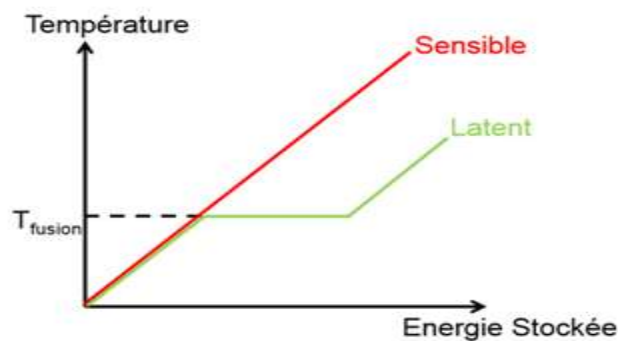
On remarque donc que la chaleur latente est beaucoup plus importante que la chaleur sensible (pour un écart de température pas trop important) et les points de fusion dépendent des corps utilisés. Ce critère permet d'utiliser des matériaux différents en fonction des températures souhaitées. Ces matériaux sont les matériaux à changement de phase (MCP).

## Chapitre III : Méthodes de stockage de l'énergie solaire

### 2.2.1.2 Stockage latent

Le stockage de la chaleur latente implique de chauffer un matériau jusqu'à ce qu'il change de phase, c'est-à-dire soit de la phase solide à la phase liquide, soit de la phase liquide à la phase gaz ou encore lors de sa transition solide-solide [49]. Lorsque le matériau atteint sa température de changement de phase, il absorbe une quantité de chaleur pour réaliser la transformation, connue sous le nom de chaleur latente de fusion ou de vaporisation selon le cas. A l'inverse, lorsque le matériau liquide ou gaz est refroidi, il retourne à la phase solide ou liquide en restituant sa chaleur latente. La quantité de chaleur stockée et restituée dépend de la masse du matériau et selon l'équation 1.2 :

$$E_{\text{latent}} = m \cdot \Delta h \quad (3.2)$$



**Figure 3.5 :** Graphe de la température-enthalpie présentant l'énergie stockée dans un système de stockage latent en comparaison avec un système de stockage sensible[49].

### 2.2.2. Stockage électrique direct

Le stockage direct de l'électricité, c'est-à-dire par des moyens complètement électriques, peut être réalisé au travers de deux technologies différentes.

#### 2.2.2.1 Stockage par inductance supraconductrice (SMES)

Le stockage SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) repose sur le maintien d'un courant électrique dans une bobine en court-circuit faite de matériaux supraconducteurs. Les électrons y circulent alors de manière continue avec très peu de pertes énergétiques générant un puissant champ magnétique. Le chargement et le déchargement de l'énergie stockée demandent l'ouverture du court-circuit et la connexion à un convertisseur électronique de puissance. Le maintien de la

## Chapitre III : Méthodes de stockage de l'énergie solaire

supraconductivité des matériaux actuels demande un système de refroidissement extrêmement performant pour maintenir la bobine proche du zéro absolu [55].

### **2.2.2.2. Stockage par super condensateur**

A l'image d'un condensateur classique, les super condensateurs conservent l'énergie sous la forme d'un champ électrique (électrostatique) entre deux électrodes. Cependant, la densité énergétique des super condensateurs est bien supérieure aux condensateurs classiques. Le champ électrique provient de l'accumulation de charges de signe opposé sur des électrodes proches en empêchant tout transfert d'électron entre celles-ci. Cette technologie est actuellement utilisée principalement dans le milieu du transport[55].

### **2.3. Stockage à grande échelle**

Il est destiné à un fonctionnement au niveau du réseau ou de systèmes de production intermittente de grande puissance [55], tels que les éoliens, les photovoltaïques, les houlomoteurs. Actuellement, on préfère souvent maintenir en chauffe des centrales thermiques que d'investir dans des systèmes de stockage.

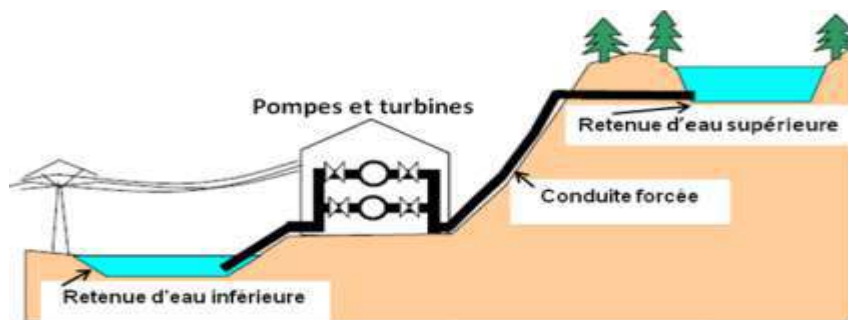
#### **2.3.1. Stockage gravitaire hydraulique**

L'eau entre deux réservoirs à des hauteurs différentes (dénivelé  $h$ ) et est soit pompée ou soit actionne des turbines (Figure 2.4).

L'énergie stockée  $W$  (en J) se calcule par : [56]

$$mgh=W \quad (3.3)$$

Où  $m$  est la masse d'eau (en kg) et  $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$  est l'accélération de la pesanteur.



**Figure 3.6:**Stockage gravitaire hydraulique[56].

## Chapitre III : Méthodes de stockage de l'énergie solaire

C'est le plus répandu des stockages à grande échelle avec 90 GW produit dans le monde annuellement, soit 3% de la capacité globale de production. Citons le barrage de Grand-Maison en France ayant un dénivelé de 935 m, une retenue d'eau de 170 Mm<sup>3</sup> et permet une puissance de 1800 MW [56].

### 2.3.2. Batteries

Dans les batteries plomb-acide ou nickel-cadmium, par la réaction les composés solides générés électrochimiquement sont directement stockés dans où sont formées les électrodes. La masse qui peut être accumulée localement est forcément limitée. Mais pour contourner cette limitation, les batteries dites les cyclables par la conception de l'électrolyte (Figure 2.5.a) où le composant responsable du stockage d'énergie est un liquide maintenu en solution dans l'électrolyte. L'électrolyte utilisé est à base de ZnBr (zinc-brome), NaBr (sodium-brome), VBr (vanadium-brome) et PSB (polysulfure de poly brome). Depuis 1998, les batteries permettant un stockage de masse sont le soufre sodique, car ils sont moins encrassés et plus résistants (Figure 2.5.b) [57].

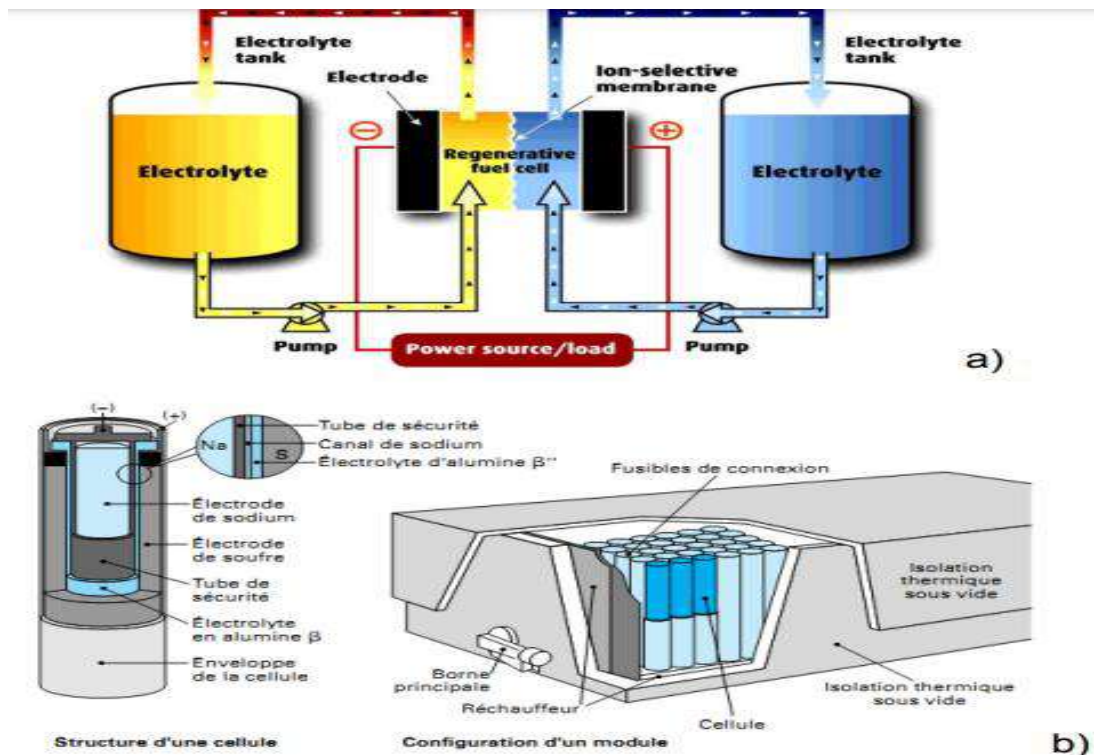


Figure 3.7. : Schéma de batterie à circulation (a) et batterie sodium-soufre (b) [57].



## Chapitre III : Méthodes de stockage de l'énergie solaire

### **2.4 .Stockage sous forme d'énergie cinétique**

Le principe du volant d'inertie permet de stocker de l'énergie sous forme d'énergie cinétique. Il était utilisé par les potiers mésopotamiens il y a des milliers d'années [68,69]. Il s'agit d'entraîner une masse (disque, anneau ou tube) à grande vitesse. L'énergie stockée est ensuite récupérée en freinant la masse mobile lors du retrait. Ce système a été historiquement utilisé pour réguler les moteurs thermiques (des locomotives aux vapeurs, par exemple). Toujours dans le domaine des transports, les volants d'inertie permettent de stocker l'énergie lorsque le véhicule freine pour la redistribuer au démarrage[70].Par conséquent, il peut être stocké directement l'énergie mécanique où l'électricité est stockée à l'aide de moteurs électriques spéciaux qui agissent comme des générateurs lors du déstockage[71].

### **2.5 .Le stockage sous forme d'énergie potentielle**

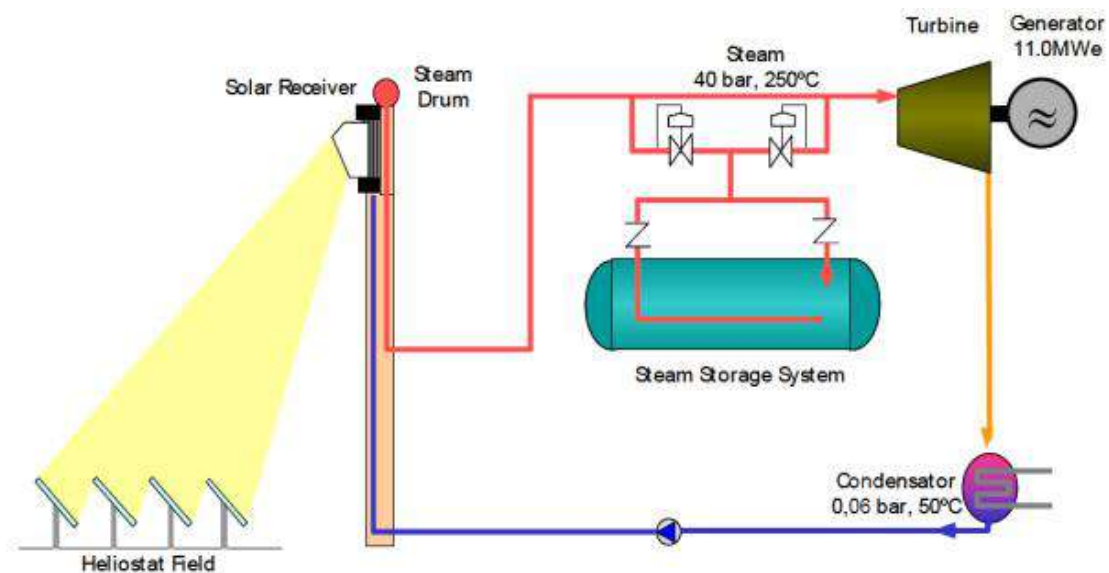
Les stations de pompage permettent de stocker de l'électricité sous forme d'énergie potentielle de l'eau [60]. Lors du stockage l'eau est pompée depuis un réservoir inférieur vers un réservoir supérieur, augmentant ainsi son énergie potentielle. Elle revient ensuite à son point de départ à travers une turbine pour produire de l'électricité. Ce mode de stockage de l'électricité est le plus répandu avec pas moins de 127 GWe de capacité installée dans le monde, soit environ 99 % de la capacité totale mondiale de stockage électrique [61].

### **2.6 .Stockage sous forme d'énergie interne**

Il est également possible de stocker de l'électricité sous forme d'énergie interne en comprimant de l'air qui est ensuite stocké dans des cuves ou dans des cavités naturelles (anciennes mines de sel, ancien réservoir de gaz naturel). On récupère ensuite l'énergie à l'aide d'une turbine de décompression [60]. La capacité mondiale installée pour ce type de stockage avoisine les 440 MWe [61].

### 2.7. Stockage active direct

Ce système très simple souffre cependant de limitations, car la vapeur y est stockée à haute pression, limitant la conception et l'utilisation pour la sécurité en limitant la densité d'énergie stockée jusqu'à  $30 \text{ kWh.m}^3$  [62]. Compte tenu de ses avantages et de ses inconvénients, ce type de stockage est souvent utilisé comme stockage tampon pour assurer une production pendant quelques dizaines de minutes au maximum. La centrale solaire à tour PS10, dont un schéma fonctionnel est présenté à la figure 3.8, utilise ce concept de stockage. La capacité du système est de 20 MWh, ce qui équivaut à 50 minutes de fonctionnement de la turbine à 50 % de la vitesse nominale [63].



**Figure 3.8** : Schéma de principe de la centrale solaire PS10 [64].

### 2.8. Stockage par voie chimique

La conversion de l'énergie électrique en un autre potentiel énergétique permet l'exploration autres chemins de stockage. La conversion électrochimique de l'énergie électrique offre une large gamme de technologies pour le stockage massif d'énergie[55].

## Chapitre III : Méthodes de stockage de l'énergie solaire

### **2.8.1. Stockage par conversion H<sub>2</sub>**

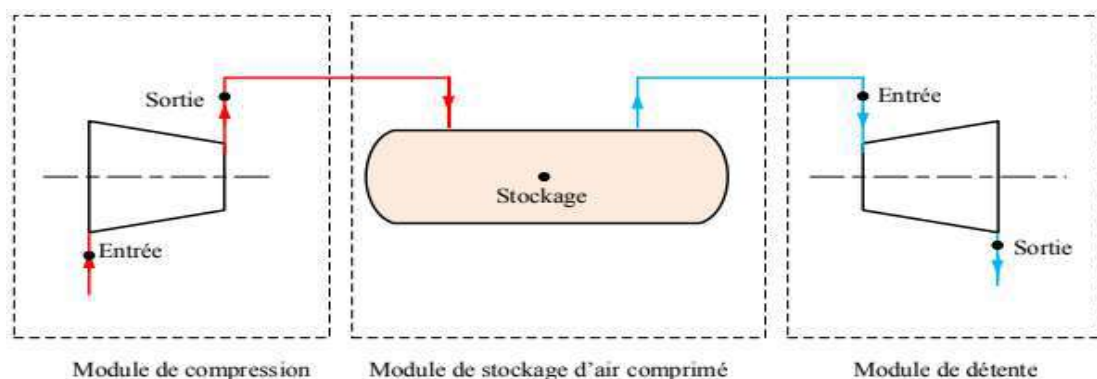
La production de dihydrogène à partir de molécules H<sub>2</sub>O par électrolyse est une voie de stockage vitalité. Lors de la production de H<sub>2</sub>, des molécules d'O<sub>2</sub> sont également produites et peuvent réutilisation lors du déstockage d'énergie ou du recyclage dans d'autres filières. En dehors de réutilisation de l'hydrogène dans les piles à combustible, pour le projet Myrte en Corse, il peut être injecté en faible proportion dans le réseau de distribution de gaz naturel (système « Electricity to Gas »), soit la conversion catalytique du dioxyde de carbone pour produire du méthane[55].

### **2.8.2. Stockage en batteries électrochimiques**

Une cellule électrochimique comporte deux électrodes, une anode et une cathode, qui capables d'échanger les ions à travers l'électrolyte. La technologie est largement utilisée comme solution de stockage d'énergie de secours [55].

### **2.9. Stockage par air comprimé**

Le stockage d'air comprimé est le plus souvent utilisé pour l'alimentation permanente du réseau. Les sources les plus couramment utilisées pour le stockage de l'air comprimé sont l'éolien offshore et terrestre et envisager également d'utiliser d'autres sources d'énergie renouvelables telles que le solaire photovoltaïque [72,73]. En général, à l'exception du couplage électrique en amont et en aval du système de stockage, la technologie comporte trois éléments de base, comme le montre la Figure 3.9. La modélisation de l'ensemble du système nécessite des sous-modèles de chaque partie du système.

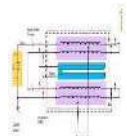

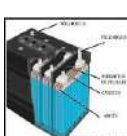
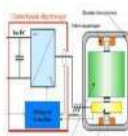

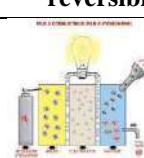


**Figure 3.9 :** Composition simplifiée du système de stockage à air comprimé[72].

## Chapitre III : Méthodes de stockage de l'énergie solaire

### 3. Comparaison entre les différents types de stockage d'énergie

**Tubule 3.2:** Comparaison de différentes technologies de stockage[55].

Technologie	Inductif Supra- conducteur	Super- condensateur	Electro- chimique	Volant Inertie	Air comprimé en bouteille	Hydrogène PAC réversible
Idustration						
Forme d'énergie	Magnétique	Electrostatique	Chimique	Mécanique	Mécanique	Chimique
Densité d'énergie	1 à 5 Wh/Kg	5 à 10 KWh	20 à 120 Wh/kg	1 à 5 Wh/kg	8 Wh/Kg(200bars)	300 à 600 Wh/Kg (200 à 300 bars) hors PAC
Capacité réalisable ou realise	qq KWh	Qq KWh	Qq W à qqMWh	Qq KWh à qq 10 KWh	Qq KWh à qq 10 KWh	NA
Constante de temps	qq s à 1min	Qq s à qq min	Qq 10 min (NiCd) à qq 10 heures	Qq min à 1 h	1 h à qq Jours (peu d'auto décharge)	1 h à qq jours (peu d'auto décharge)
Cyclabilité	qq 10 000 à qq 100 000 Fatigue mécanique	Qq 10 000 à qq 100 000	Qq 100 à qq 1000 dégradation chimique	Qq 10 000 à qq 100 000 fatigue mécanique	Qq 1000 à qq 10 000 Fatigue mécanique	??
Rendement électrique	> 0.9	0.8 à > 0.9 selon régime	0.7 à 0.8 selon techno et régime	0.8 > 0.9 Selon régime	0.3 à 0.5 selon régime	0.3 à 0.5
Connaissance de l'état de charge	Aisée (Courant)	Aisée (tension)	Difficile paramètres variable	Aisée (vitesse)	Aisée (pression)	Aisée (remplissage H2)
Couténergie KWh	500 à 7200	50 000 à 150 000(dimensionnement en puissance)	Pb-acide :50 à 200 Lithium : 700 à 1000	150 à 2000 (massif) ≈25000 composite	?	15
Cout puissance KW	≈ 300	≈ 300	250 à 1500	300 à 350	?	6000
Remarque	Cryogénie	Grand Cyclabilité	Rendement faible	Cout global compétitif sur la durée de vie	Bon à court terme	Intéressant si contexte de réseau d'hydrogène

### **4. Conclusion**

A travers ce chapitre, nous abordons les méthodes et les systèmes de stockage de l'énergie photovoltaïque. Dans le contexte de la crise de l'énergie, il est possible de suivre l'évolution des marchés en essayant de remplacer les énergies fossiles par le photovoltaïque, et en assistant à la diversification de cette application énergétique. En effet, le photovoltaïque était à l'origine réservé aux petits sites isolés, et nous sommes de plus en plus conscients que l'augmentation des watts crêtes par installation peut également modifier les habitudes des utilisateurs. La séparation de l'énergie et de la fonction énergétique est possible grâce à une optimisation hybride du système de stockage et la fonction énergétique sera assurée par un composant de stockage à long temps (batterie au plomb) et par un composant à faible temps et donc très dynamique (supercondensateurs).

## **Chapitre IV**

# **System de stockage de l'énergie solaire par l'air comprimé**

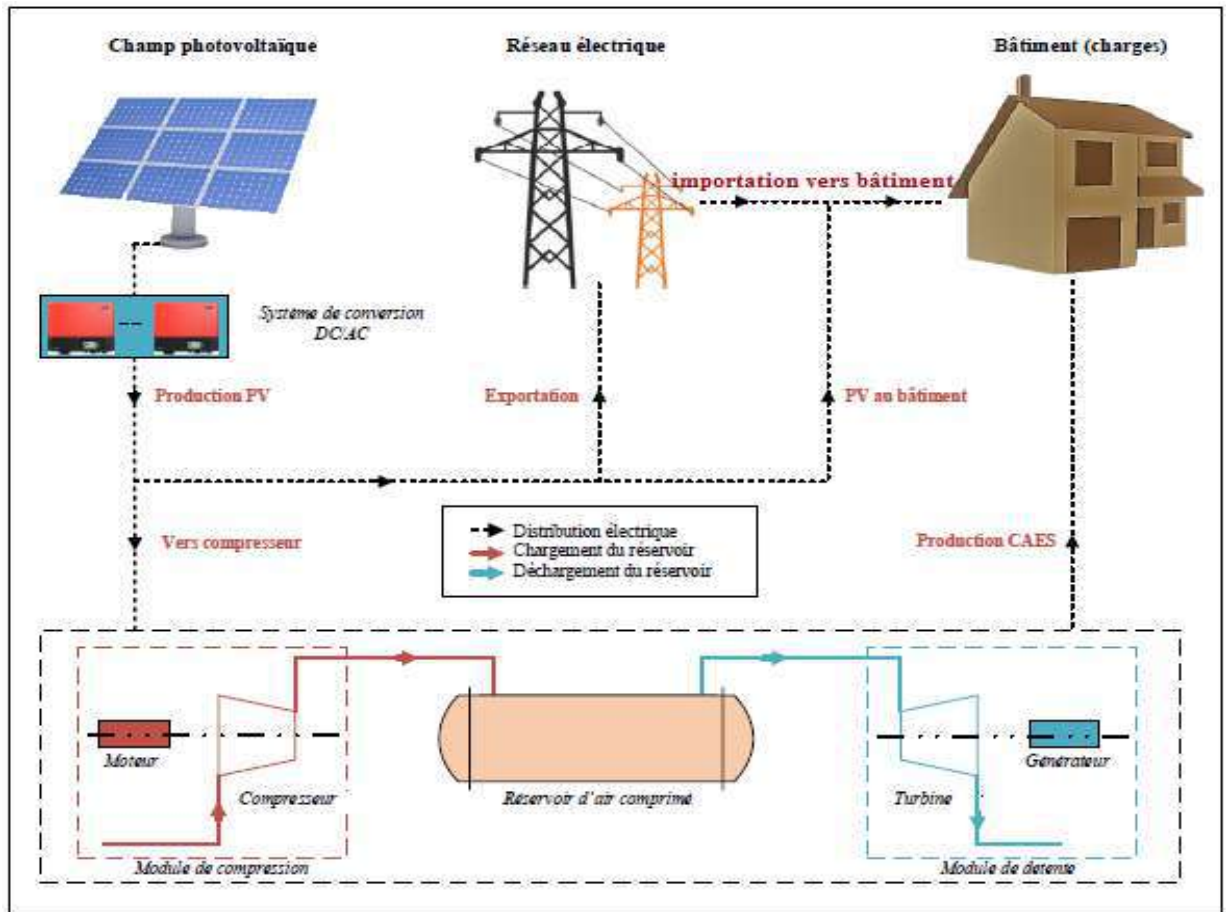
### **1. Introduction**

La modélisation d'un système de stockage d'énergie solaire par air comprimé est présentée dans ce chapitre, où l'énergie photovoltaïque est exploitée et stockée sous forme d'air comprimé instantanément pour être fournie aux consommateurs. Il s'agit d'adopter un modèle de calcul global du système comprenant des sous-modèles pour chaque composant du système. La réconciliation de ces sous-modèles est réalisée par une méthode de conditionnement tenant compte des limites opérationnelles de chaque composant. L'objectif étant alors de pouvoir étudier le système proposé et son processus transitoire de stockage d'air comprimé. Après avoir décrit le modèle, nous terminerons en définissant les indicateurs clés de performance. Ce chapitre nous permet d'évaluer l'efficacité de la conversion d'énergie d'une part, et de mesurer la contribution de la conversion d'énergie d'autre part vers un système de stockage d'air comprimé.

### **2. Description d'un système de Stockage d'énergie par air comprimé (SEAC ou CAES en anglais)**

Le système étudié, dont la configuration est représentée par la Figure 4.1, est essentiellement composé du champ photovoltaïque, d'un consommateur, du réseau et du système de stockage à air. Tous les composants sont interconnectés en fonctionnement instantanément selon des scénarios qui seront définis plus tard.

L'air utilisé pour le stockage est supposé et se comporter comme un gaz parfait. La consommation électrique du consommateur est issue de données réelles provenant d'un édifice existant. Le réseau est supposé toujours disponible et peut être exploité à n'importe quel moment.



**Figure 4.1 :** Configuration du système global étudié composé des quatre parties principales (Champ PV, Bâtiment, CAES et réseau électrique)[78].

L'objectif de l'étude est de concevoir un modèle permettant de comprendre le principe de fonctionnement d'un système de stockage d'énergie à air comprimé (SEAC ou CAES en anglais) composé de quatre parties principales interdépendantes (Fig. 4.1) :

### Consommateur

Le consommateur est la partie qui doit être dotée d'un système de stockage capable de faciliter le processus de production et de diversification de la production photovoltaïque, et d'autre part, l'alimentation partielle des charges électriques.

### Le champ photovoltaïque

Le système comporte un champ photovoltaïque dont la surface ainsi que les différents paramètres et les caractéristiques liés au calcul de la production constituent les données entrées pour le modèle. Il alimente en priorité le consommateur, le reste de la production est stockée dans le CAES et/ou exporté vers le réseau.



## Chapitre IV ; System de stockage de l'énergie solaire par l'air comprimé

### **Le système de stockage d'énergie à air comprimé**

L'une des principales parties à modéliser dans cette étude est bien sûr celle relative au stockage à air comprimé qui est composé globalement d'un module de compression (moteur et compresseur) alimenté par le champ photovoltaïque, d'un réservoir devant contenir l'air sous pression et d'un module de détente équipé d'une turbine et d'un alternateur électrique.

### **Le réseau électrique**

Les différentes parties décrites plus haut sont connectées au réseau électrique qui est toujours disponible et peut servir de secours pour couvrir les charges en cas d'absence de production solaire et/ou lorsque le stock d'énergie est suffisant.

### **Architecture du système**

Un champ photovoltaïque peut être utilisé comme un appoint au réseau ou comme une source unique de production d'énergie pour un consommateur ou pour un groupe de bâtiments. Dans ce dernier cas, le système est dit autonome ou isolé et nécessite l'intégration d'un moyen de stockage. L'électricité produite par les panneaux solaires placés sur un toit ou au sol est continue (12 V ou 24 V) et peut alimenter des charges de mêmes natures ou être stockée dans un accumulateur (batteries par exemple). Pour être injectée au réseau, le courant continu est converti en alternatif via un onduleur [74].

## **3. Modélisation de system**

### **3.1. Modélisation de la production photovoltaïque**

Un champ solaire est un ensemble de panneaux constitués eux-mêmes de cellules photovoltaïques (PV). la puissance nominale qu'un panneau peut délivrer est la puissance de crête (indice Watt-crête  $W_c$ ). Cette valeur est donnée par le fabricant et est généralement inscrite sur la plaque signalétique du module. Ce dernier comprend généralement aussi la taille, la surface utile, le rendement nominal et les conditions d'utilisation [75].

### Puissance électrique

La puissance électrique produite est en fonction de:

- l'irradiation globale normale incidente sur la surface du capteur (GNI)
- la surface installée ( $A_{pv}$ )
- le rendement du capteur solaire dans les conditions de fonctionnement ( $\eta_{pv}$ )
- l'efficacité des onduleurs photovoltaïques ( $k_{pv}$ )

$$\dot{w} = \eta_{pv} \times K_{pv} \times GNI \times A_{pv} \quad (4.1)$$

### Rendement réel du capteur photovoltaïque

$$\eta_{pv} = \eta_{ref} [1 - \beta_{ref} (T_c - T_{ref})] \quad (4.2)$$

où

$$\beta_{ref} = \frac{1}{T_0 - T_{ref}} \quad (4.3)$$

donc :

$$\eta_{pv} = \eta_{ref} \left( 1 - \frac{T_c - T_{ref}}{T_0 - T_{ref}} \right) \quad (4.4)$$

$\eta_{ref}$ : rendement de référence de la cellule en %

$T_{ref}$  : température de référence de capture en K

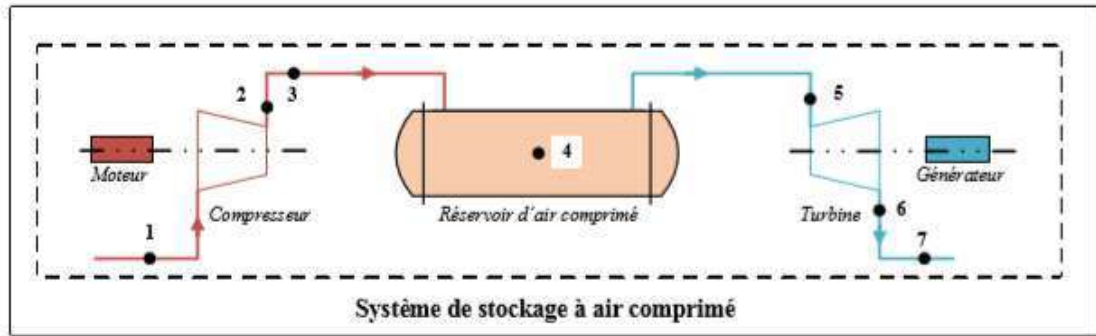
$T_c$  : température de fonctionnement du module photovoltaïque en K

$T_0$  : généralement appelée température de rupture en K

$\beta_{ref}$  : coefficient donné par le fabricant des cellules solaires en  $K^{-1}$

### **3.2. Modélisation du système de stockage à air comprimé**

Le système de stockage à modéliser est illustré à la figure 4.2. Il se compose d'un module de compression, d'un réservoir de stockage et d'un module d'expansion. Les caractéristiques à l'entrée et à la sortie d'un composant majeur du système sont représentées d'un point d'état lié à la transformation thermodynamique de l'air dans le processus de fonctionnement. Une description de chaque point est présentée dans le Tableau 4.1.



**Figure 4.2.** : Système de stockage à air comprimé[76].

**Tableau 4.1** : Description des principaux points de transformation de l'air.

Point	Description	Point	Description
<b>1</b>	Entrée d'air dans le compresseur	<b>5</b>	Sortie du réservoir et entrée d'air dans la turbine
<b>2</b>	Sortie isentropique du compresseur	<b>6</b>	Sortie isentropique de la turbine
<b>3</b>	Sortie réelle du compresseur	<b>7</b>	Sortie réelle de la turbine
<b>4</b>	Intérieur du réservoir de stockage		

La modélisation du système de stockage à air comprimé se traduit par le développement des sous modèles donnant :

- La puissance consommée par le système de compression ;
- La quantité d'énergie stockée sous forme d'air comprimé ;
- La puissance produite par le système de détente.

### 3.2.1. Puissance consommée par le système de compression

La puissance consommée par le système de compression est donnée par:

$$\dot{w}_c = \frac{1}{\eta_{m,c}} \frac{1}{\eta_{e,c}} \dot{m}_c (h_3 - h_1) \quad (4.5)$$

$\eta_{m,cp}$  : rendement mécanique du compresseur en %

$\eta_{e,cp}$ : rendement électrique du compresseur en %

$\dot{m}_{cp}$ : débit massique de l'air traversant le compresseur en Kg/h

$h_3$ : enthalpie à la sortie réelle du compresseur en J/Kg

$h_1$  : enthalpie à l'entrée réelle du compresseur en J/Kg

On a le gaz est parfait, donc la pression est définie comme suite :

$$p = \rho r T \quad (4.6)$$

Où

$\rho$  : masse volumique de l'air en Kg/m<sup>3</sup>

$r$  : constant de gaz parfait en J/KgK

$T$  : température en K (à l'entrée ou à la sortie de compresseur )

On a l'enthalpie spécifique définie comme suite :

$$h = C_p T \quad (4.7)$$

$C_p$  : capacité thermique en J/Kg.K

$T$  : Température en K

### 3.2.2. Stockage d'air comprimé

À l'intérieur du réservoir de stockage (Figure 4.3), les équations de conservation de la masse et de l'énergie sont exprimées comme suite :

$$\frac{dM_{air}}{dt} = \dot{m}_c - \dot{m}_b \quad (4.8)$$

$$\frac{d(M_{air} U)}{dt} = \dot{Q}_{res} + \dot{m}_c \cdot h_3 - \dot{m}_b \cdot h_4 \quad (4.9)$$

où

$M_{\text{air}}$ : masse d'air dans le réservoir en Kg

Les pertes thermiques du réservoir de stockage sont calculées comme suit:

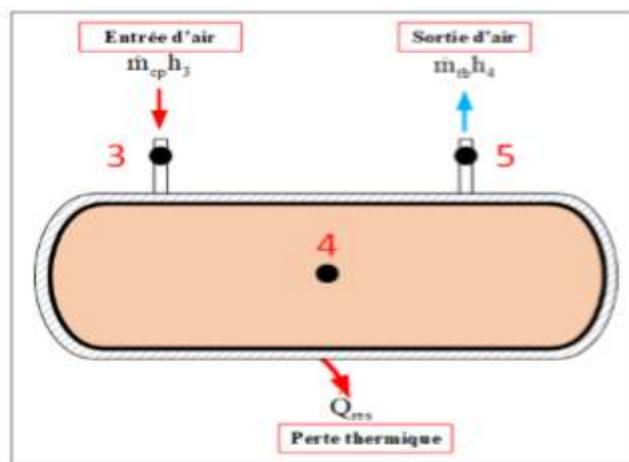
$$\dot{Q}_{\text{res}} = U_{\text{res}} A_{\text{res}} (T_{\text{ext}} - T_4) \quad (4.10)$$

$U_{\text{res}}$ : coefficient global d'échange en  $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

$A_{\text{res}}$ : surface de réservoir en m

$T_{\text{ext}}$  : température extérieure en K

$T_4$ :température au point 4 en K



**Figure 4.3:**Réservoir de stockage d'air comprimé [76].

### 3.2.3.Puissance produite par le système de détente

Connaissant l'état thermodynamique à chaque pas de temps, nous pouvons déterminer la puissance produite par la génératrice couplée à la turbine.

$$\dot{W}_{\text{tb}} = \eta_{\text{m,tb}} \cdot \eta_{\text{e,tb}} \cdot \dot{m}_{\text{tb}} (h_7 - h_5) \quad (4.12)$$

## 3.3. Performance du système de stockage

### 3.3.1.Rendement global de stockage

Pour évaluer l'efficacité du canal de conversion d'énergie électrique à travers le système de stockage d'air comprimé, nous utilisons l'efficacité énergétique ( $\eta_{\text{st}}$ ) définie comme le rapport entre l'énergie produite par la turbine ( $E_{\text{tb}}$ ) et la consommation du système de compression ( $E_c$ ):[77]

## Chapitre IV ; System de stockage de l'énergie solaire par l'air comprimé

$$\eta_{st} = \frac{E_{tb}}{E_{cp}} \quad (4.13)$$

### 3.3.2. Taux de couverture du stockage

La couverture du stockage ( $\tau_{cn/tb}$ ) est définie comme le rapport entre la puissance totale des turbines ( $E_{tb}$ ) et la demande totale de la charge électrique du consommateur ( $E_{cn}$ ).

$$\tau_{cn}^{tb} = \frac{E_{tb}}{E_{cn}} \quad (4.14)$$

## 3.4. Résultats et discussion

### 3.4.1. Données

**Tableau 4.2:** Paramètres et données d'entrées pour le calcul.

On a les données de champ photovoltaïque suivantes:						
$T_a$ (température ambiant)	$\eta$ (rendement référence)	$T_{référence}$ (température référence)	GNI	$A_{pv}^*$ (surface)	$K_{pv}$	$\eta_{pv}$
15°C	18%	25 °C	1000 W/m <sup>2</sup>	100m <sup>2</sup>	95%	85%
Les données de system de compression :						
$Q_v$ (débit volumique)	$\eta_{mc}$ (rendement mécanique)		$\eta_{éc}$ (rendement électrique)		$\eta_{réel}$	
10 m <sup>3</sup> /h	95%		98%		90%	
Les données de réservoir d'air comprimé (model cylindrique à acier)						
$V_{res}$ (volume de réservoir)	$\lambda_{res}$ conductivité thermique de réservoir		$e_{res}$ (épaisseur de réservoir)		$P_{max}$	
40 m <sup>3</sup>	0.038 W/m.K		5 cm		30 Par	
Les données de système de détente de turbine :						
$\eta_{m,tb}$ (rendement mécanique de turbine)				$\eta_{e,tb}$ ( rendement électrique de turbine)		
95%				98%		
Caractéristique d'air :						
$\rho = 1.225 \text{ Kg/m}^3$			$C_p = 1005 \text{ J/Kg.K}$		$r = 287 \text{ J/kg.K}$	
*Paramètre variable						

3.4.2. Organigramme de calcul

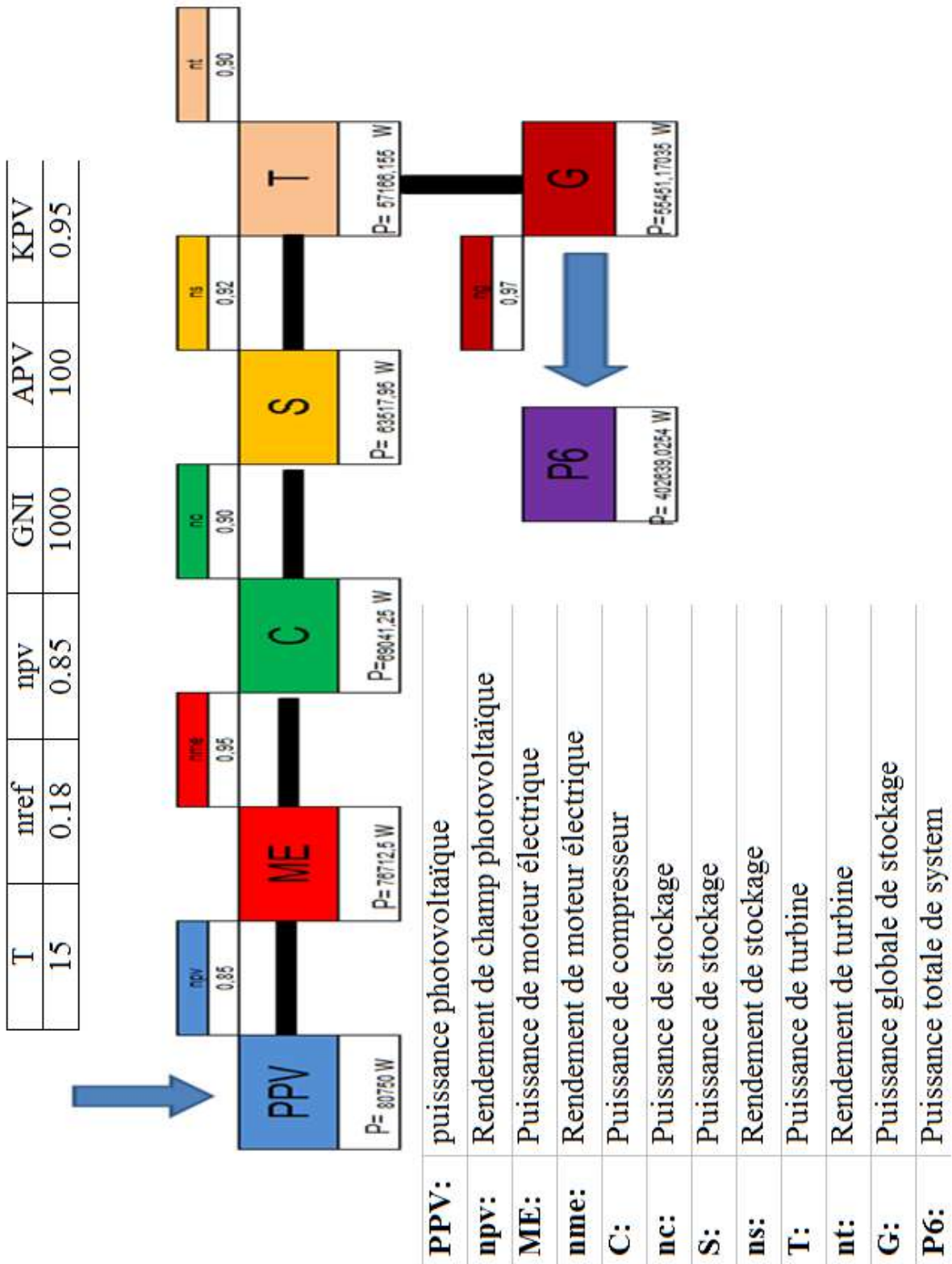


Figure 4.4: Organigramme de calcul.

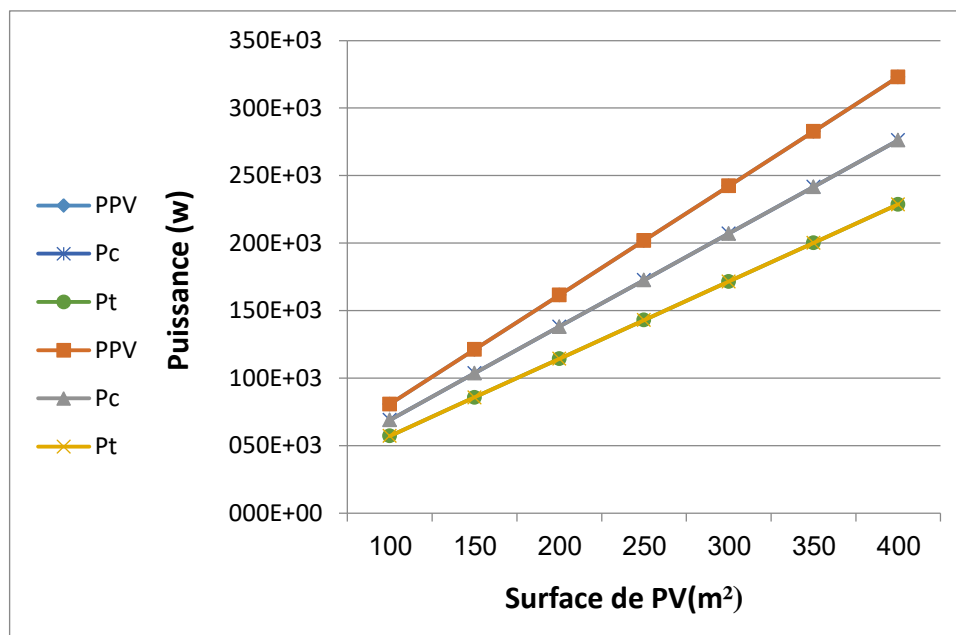
### 3.4.3. Résultats de calcul

Après avoir exécuté l'organigramme ci-dessus en se basant sur les données du cas initial comme le montre la Figure 4.4, les résultats obtenus des puissances des différents composants de processus du système sont illustrés dans le tableau ci-dessous:

**Table 4.3:** Résultats initiaux de l'exécution de l'organigramme de calcul.

Composant	Puissance	Rendement global de stockage	Taux de couverture
Capteur photovoltaïque	80750 W	82%	30%
Moteur électrique	76712.5 W		
Compresseur	69041.25 W		
Stockage	63517.95 W		
Turbine	57166.155 W		
Générateur	55451.17 W		
Consommateur	55451.17 W		

#### 3.4.3.1. Influence de la surface de capteur PV

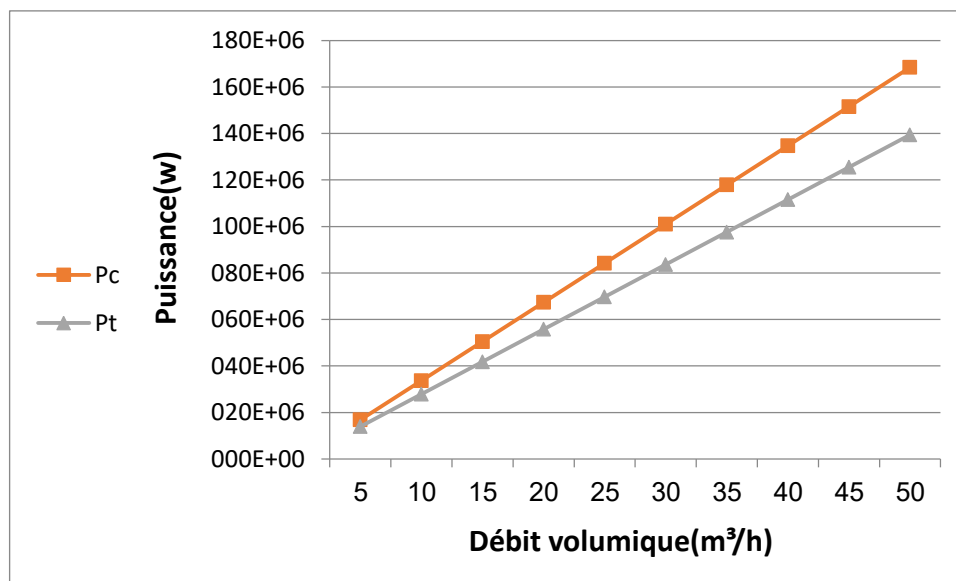


**Figure 4.5:** Puissances  $P_{PV}$ ,  $P_c$  et  $P_t$  en fonction de la taille du champ PV.



La Figure 4.5 représente l'évolution de la puissance du photovoltaïque  $P_{PV}$ , du compresseur  $P_c$  et de la turbine  $P_t$  en fonction de la surface photovoltaïque dans le processus du système. Où l'on voit que l'augmentation de la surface photovoltaïque s'accompagne d'une augmentation des puissances  $P_{PV}$ ,  $P_c$  et  $P_t$  de sorte que ses valeurs maximales sont respectivement 80750W, 63517.95W, et 57166.16W. Cette décroissance des puissances le long du processus est due à la perte d'énergie au niveau des composants du système.

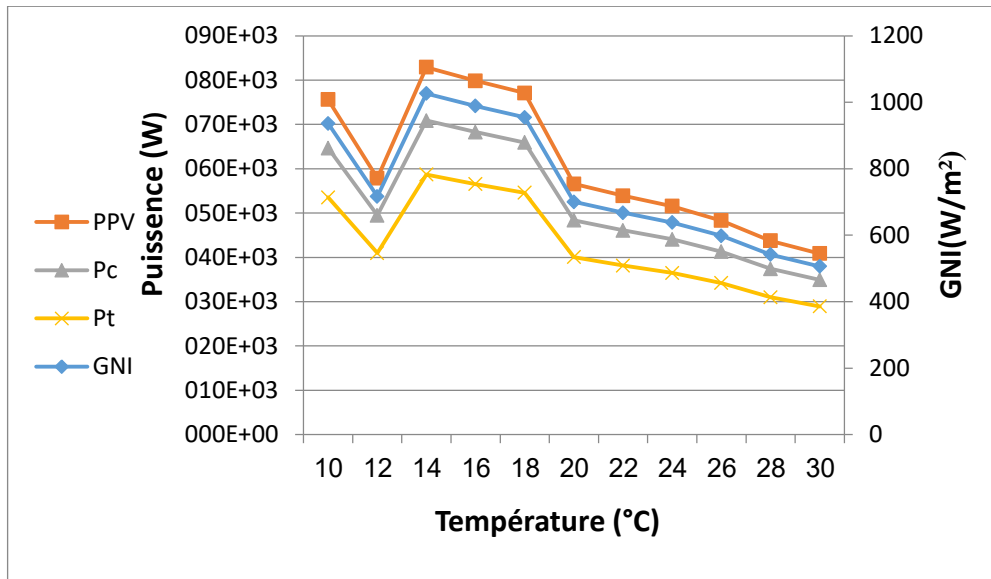
### 3.4.3.2. Influence du débit volumique



**Figure 4.6 :** Puissance de compresseur et de turbine en fonction du débit volumique.

La Figure 4.6 représente l'évolution de puissance  $P_c$  et  $P_t$  en fonction du débit du compresseur, de sorte que ses valeurs maximales sont respectivement  $168 \times 10^6 W$  et  $139 \times 10^6 W$ ; où nous notons qu'il existe une relation directe entre lesdites puissances et le débit volumique. Plus le débit d'air passant à travers le compresseur est important, plus la puissance du compresseur augmente, suite à la relation directe (équation (4.5)) liant la puissance de compresseur et le débit volumique d'air. Cela s'accompagne d'une augmentation de la puissance de la turbine qui est aussi directement affectée par le débit du compresseur par la relation de l'équation (4.12).

### 3.4.4. Influence de la température.



**Figure 4.7:** Puissances  $P_{PV}$ ,  $P_c$  et  $P_t$  en fonction de la température ambiante.

La Figure 4.7 représente l'évolution de la puissance du photovoltaïque  $P_{PV}$ , du compresseur  $P_c$  et de la turbine  $P_t$  en fonction de la température ambiante, où l'on constate une diminution des valeurs des puissances  $P_{PV}$ ,  $P_c$  et  $P_t$  correspondant aux températures variant de 10 à 12°C. Cette décroissance des puissances est due à la diminution de la valeur de GNI dans la région considérée. Dans l'intervalle des températures de 12 à 17°C, nous remarquons une augmentation des valeurs des puissances  $P_{PV}$ ,  $P_c$  et  $P_t$  et cela est dû à l'augmentation de la valeur de GNI correspondant à cet intervalle des températures. Puisqu'à une température de 15°C le GNI ayant une valeur maximale, les puissances  $P_{PV}$ ,  $P_c$  et  $P_t$  sont également maximales. De la température de 17 °C à la température de 30°C on observe une diminution continue des puissances  $P_{PV}$ ,  $P_c$  et  $P_t$  au fur à mesure avec l'augmentation de la température et cela est dû à la diminution de la valeur du paramètre GNI.

## 4. Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons modélisé le système de stockage d'air comprimé et expliqué la manière de l'exploiter à travers des éléments liés à une chaîne de conversion de l'énergie solaire photovoltaïque en énergie électrique dont le stockage est contrôlé pour utilisation ultérieure. Ce système a été étudié sur la base des modèles mathématiques et un organigramme du calcul. Les résultats obtenus sont résumés

## Chapitre IV ; System de stockage de l'énergie solaire par l'air comprimé

dans la variation des puissances des différents composants du système qui sont affectées par la surface de champ PV, le débit d'air, la température et le paramètre GNI.

## **Conclusion Générale**

## Conclusion Général

### **Conclusion Général**

L'énergie solaire présente de nombreux avantages et peut être exploitée de différentes manières. Nous avons traité de l'énergie du soleil sous sa forme brute qu'on peut bénéficier, et qui peut être divisée en deux parties : l'énergie solaire thermique et l'énergie solaire photovoltaïque. En effet, elle était à l'origine réservée aux petits sites isolés, et pour répondre aux besoins énergétiques croissants, différentes solutions sont disponibles, telles que l'augmentation de la surface des panneaux photovoltaïques et l'augmentation de la capacité du système de stockage. Dans ce travail, nous avons modélisé le système de stockage d'air comprimé et expliqué la manière de l'exploiter à travers des éléments liés à une chaîne de conversion de l'énergie solaire photovoltaïque en énergie électrique dont le stockage est contrôlé pour utilisation ultérieure. Ce système a été étudié sur la base des modèles mathématiques et un organigramme du calcul. Les résultats obtenus ont été résumés dans la variation des puissances des différents composants du système qui sont affectées par la surface de champ photovoltaïque, le débit d'air, la température ambiante et le paramètre GNI.

L'évolution de la puissance photovoltaïque, du compresseur et de la turbine en fonction de la surface de champs photovoltaïque a été présentée. Il a été clair que l'augmentation de la surface photovoltaïque s'accompagne d'une augmentation desdites puissances, de sorte que ses valeurs maximales sont respectivement 80750W, 63517.95W, et 57166.16W. Alors que la décroissance de ces puissances le long du processus est interprétée par la présence des pertes d'énergie au niveau de chaque composant du système.

L'évolution de puissance de compresseur et celle de turbine en fonction du débit du compresseur a indiqué des valeurs maximales estimées respectivement de  $168 \times 10^6$ W et de  $139 \times 10^6$ W; où il a été noté qu'il existe une relation directe entre ces puissances et le débit volumique. Plus le débit d'air est important, plus la puissance du compresseur augmente, par une relation directe entre la puissance de compresseur et le débit d'air. Cela s'accompagne d'une augmentation de la puissance de la turbine qui est aussi directement affectée par le débit du compresseur.

## Conclusion Général

Il est constaté une diminution de l'évolution de la puissance photovoltaïque, du compresseur et de la turbine en fonction de la température variant de 10 à 12°C. Cette décroissance des puissances est interprétée par la diminution de la valeur de GNI dans la région considérée. Dans l'intervalle des températures de 12 à 17°C, nous avons remarqué une augmentation des valeurs de ces puissances et qui est dû à l'augmentation de la valeur de GNI correspondant à cet intervalle des températures. Puisqu'à une température de 15°C le GNI ayant une valeur maximale, les puissances sont également maximales. De la température de 17 °C à la température de 30°C on observe une diminution continue des puissances au fur à mesure avec l'augmentation de la température et cela est dû à la diminution de la valeur du paramètre GNI.

## Références

- [3] « Rapport sur le statut mondial des énergies renouvelables 2016 », REN21 (réseau mondial multipartite pour la promotion des politiques en faveur des énergies renouvelables).
- [6][http://www.inrp.fr/lamap/?Page\\_Id=16&Action=2&Element\\_Id=380&DomainScienceType\\_Id=7](http://www.inrp.fr/lamap/?Page_Id=16&Action=2&Element_Id=380&DomainScienceType_Id=7)
- [7] erger, F. et al., 2003. The Cambridge Encyclopedia of Space. Cambridge, UK: Cambridge University Press, p.428
- [8]Khadraoui, Zakaria Etude d'une centrale solaire thermique. Mémoire de Master. Université badji mokhtar Annaba 2017
- [9] Aisa, Emma Llor. Génération de très hautes pressions d'ablation laser et de chocs forts pour l'allumage des réactions de fusion nucléaire. Thèse de doctorat. Université de Bordeaux, 2017
- [10] Spagnou, Pierre. Les mystères du temps. De Galilée à Einstein. CNRS, 2017
- [11] SALMI, Mohamed. Contribution à la quantification de l'irradiation solaire globale en Algérie et applications aux générateurs photovoltaïques. Thèse de doctorat. Université Ferhat Abbas de Sétif2014.
- [12] J. Royer, T. Djiako, « Le Pompage Photovoltaïque », Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, université d'Ottawa/EIER /CREPA, 1998

- [13] AkassewaTchapoSingo « Systeme d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome » , Thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincare, Nancy-I.
- [14] WILGENBUS, David. "Dossier « L'énergie Solaire »." 14 pp. 22/03/2022 pdfprof.com
- [15] Bouchouicha Kada, « Modélisation multi spectrale des images satellitaire-application : quantification du bilan d'énergie Sol-Atmosphère », Thèse de doctorat, Université d'Oran, 2017
- [16] Aouchiche Nedjma, « Conception d'une Commande MPPT Optimale à base d'intelligence artificielle d'un Système photovoltaïque », Thèse de Doctorat, Université bourgogne Franche-Comté, 2020.
- [17] Merad Faiza, « conception d'un programme de calcul du rayonnement solaire, cas particulier de la région de Mostaganem », Diplôme de Magister, Université Mostaganem, 2013.
- [18] Mme Samira Mouhous-Chaouchi, « Etude statistique du rayonnement solaire sur un plan incliné », mémoire de magister, université Abou Beker Belkaid, centre de développement d'énergie renouvelable, 2012.
- [19] Yassine Lasmi, «Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes », Mémoire de Magister, Université Ferhat ABBAS Sétif-1 2013.
- [20] Y.Bakelli, "Contribution à l'optimisation du dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome», Thèse de doctorat, Université Hadj Lakhdar Batna, Algérie, 2012.
- [21] L.Chiter, "Modélisation et simulation d'un système de pompage solaire à base d'un moteur asynchrone monophasé", Mémoire de Magister, Université de Hadj lakhdhar, Batna, Algérie, 2012.
- [22] A. Daoud, "Contrôle de la Puissance d'un Générateur Photovoltaïque pour le Pompage Solaire", Thèse de Doctorat, Université des sciences et de la technologie d'oran, Algérie, 2013.



- [23] Observ'ER, l'Observatoire des Energies Renouvelables, "La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde", Quinzième Inventaire Edition 2013.
- [24] Miroir ardent de Louis XIV [archive] Science.chateauxversailles.fr, consulté le 1er septembre 2013
- [25] Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de Convertir directement la lumière en électricité. [archive] Sur le site lénergie-solaire.fr -consulté le 12 mai 2012
- [26] L'Inde et la France lancent l'Alliance internationale pour l'énergiesolaire [archive] ,1er décembre 2015
- [27] CHEHAM Abdeldjalil EL MAGBED Seddik, Commande robuste d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique : Université Kasdi Merbah Ouargla 2018
- [28] Benchikh Elhoucine Hanane, ' Simulation numérique de modèle de collecteur Hybride Photovoltaïque/Photo thermique', Mémoire de magister, Université de Constantine, Algérie, 2009.
- [29] José Miguel Navarro « Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible ». Thèse de doctorat. Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008
- [30] L. de Schoulepnikoff et Gymnase Auguste Piccard « Quelle source d'énergie pour les vingt prochaines années? ». Travail de maturité Alexandra Catana, 3M7, 2009.
- [31] AOUIFI Saliha. « Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque ». Mémoire de Magister. Université Ferhat Abbas-Sétif-1. (2014)
- [32] BENSALÉM Salaheddine. « Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires ». Mémoire de Magister. Université Ferhat Abbas-Sétif. (2011).
- [33] « Les piles solaires, le composant et ces applications » Edition. Masson (1985)
- [34] F. Lasnier, T.G. Ang, "Photovoltaic Engineering Handbook", IOP Publishing Ltd. 1980, ISBN 0-85274-311-4
- [35] A. Abete et al. - Analysis of photovoltaic modules with protection diodes in presence of mismatching - 21st IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1990

- [36] Atsushi Kajihara, Tetsumi Harakawa - Model of Photovoltaic Cell Circuits under Partial Shading. IEE 2005
- [37] Katsutoshi Ujii and all - Study on Dynamic and Static Characteristics of Photovoltaic Cell - Power Conversion Conference, 2002
- [38] M.Behadj, "Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome," Centre Universitaire De Bechar Institut des Sciences Exactes, Mémoire de magister, Algérie, 2008.
- [39] M. L. Louazene, "Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla," Université de Batna 2, 2008.
- [40] Mohamed Redha Rezoug, « Etude et Réalisation d'un Système d'orientation et de Conversion Destiné à Optimiser le Rendement d'un Système Photovoltaïque », Thèse de Doctorat, Université des Constantine, 2018.
- [41] Belkaid Abdelhakim, « Conception et Implémentation d'une Commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome », diplôme de doctorat en sciences, Université Ferhat Abbas – Sétif 1, 2015.
- [42] Mohamed Lakhdar Louazene, « Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla », Mémoire de Magister, de Université de Batna, 2008.
- [43] M. Boukli-hacene Omar, « Conception et Réalisation d'un Générateur Photovoltaïque Muni d'un Convertisseur MPPT pour une Meilleure Gestion Energétique », Thèse de Magister, Université Abou Belkaid-Tlemcen 2011.
- [44] Azoui, Notes de cours, Master Energies renouvelables 2019/2020, staff.univ-batna2.dz.
- [45] T. Ben Aoun, S. Mouissi, « Etude d'un système couplant générateur photovoltaïque et une charge électrolytique », Mémoire Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2015.
- [46] K. Ouabdelkader, H. Mers], « Modélisation et contrôle d'un système photovoltaïque connecté au réseau », Mémoire Master, Université Abderrahmane Mira, Bejaia, 2015.

[47] Abbassen L., « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque », Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2011.

[48] Camara, Mohamed Ansoumane. Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateurs. Diss. Université Paris-Est, 2011.

[49] Adèle Soupart-Caron (Soupart). Stockage de chaleur dans les matériaux à changement de phase. PhDthesis, 2015. Thèse de doctorat dirigée par Marty, Philippe et Fourmigue, Jean-François Mécanique des fluides, procédés, énergétique Grenoble Alpes 2015.

[50] H. Mehling and L.F. Cabeza. Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications. Heat and Mass Transfer. Springer Berlin Heidelberg, 2008.

[51] Eduard Oró, Antoni Gil, Alvaro de Gracia, Dieter Boer, and Luisa F. Cabeza. Comparative life cycle assessment of thermal energy storage systems for solar power plants. *Renewable Energy*, 44(C) :166\_173, 2012.

[53] Marc Medrano, Antoni Gil, Ingrid Martorell, Xavi Potau, and Luisa F. Cabeza. State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part 2\_Case studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1):56\_72, January 2010.

[54] J.K. Kissack, J.M. Hannig, T.I. Whitney, and M.L. Drake. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. part 1\_concepts, materials and metallization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 2010.

[55] Neu, Thibault. Etude expérimentale et modélisation de la compression quasi isotherme d'air pour le stockage d'énergie en mer. Diss. Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique, 2017.

[56] Camara, Mohamed Ansoumane. *Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateurs*. Diss. Université Paris-Est, 2011.

- [57] Lomonaco, Adrien. Stockage d'énergie thermique par matériaux à changements de phase adapté aux centrales solaires thermodynamiques. Diss. Pau, 2015.
- [58] [https://www.researchgate.net/figure/ASTM-G173-03-Reference-Spectra-Derived-from-SMARTS-v292-available-in-American\\_fig1\\_313012722](https://www.researchgate.net/figure/ASTM-G173-03-Reference-Spectra-Derived-from-SMARTS-v292-available-in-American_fig1_313012722)
- [59] R. P. Tye, « The Measurement of Thermal Conductivity by the Comparative Method », in *Compendium of Thermophysical Property Measurement Methods*, K. D. Maglič, A. Cezairliyan, et V. E. Peletsky, Éd. Springer US, 1992, p. 77-97.
- [60] E.-B. S. Mettaweet G. M. R. Assassa, « Thermal conductivity enhancement in a latent heat storage system », *Sol. Energy*, vol. 81, no 7, p. 839-845, juill. 2007
- [61] C. Y. Zhao et Z. G. Wu, « Heat transfer enhancement of high temperature thermal energy storage using metal foams and expanded graphite », *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 95, no 2, p. 636-643, févr. 2011.
- [62] K. Nakaso, H. Teshima, A. Yoshimura, S. Nogami, Y. Hamada, et J. Fukai, « Extension of heat transfer area using carbon fiber cloths in latent heat thermal energy storage tanks », *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 47, no 5, p. 879-885, mai 2008.
- [63] W.-D. Steinmann, D. Laing, et R. Tamme, « Development of PCM Storage for Process Heat and Power Generation », *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 131, no 4, 2009.
- [64] D. Laing, T. Bauer, W. D. Steinmann, et D. Lehmann, « Advanced High Temperature Latent Heat Storage System—Design and Test Results », in *Proc. 11th Int. Conf. on Thermal Energy Storage*, Stockholm, Sweden, 14–17 June 2009., 2009.
- [65] Lazizi, Aldjia « Modélisation, contrôle et gestion énergétique d'une installation de pompage solaire » univ-boumerdes.dz, 2020
- [66] Vighetti, Stéphane. Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau: Choix et dimensionnement des étages de conversion. Diss. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2010.
- [67] Gatellier, Baptiste, Etude d'un système de stockage d'énergie solaire thermique répondant aux besoins en chauffage d'une habitation unifamiliale, Faculté des Sciences appliquées, 2019

- [68] S. Pincemin, R. Olives, X. Py, et M. Christ, « Highly conductive composites made of phase change materials and graphite for thermal storage », *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 92, no 6, p. 603-613, juin 2008.
- [69] L. C. Chow, J. K. Zhong, et J. E. Beam, « Thermal conductivity enhancement for phase change storage media », *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 23, no 1, p. 91–100, 1996.
- [70] E.-B. S. Mettaweet G. M. R. Assassa, « Thermal conductivity enhancement in a latent heat storage system », *Sol. Energy*, vol. 81, no 7, p. 839-845, juill. 2007.
- [71] C. Y. Zhao et Z. G. Wu, « Heat transfer enhancement of high temperature thermal energy storage using metal foams and expanded graphite », *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 95, no 2, p. 636-643, févr. 2011.
- [72] E. Jannelli, M. Minutillo, A. LubranoLavadera, G. Falcucci, A small-scale CAES (compressed air energy storage) system for stand-alone renewable energy power plant for a radio base station: A sizing-design methodology, *Energy*. (2014). doi:10.1016/j.energy.2014.10.016.
- [73] D. Zafirakis, K. Kavadias, E.M. Kondili, J.K. Kaldellis, Optimum Sizing of PV-CAES Configurations for the Electrification of Remote Consumers, in: *Comput. Aided Chem. Eng*, Elsevier, 2014: pp. 1135–1140.  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780444634559500246> (accessed February 4, 2015).
- [74] T. Khatib, I.A. Ibrahim, A. Mohamed, A review on sizing methodologies of photovoltaic array and storage battery in a standalone photovoltaic system, *Energy Convers. Manag.* 120 (2016) 430–448. doi:10.1016/j.enconman.2016.05.011.
- [75] S. Kopecz, A. Meister, On order conditions for modified Patankar–Runge–Kutta schemes, *Appl. Numer. Math.* 123 (2018) 159–179.  
doi:10.1016/j.apnum.2017.09.004.

[76] Simpore, Sidiki. Modélisation, simulation et optimisation d'un système de stockage à air comprimé couplé à un bâtiment et à une production photovoltaïque. Diss. La Réunion, 2018. APA.

[77]V. Tola, V. Meloni, F. Spadaccini, G. Cau, Performance assessment of Adiabatic Compressed Air Energy Storage (A-CAES) power plants integrated with packed-bed thermocline storage systems, *Energy Convers. Manag.* 151 (2017) 343–356. doi:10.1016/j.enconman.2017.08.051

[78] Congrès Français de Thermique, SFT 2018, Pau, 29 mai — 1<sup>er</sup> juin 2018

## Résumé

Dans le présent travail, nous avons abordé la problématique la plus importante de l'énergie photovoltaïque, à savoir son stockage, et nous nous sommes concentrés sur le stockage sous forme d'air comprimé. Les résultats obtenus se résument à la variation des puissances des différents composants du système qui sont affectés par la surface du champ photovoltaïque, le débit d'air, la température ambiante et le paramètre GNI. Il était clair que l'augmentation de la surface photovoltaïque s'accompagne d'une augmentation des puissances tout au long du processus du système. L'évolution des puissances du compresseur et de la turbine en fonction du débit du compresseur a indiqué des valeurs maximales où il a été constaté qu'il existe une relation directe entre ces puissances et le débit volumique. Plus le débit d'air est important, plus la puissance du compresseur n'est importante. Cela s'accompagne d'une augmentation de la puissance de la turbine qui est également directement affectée par le débit du compresseur. Nous avons noté également une diminution de l'évolution de la puissance photovoltaïque, du compresseur et de la turbine en fonction de la diminution de la valeur du GNI et une augmentation des valeurs de ces puissances due à l'augmentation de la valeur du GNI correspondant à la plage de température considérée.

**Mots clés :** photovoltaïque ; stockage ; air comprimé ; puissance ; débit d'air

## ملخص

في العمل المقدم ، تناولنا أهم قضية للطاقة الكهروضوئية ، ألا وهي تخزينها ، وركزنا على التخزين في شكل هواء مضغوط. النتائج التي تم الحصول عليها تتلخص في تباين قوى المكونات المختلفة للنظام التي تتأثر بسطح المجال الكهروضوئي وتدفق الهواء ودرجة الحرارة المحيطة ومعامل GNI. كان من الواضح أن الزيادة في السطح الكهروضوئي مصحوبة بزيادة في القوى طوال عملية النظام. يشير تطور استطاعة الضاغط والتوربين بدلالة التدفق إلى قيم قصوى حيث وجد أن هناك علاقة مباشرة بين هذه القوى والتدفق الحجمي. حيث كلما زاد تدفق الهواء ، زادت استطاعة الضاغط. ويصاحب ذلك زيادة في استطاعة التوربين والتي تتأثر أيضًا بشكل مباشر بتدفق الضاغط. كما لاحظنا انخفاضًا في تطور الاستطاعة الكهروضوئية و استطاعة الضاغط والتوربين وفقًا لانخفاض قيمة معامل GNI وزيادة في قيم هذه الاستطاعات نتيجة الزيادة في معامل GNI المتعلق بدرجة الحرارة المدروسة.

الكلمات المفتاحية: كهروضوئية؛ تخزين ؛ هواء مضغوط ؛ استطاعة ؛ تدفق الهواء