

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة

العلم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

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

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département Génie Mécanique

## MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Par : - Foudil Zakaria

- Adjeneg Amine

### Sujet

**Etude expérimental d'un système hybride photovoltaïque / thermique pour la production d'électricité et de l'eau chaude**

Soutenu publiquement, le / / , devant le jury composé de :

Mme Wahiba Slimani

Mr Belfegues

Mr Zahir ROUABAH

Mr Lotfi BOUTAHAR

MCA

Enseig

Prof

Grade

Univ-BBA

Univ-BBA

Univ-BBA

Univ-BBA

Président

Examineur

Encadreur

Co-Encadreur

Année Universitaire 2022/2023



---

# **R**emerciements

Nous voudrions remercier Dieu Tout-Puissant qui nous a donné la force et la patience pour faire le travail.

Nous tenons à remercier notre encadreur Mr. **Zahir Rouabeh** et co-encadreur Mr. **Boutahar Lotfi** pour leur soutien, leur confiance, leur patience et leurs conseils qui ont été d'une grande contribution. Soyez à la hauteur de leurs nobles caractères.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les enseignants du Filière Génie mécanique.

Enfin, nous tenons également à remercier nos familles et toutes les personnes qui ont participé directement ou indirectement à la réalisation de ce travail.

---

---

# **D**édicaces

Je dédie cet humble travail à mon défunt père, que Dieu ait pitié de lui, à ma chère mère pour chaque sacrifice et amour que Dieu m'a préservé et lui a donné une bonne santé et une longue vie.

Mes professeurs, amis et collègues à tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce message.

Foudil Zakaria

---

---

# Nomenclatures

---

PV	photovoltaïque
CIGSe	Cuivre indium Gallium Sélénium
CdTe	tellure de Cadmium
T	température
$I_s$	courant de saturation de la diode
k	constant de Boltzmann
$Q$	la charge de l'électron
A	facteur d'idéalité de la diode
$q$	flux de chaleur (W)
$k$	conductivité thermique du milieu W/ (m.K) ou W/ (m. °C)
$g$	Rayonnement solaire hors atmosphère
$k_0$	coefficient d'atténuation
$m$	masse atmosphérique
V	volt
I.R	infrarouge
Al	aluminium
Cu	cuivre
Wc	watt crête

## ***Symboles Grecs***

$\lambda$	Conductivité thermique du matériau (W/m K)
$\rho$	La densité (Kg /m <sup>3</sup> )

---

---

# Liste des figures

---

<b>Figure 1.1 :</b>	Ventilateurs des énergies éoliennes.....	16
<b>Figure 1.2 :</b>	Turbines hydrauliques.....	17
<b>Figure 1.3 :</b>	Fonctionnement de l'énergie géothermique.....	18
<b>Figure 1.4 :</b>	Renouveaulement de la biomasse.....	19
<b>Figure 1.5 :</b>	Panneaux photovoltaïques.....	20
<b>Figure 1.6 :</b>	Fonctionnement des panneaux solaire photovoltaïques.....	20
<b>Figure 1.7 :</b>	Fonctionnement des panneaux solaire thermiques.....	21
<b>Figure 1.8 :</b>	Les couches de soleil.....	22
<b>Figure 1.9 :</b>	Orbite de la Terre autour du soleil.....	23
<b>Figure 1.10 :</b>	Triangle des pôles.....	24
<b>Figure 1.11 :</b>	L'axe de rotation du Soleil.....	25
<b>Figure 1.12 :</b>	La position de la Terre.....	25
<b>Figure 1.13 :</b>	Le rayonnement solaire reçu par la terre.....	26
<b>Figure 1.14 :</b>	Composantes du rayonnement solaire : extraterrestre, global = direct + diffus + albédo.....	27
<b>Figure 2.1 :</b>	Le premier satellite scientifique américain explorer 6 lancé en aout 1959.....	33
<b>Figure 2.2 :</b>	Schéma d'un système de production d'électricité à l'aide de panneau photovoltaïque.....	34
<b>Figure 2.3 :</b>	Structure et diagramme de bandes pour une jonction p-n sous illumination.....	34
<b>Figure 2.4 :</b>	Cellules polycristallines.....	35
<b>Figure 2.5 :</b>	Cellules monocristallines.....	36
<b>Figure 2.6 :</b>	Schéma d'une cellule solaire de type Verre/SnO <sub>2</sub> : F/CdS/CdTe/contact arrière.....	38
<b>Figure 2.7 :</b>	Schéma d'une cellule solaire de type Verre/Mo/Cu (In, Ga) Se <sub>2</sub> /CdS/i-ZnO/ZnO : Al.....	39

---

<b>Figure 2.8 :</b>	Schéma de base d'une cellule p-i-n en silicium amorphe hydrogéné	<b>40</b>
<b>Figure 2.9 :</b>	Configuration multicouche.....	<b>41</b>
<b>Figure 2.10 :</b>	Solar cell GRÄTZEL.....	<b>41</b>
<b>Figure 2.11 :</b>	Évolution d'irradiance spectrale par une cellule MJ.....	<b>42</b>
<b>Figure 2.12 :</b>	Conception d'un module photovoltaïque.....	<b>42</b>
<b>Figure 2.13 :</b>	Caractéristique Courant-Tension d'un module photovoltaïque.....	<b>43</b>
<b>Figure 2.14 :</b>	Caractéristiques Courant-Tension et puissance d'une cellule solaire...	<b>44</b>
<b>Figure 2.15 :</b>	Caractéristique courant-tension pour différentes valeurs du rayonnement	<b>44</b>
<b>Figure 2.16 :</b>	Caractéristique courant-tension pour différentes valeurs de la température.....	<b>45</b>
<b>Figure 2.17 :</b>	Chauffe-eau solaire.....	<b>46</b>
<b>Figure 2.18 :</b>	Capteur à tubes sous vide .....	<b>47</b>
<b>Figure 2.19 :</b>	Schéma de principe d'un capteur plan vitré .....	<b>48</b>
<b>Figure 2.20 :</b>	Le contenu des capteurs solaire thermique.....	<b>48</b>
<b>Figure 2.21 :</b>	Longueur d'onde.....	<b>49</b>
<b>Figure 2.22 :</b>	Absorbeur film d'eau.....	<b>50</b>
<b>Figure 2.23 :</b>	Absorbeur tube S.....	<b>50</b>
<b>Figure 2.24 :</b>	Absorbeur montage Tickelman.....	<b>51</b>
<b>Figure 2.25 :</b>	Les absorbeurs type « échelle ».....	<b>51</b>
<b>Figure 3.1 :</b>	Schéma de système hybride (PV/T).....	<b>56</b>
<b>Figure 3.2 :</b>	Classification de l'énergie solaire.....	<b>56</b>
<b>Figure 3.3 :</b>	Schéma des composants de panneau solaire (PV/T).....	<b>57</b>
<b>Figure 3.4 :</b>	Feuille d'aluminium en stuc.....	<b>58</b>
<b>Figure 3.5 :</b>	Absorbeur de type "échelle".....	<b>58</b>
<b>Figure 3.6 :</b>	Coquille de Tube En Laine de Verre Antigél Solaire.....	<b>59</b>
<b>Figure 3.7 :</b>	Alucobond.....	<b>61</b>
<b>Figure 3.8 :</b>	Pompe.....	<b>61</b>
<b>Figure 3.9 :</b>	Refroidisseur.....	<b>62</b>
<b>Figure 3.10 :</b>	Vue de Face du panneau solaire.....	<b>62</b>
<b>Figure 3.11 :</b>	Vue face arrière du panneau solaire.....	<b>63</b>

---

<b>Figure 3.12 :</b>	Caractéristique du panneau solaire.....	<b>63</b>
<b>Figure 3.13 :</b>	Feuille d'aluminium.....	<b>63</b>
<b>Figure 3.14 :</b>	Serpentin de cuivre.....	<b>64</b>
<b>Figure 3.15 :</b>	Laine de verre.....	<b>64</b>
<b>Figure 3.16 :</b>	Alucobond.....	<b>65</b>
<b>Figure 3.17 :</b>	Vue globale du système hybride désposé sur un support.....	<b>66</b>
<b>Figure 3.18 :</b>	Carte Arduino.....	<b>67</b>
<b>Figure 3.19 :</b>	Le système électronique.....	<b>67</b>
<b>Figure 3. 20 :</b>	Schéma de cycle système (PV/T).....	<b>68</b>
<b>Figure 3.21 :</b>	Nanoparticule de charbonne.....	<b>69</b>
<b>Figure 3.22 :</b>	Décharger le nanofluide dans de l'eau distillée.....	<b>69</b>
<b>Figure 3.23 :</b>	Processus de sonication.....	<b>70</b>
<b>Figure 3.24 :</b>	Fin du processus de sonication.....	<b>70</b>
<b>Figure 3.25 :</b>	Le résultat final du nanofluide.....	<b>71</b>
<b>Figure 3.26 :</b>	Système hybride ( PV / T ).....	<b>72</b>
<b>Figure 3.27 :</b>	Comparaison entre la sortie de nanofluide et l'eau distillée.....	<b>76</b>
<b>Figure 3.28 :</b>	Comparaison entre $T_4$ et $T_5$ .....	<b>77</b>
<b>Figure 3.29 :</b>	Comparaison entre $T_2$ et $T_5$ .....	<b>77</b>
<b>Figure 3.30 :</b>	Comparaison entre Tension (1) et Tension (2).....	<b>78</b>

---

---

# **L**iste des tableaux

---

<b>Tableau 1.1 :</b> Coefficients d'albédo usuels.....	<b>28</b>
<b>Tableau 2.1 :</b> Propriétés des surfaces sélectives.....	<b>49</b>
<b>Tableau 3.1 :</b> Propriétés physiques de matériau.....	<b>62</b>
<b>Tableau 3.2 :</b> Résultats de l'expérience.....	<b>73</b>
<b>Tableau 3.3 :</b> Les différences des températures d'eau distillée et nanofluide et sont écart.....	<b>74</b>
<b>Tableau 3.4 :</b> La différence entre tension (1) et tension (2).....	<b>74</b>

---

---

# **T**able des matières

---

**Remerciements**

**Dédicaces**

**Nomenclature**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Table des matières**

**Introduction.....12**

## *Chapitre 1 : Généralités Sur l'énergie solaire*

**Sommaire**

---

<b>1.1</b>	Introduction.....	<b>16</b>
<b>1.2</b>	Énergies renouvelables .....	<b>16</b>
<b>1.2.1</b>	Energie éolienne.....	<b>16</b>
<b>1.2.2</b>	Energie hydraulique.....	<b>17</b>
<b>1.2.3</b>	Energie géothermique.....	<b>17</b>
<b>1.2.4</b>	Energie biomasse.....	<b>18</b>
<b>1.2.5</b>	Energie solaire.....	<b>19</b>
<b>1.2.5.1</b>	Types d'énergie solaire.....	<b>19</b>
<b>1.2.5.1.1</b>	Energie solaire photovoltaïque.....	<b>19</b>
<b>1.2.5.1.2</b>	Energie solaire thermique.....	<b>21</b>
<b>1.2.5.2</b>	Gisement solaire.....	<b>21</b>
<b>1.2.5.2.1</b>	Le soleil.....	<b>21</b>
<b>A</b>	Propriétés géométriques.....	<b>22</b>
<b>B</b>	Mouvement de la terre autour du soleil.....	<b>23</b>
<b>C</b>	Les coordonnées géométriques du soleil.....	<b>23</b>
<b>D</b>	Les coordonnées sphériques du le Soleil et la Terre.....	<b>24</b>
<b>1.2.5.3</b>	Le rayonnement solaire.....	<b>25</b>
<b>1.2.5.3.1</b>	Rayonnement direct.....	<b>26</b>
<b>1.2.5.3.2</b>	Rayonnement diffus.....	<b>26</b>
<b>1.2.5.3.3</b>	Rayonnement global.....	<b>27</b>
<b>1.2.5.3.4</b>	L'albédo.....	<b>27</b>
<b>1.3</b>	Conclusion.....	<b>28</b>

---

## Chapitre 2 : les panneaux solaires photovoltaïque (PV) et thermique (T)

### Sommaire

---

<b>2.1</b>	Introduction.....	<b>32</b>
<b>2.2</b>	Historique .....	<b>32</b>
<b>2.3</b>	L'énergie solaire .....	<b>33</b>
<b>2.3.1</b>	Panneau solaire photovoltaïque.....	<b>33</b>
<b>2.3.1.1</b>	L'effet photovoltaïque.....	<b>34</b>
<b>2.3.1.2</b>	Les différentes générations de technologie des cellules solaires photovoltaïques.....	<b>34</b>
<b>A</b>	Première génération : cellules cristallines.....	<b>35</b>
<b>A.1</b>	Cellules polycristallin.....	<b>35</b>
<b>A.2</b>	Cellules monocristallin.....	<b>36</b>
<b>B</b>	Deuxième génération : cellules couches minces.....	<b>37</b>
<b>B.1</b>	Filière CdTe.....	<b>37</b>
<b>B.2</b>	Filière CIGSe.....	<b>38</b>
<b>B.3</b>	Le silicium amorphe hydrogéné.....	<b>39</b>
<b>C</b>	Troisième génération.....	<b>40</b>
<b>C.1</b>	Cellules pérovskite.....	<b>40</b>
<b>C.2</b>	Cellule de Gretzel.....	<b>41</b>
<b>C.3</b>	Cellule de multi Junction.....	<b>41</b>
<b>2.3.1.3</b>	La conception d'un système photovoltaïque) .....	<b>42</b>
<b>2.3.1.3.1</b>	Caractéristique courant – tension.....	<b>43</b>
<b>2.3.1.3.2</b>	Influence de l'éclairement.....	<b>44</b>
<b>2.3.1.3.3</b>	Influence de la température.....	<b>45</b>
<b>2.3.2</b>	Capteur solaire thermique.....	<b>45</b>
<b>2.3.2.1</b>	Différents types des Capteur solaire thermique.....	<b>46</b>
<b>2.3.2.1.1</b>	Capteur a tubes.....	<b>47</b>
<b>2.3.2.1.2</b>	Capteur plan.....	<b>47</b>
<b>2.3.2.2</b>	Composants d'un système solaire thermique plan.....	<b>48</b>
<b>A</b>	La couverture transparente.....	<b>48</b>
<b>B</b>	L'absorbeur.....	<b>49</b>
<b>C</b>	Le coffre ou le cadre.....	<b>51</b>
<b>D</b>	Le fluide caloporteur.....	<b>51</b>
<b>E</b>	La lame d'aire.....	<b>52</b>
<b>F</b>	Isolation thermique.....	<b>52</b>
<b>2.3.2.3</b>	Transfert de chaleur.....	<b>52</b>

---

2.3.2.3.1	Transfert par conduction.....	52
2.3.2.3.2	Transfert par convection.....	52
2.3.2.3.3	Transfert par rayonnement.....	53
2.4	Conclusion.....	53

---

## *Chapitre 3 : Système hybride photovoltaïque / thermique ( PV/ T)*

### Sommaire

---

3.1	Introduction.....	57
3.2	Le concept de system hybride photovoltaïque-thermique.....	57
3.3	Les composants constituant le système hybride (PV/T).....	58
3.3.1	Absorbeur d'aluminium.....	59
3.3.2	Absorbeur de cuivre.....	60
3.3.3	Isolation.....	61
3.3.3.1	Laine de verre.....	61
3.3.3.2	Alucobond.....	62
3.3.4	Pompe.....	63
3.3.5	Refroidisseur.....	63
3.4	Réalisation du système hybride PV/T.....	64
3.4.1	Choix du panneau solaire.....	64
3.4.2	Choix de l'absorbeur.....	65
3.4.3	Insertion du serpentins.....	66
3.4.4	Insertion de la laine de verre.....	66
3.4.5	Insertion de l'Alucobond.....	67
3.4.6	Finalisation du système hybride.....	67
3.4.7	Partie électrique.....	68
3.5	Principe de fonction du système PV/T .....	69
3.6	Préparation des nano-fluides en Carbone .....	70
3.6.1	Aperçus sur les Nano-fluides.....	70
3.6.2	Protocole de préparation des nano-fluides.....	71
3.7	Procédures expérimentales.....	73
3.9	Résultats et discussion.....	74
3.10	Conclusion.....	79

---

---

# **I**ntroduction Générale

En raison du transport, l'industrie, la croissance démographique, l'urbanisation et le développement économique, la demande mondiale en énergie ne cesse d'augmenter, en particulier dans les pays en développement comme l'Algérie.

Aujourd'hui, la production de l'énergie s'appuie principalement sur des ressources fossiles telles que le pétrole et le gaz de houille. Cependant, ces formes d'énergie se dégradent constamment et ont un effet néfaste sur l'environnement. Pour ces raisons et pour répondre à la demande en énergie, la réduction de l'impact environnemental est l'utilisation des énergies renouvelables comme la voie la meilleure et la plus prometteuse, tant en termes d'épuisement ou de pollution de l'environnement que de santé. Parmi ces énergies renouvelables, l'énergie solaire, qui est la plus grande source de production d'énergie au monde, est la mieux adaptée à la production de l'énergie énergétique. Il est à noter qu'une partie du rayonnement solaire théoriquement satisfaire l'ensemble des besoins énergétiques de l'humanité.

Notre projet consiste en une étude expérimentale d'un système hybride Photovoltaïque /Thermique (PV/T) pour la production d'électricité et d'eau chaude. Notre contribution majeure de ce projet se focalise en l'étude expérimental de l'effet des nano-fluide en carbone sur l'efficacité d'un système de technologies déjà existantes (photovoltaïque et thermoélectrique). En effet, les panneaux photovoltaïques soumis à des fortes irradiations (ensoleillement) perdent de leur efficacité car la température peut atteindre 60-80°C sur la surface qui reçoit les rayonnements. Des systèmes de refroidissement sont intégrés afin de diminuer cette température, en consommant cette énergie produite par le panneau photovoltaïque, et ce, pour produire de l'eau chaude.

Notre travail est divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré aux types d'énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire, ainsi qu'au domaine solaire et ses caractéristiques.

Dans le deuxième chapitre, nous donnerons un aperçu des panneaux photovoltaïques, du principe de fonctionnement d'une cellule solaire, et des capteurs thermiques.

---

Dans le troisième chapitre nous illustrons les composants et les différentes étapes de réalisation de système hybride PV/T, ainsi que la méthode de travail et les résultats obtenus avec et sans l'utilisation des nano-fluides.

Votre travail s'achève par une conclusion générale.



# Chapitre 1

---

## GENERALITES SUR L'ENERGIE SOLAIRE

---

### Sommaire

---

<b>1.1</b>	Introduction.....	<b>16</b>
<b>1.2</b>	Énergies renouvelables .....	<b>16</b>
<b>1.2.1</b>	Energie éolienne.....	<b>16</b>
<b>1.2.2</b>	Energie hydraulique.....	<b>17</b>
<b>1.2.3</b>	Energie géothermique.....	<b>17</b>
<b>1.2.4</b>	Energie biomasse.....	<b>18</b>
<b>1.2.5</b>	Energie solaire.....	<b>19</b>
<b>1.2.5.1</b>	Types d'énergie solaire.....	<b>19</b>
<b>1.2.5.1.1</b>	Energie solaire photovoltaïque.....	<b>19</b>
<b>1.2.5.1.2</b>	Energie solaire thermique.....	<b>21</b>
<b>1.2.5.2</b>	Gisement solaire.....	<b>21</b>
<b>1.2.5.2.1</b>	Le soleil.....	<b>21</b>
<b>A</b>	Propriétés géométriques.....	<b>22</b>
<b>B</b>	Mouvement de la terre autour du soleil.....	<b>23</b>
<b>C</b>	Les coordonnées géométriques du soleil.....	<b>23</b>
<b>D</b>	Les coordonnées sphériques du le Soleil et la Terre.....	<b>24</b>
<b>1.2.5.3</b>	Le rayonnement solaire.....	<b>25</b>
<b>1.2.5.3.1</b>	Rayonnement direct.....	<b>26</b>
<b>1.2.5.3.2</b>	Rayonnement diffus.....	<b>26</b>
<b>1.2.5.3.3</b>	Rayonnement global.....	<b>27</b>
<b>1.2.5.3.4</b>	L'albédo.....	<b>27</b>
<b>1.3</b>	Conclusion.....	<b>28</b>

---

# Chapitre 1

## 1.1 Introduction

L'utilisation de sources d'énergie solaire réduit la pression sur les ressources naturelles (charbon, pétrole) limitée, ainsi que leurs problèmes de polluants dans l'atmosphère. En effet, l'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, disent-ils Origine de presque toutes les sources d'énergie utilisées par l'homme.

Dans ce chapitre nous parlerons de l'énergie solaire et de sa relation avec le soleil, le gisement solaire et le rayonnement solaire.

## 1.2 Types d'énergies renouvelables

L'énergie renouvelable se compose de plusieurs types qui sont l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie géothermique, l'énergie biomasse et l'énergie hydraulique. Ces énergies sont naturellement régénératrices après leur consommation (du moins elles durent très longtemps) [1].

### 1.2.1 Energie éolienne

Les nations dotées d'une côte peuvent exploiter l'énergie éolienne tout autant que dans les régions désertiques, à condition que la vitesse du vent soit adéquate. L'énergie éolienne est une forme indirecte d'énergie solaire, et c'est la différence de température et de pression causée par l'absorption du rayonnement solaire dans l'atmosphère qui entraîne le vent. L'utilisation humaine du vent n'est pas moderne, elle est très ancienne [2].

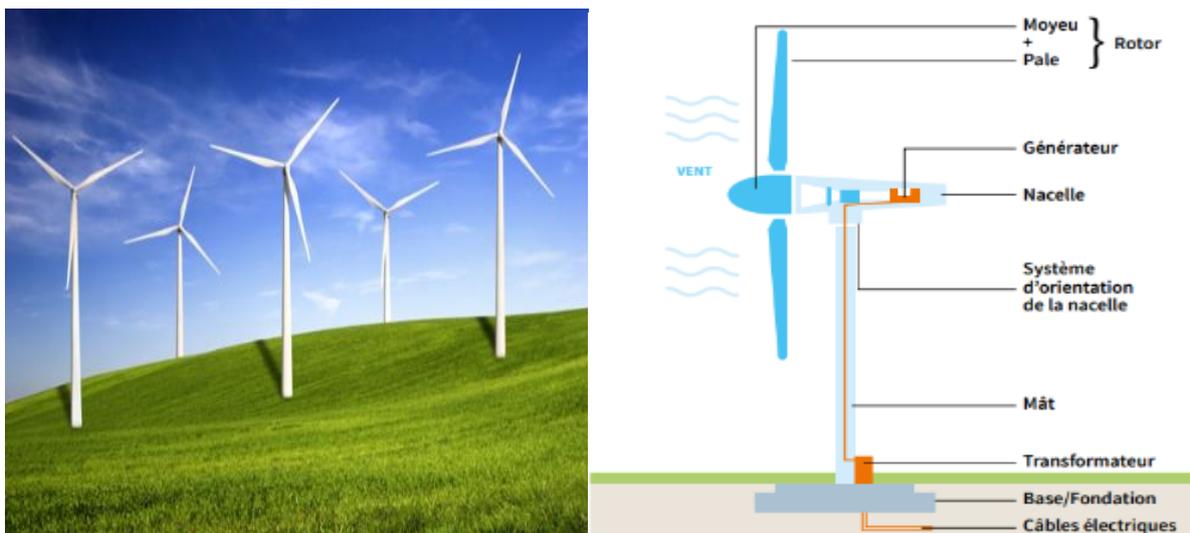
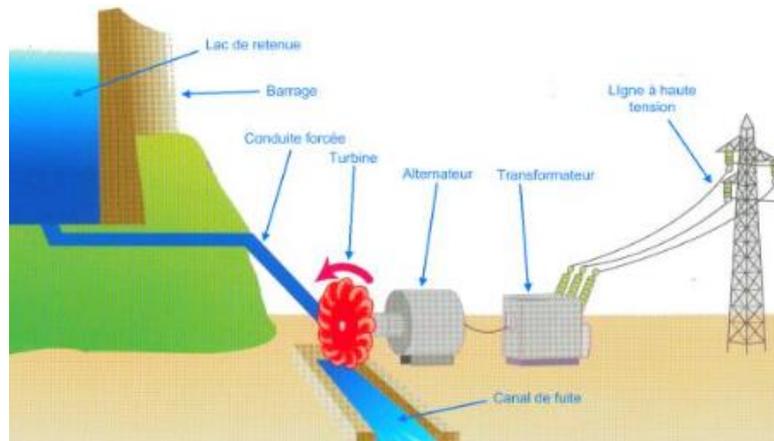


Figure 1.1 : Ventilateurs des énergies éoliennes (<https://mtaterre.fr/>)

Le principe des éoliennes ,qui produisent l'électricité, s'inspire des moulins à vent et des roues hydrauliques qui servaient à moudre le grain et à pomper l'eau. L'éolien est l'une des énergies renouvelables « les plus prometteuses » à développer. Intéressant d'un point de vue économique et écologique. Ces dernières années, l'éolien s'est très fortement développé partout dans le monde, notamment en Europe. Le progrès technologique dans ce domaine continue de progresser [3].

### 1.2.2 Energie hydraulique

Lorsque des ressources hydroélectriques sont disponibles, il est essentiel de les exploiter judicieusement afin de produire de l'électricité à moindre coût [2]. L'énergie hydraulique est convertie en énergie électrique au sein des centrales hydrauliques, lorsque l'eau s'écoule ou chute d'une grande hauteur, elle met en mouvement une turbine qui transmet cette énergie à un générateur pour produire de l'électricité. Grâce au cycle naturel de l'eau, il n'est pas nécessaire de recourir à des dispositifs pour remonter l'eau en altitude, les centrales hydrauliques sont alimentées en eau de manière naturelle. De plus, l'eau rejetée par la centrale retourne à la rivière dans son état d'origine, sans avoir subi de modifications [4].

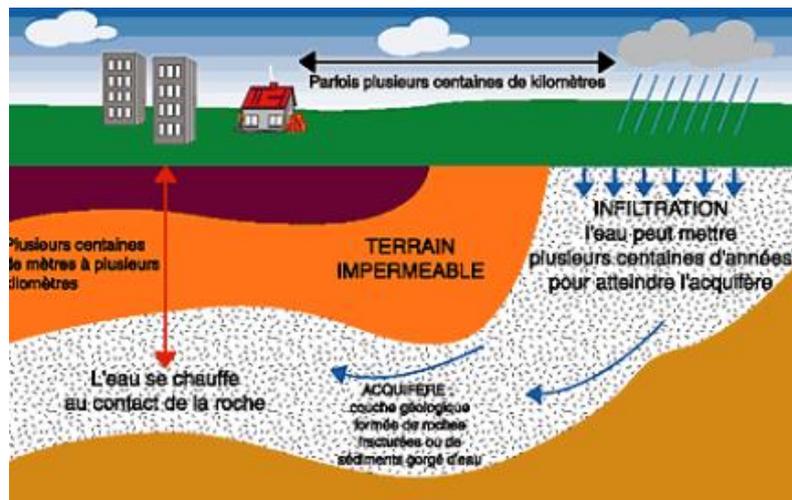


*Figure 1.2 : Turbines hydrauliques (<https://tdcc.fr>)*

### 1.2.3 Energie géothermique

L'énergie géothermique repose sur la chaleur de la Terre. Elle permet de produire de l'électricité au sein des centrales géothermiques en utilisant l'eau chaude, à haute température, provenant des nappes phréatiques souterraines. La température de la roche augmente en moyenne de 1 °C tous les 30 mètres de profondeur [2] [5]. Les puits géothermiques profonds permettent de produire de l'eau chaude qui peut être utilisée dans de nombreuses applications telles que les

bains chauffants, les serres agricoles et les réseaux de chaleur pour le chauffage urbain. Les réseaux géothermiques, principalement réalisés par forage ou doublet géothermique, transportent la chaleur sous forme d'eau chaude à travers des canalisations souterraines. Ils fournissent le chauffage aux appartements, aux bâtiments publics et industriels, ainsi que l'eau chaude sanitaire [5].



*Figure 1.3 : fonctionnement de l'énergie géothermique (<https://www.clcv.org/energies/la-geothermie-une-energie-inepuisable-sous-nos-pieds>)*

#### 1.2.4 Energie biomasse

Le concept de biomasse a été appliqué aux produits végétaux organiques pour la production d'énergie [6]. On retrouve généralement de la biomasse forestière (bois de chauffage, résidus de transformation du bois, résidus d'exploitation forestière) et de la biomasse agroalimentaire (résidus végétaux, végétaux et animaux de production agricole et résidus de transformation alimentaire) [7].

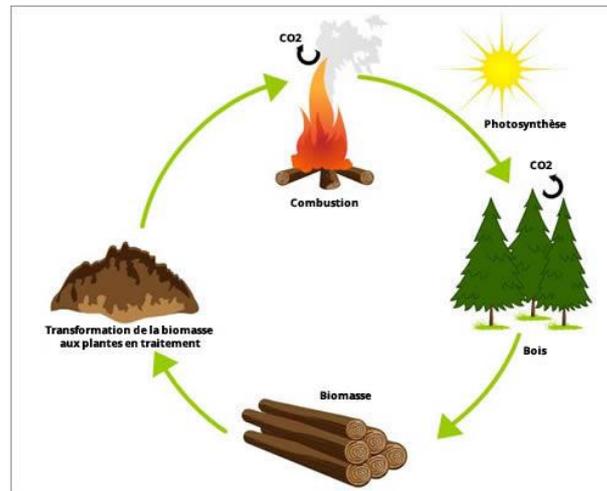


Figure 1.4 : Renouveau de la biomasse (<https://frapasa.com/fr/biomasse/>)

## 1.2.5 Energie solaire

L'énergie solaire est la forme d'énergie produite par la conversion du rayonnement solaire. Elle peut être transformée en chaleur ou en électricité. La constante solaire représente la quantité d'énergie solaire par unité de surface atteignant la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. La valeur couramment utilisée pour l'éclairage est de 1360 watts par mètre carré. Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduite à 1000 watts par mètre carré en raison de l'absorption dans l'atmosphère [8].

Les centrales solaires utilisent la lumière du soleil comme source d'énergie. Ce système puise son énergie en concentrant le rayonnement solaire, qui est capté à l'aide de divers dispositifs tels que des capteurs solaires et des panneaux photovoltaïques.

L'avantage de la technologie solaire réside dans sa capacité à réduire les coûts de l'électricité. Les installations de centrales solaires s'étendent sur une vaste superficie, permettant ainsi de générer une quantité suffisante d'électricité pour alimenter une zone spécifique [9].

### 1.2.5.1 Types d'énergies solaires

Il existe différents types d'énergies solaires à savoir l'énergie solaire photovoltaïque, l'énergie solaire thermique et l'énergie solaire thermodynamique [10]. Dans cette partie, on se focalise uniquement sur les deux premiers types d'énergie solaire.

#### 1.2.5.1.1 Energie solaire photovoltaïque

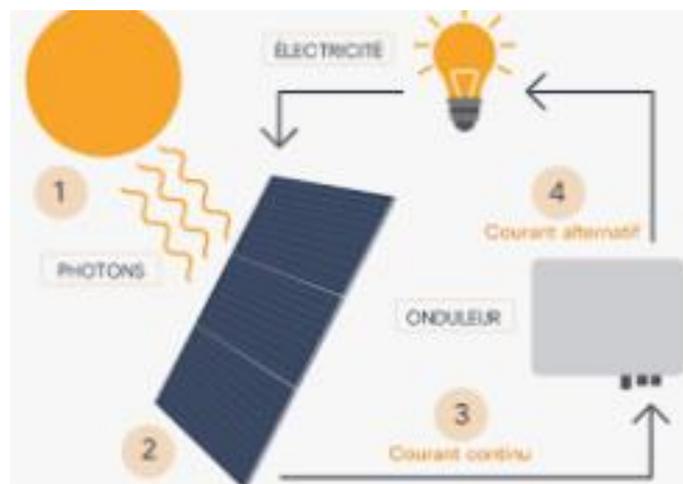
Le terme "photovoltaïque" tire son origine du grec ancien, où "Phōs" signifie lumière et "Volt" est une référence à Alessandro Volta (1745-1827), pionnier de l'étude de l'électricité. Ainsi, "photovoltaïque" peut être littéralement traduit par "lumière-électricité". Le principe de base de

la production d'énergie photovoltaïque est la conversion du rayonnement solaire en électricité à l'aide de panneaux ou de modules photovoltaïques [11].



*Figure 1.5 : Panneaux photovoltaïques (<https://conseils-thermiques.org/contenu/panneau-solaire-photovoltaïque.php>)*

Les cellules qui composent ces panneaux sont réalisées à partir d'un matériau semi-conducteur communément appelé silicium. Lorsque la lumière du soleil frappe la surface du panneau, les photons transportant l'énergie lumineuse transfèrent cette énergie aux électrons dans le silicium. Ces électrons commencent alors à se déplacer, et ce mouvement crée un courant continu. Transformer l'énergie directe en énergie alternative est indispensable pour qu'elle puisse être consommée directement ou fournie au réseau. C'est le rôle de l'onduleur (le dispositif central de la chaîne de production) [12].



*Figure 1.6 : Fonctionnement des panneaux solaire photovoltaïques [12]*

### 1.2.5.1.2 Energie solaire thermique

Le principe de base des panneaux solaires thermiques est de convertir le rayonnement solaire en chaleur. Ce type de plaque est souvent constitué d'un tube serpentin en cuivre soudé à une plaque noire appelée absorbeur qui, après avoir été chauffée, transfère cette chaleur au fluide caloporteur antigel circulant à l'intérieur du tube. Ce liquide chaud s'écoule dans un réservoir de stockage où il chauffe l'eau sanitaire froide afin que la chaleur solaire puisse être utilisée pour produire de l'eau sanitaire chaude à partir du système de stockage [12].

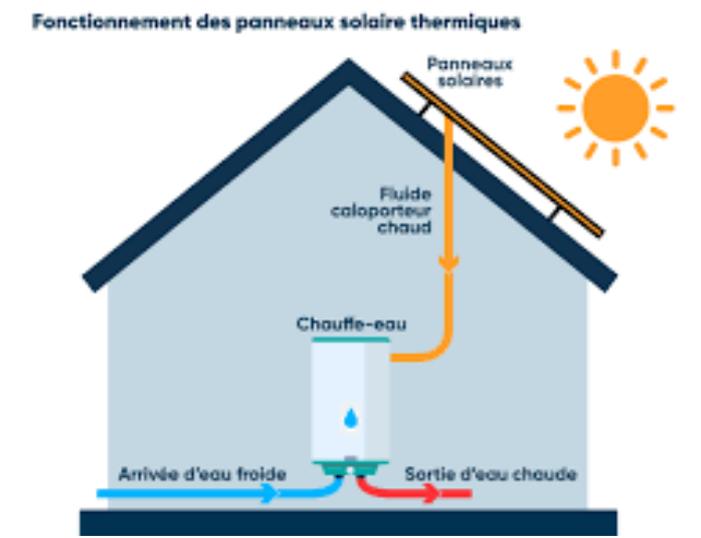


Figure 1.7 : Fonctionnement des panneaux solaire thermique [12]

## 1.2.5.2 Gisement solaire

### 1.2.5.2.1 Le soleil

Le soleil est une sphère de matière gazeuse très chaude d'un diamètre de  $1,39.10^9$  m et d'une distance moyenne de la Terre de  $1.510^{11}$  m. Vu de la Terre, le soleil tourne sur son axe une fois toutes les quatre semaines, mais en tant que corps solide, il ne tourne pas. Il tourne en 27 jours à l'équateur et 30 jours aux pôles [13] [14] et [15]. Il est considéré comme un corps noir avec une température effective de  $5800$  K et émet principalement dans le visible et le proche infrarouge ( $300$  nm à  $1200$  nm) jusqu'à environ  $500$  nm cette énergie est produite par des réactions de fusion nucléaire dans le soleil et filtrée par l'atmosphère. La masse du soleil est si importante qu'elle représente  $99,68$  % de la masse totale du système solaire. Le rayonnement solaire apporte  $2000-2500$  Kwh/m<sup>2</sup> d'énergie à la Terre chaque année cela dépasse toutes les ressources fossiles jamais découvertes [13] [14] et [15].

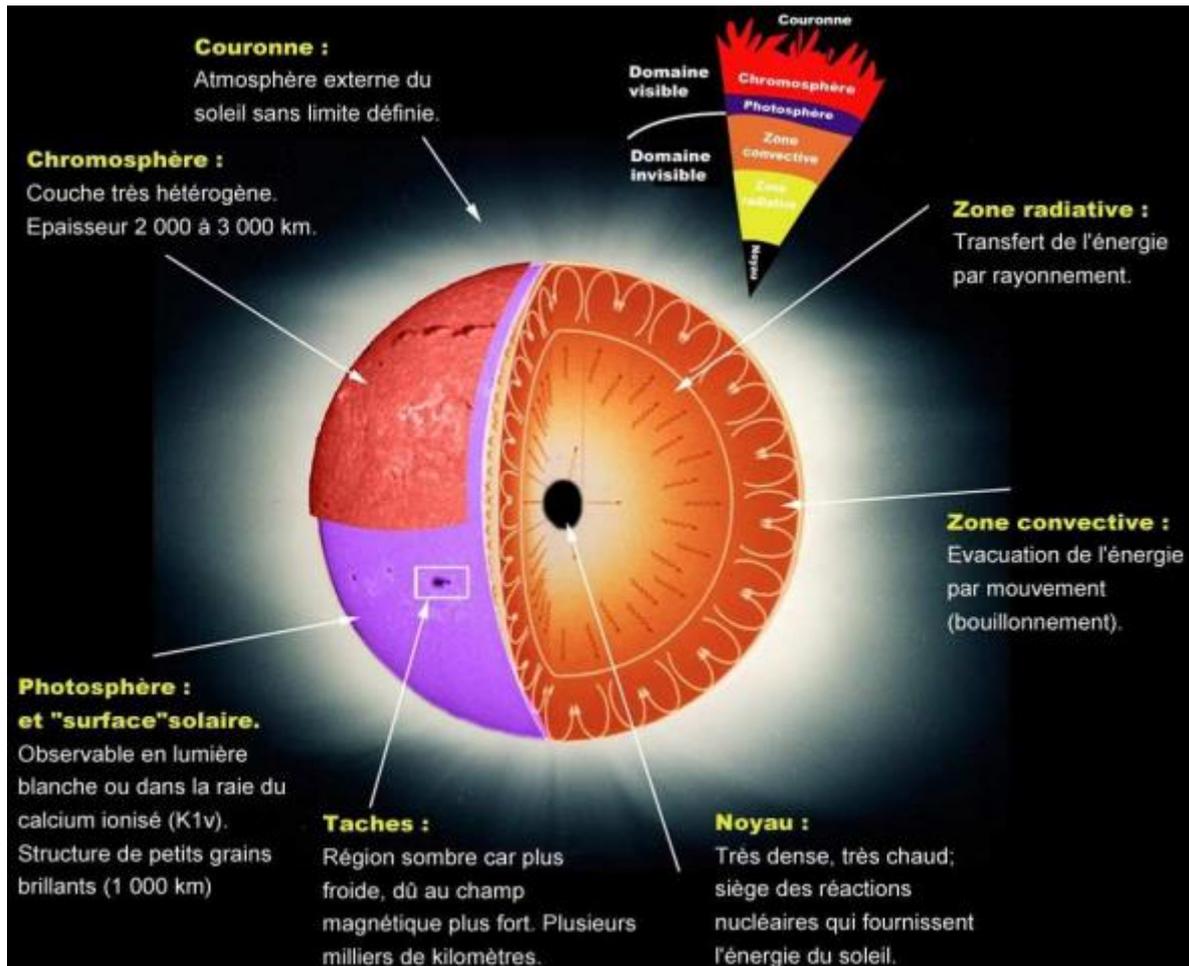


Figure 1.8 : Les couches de soleil (<https://cel.hal.science/cel-00682269>)

### A. Propriétés géométriques

Le soleil, une énorme sphère de gaz, a un diamètre d'environ  $1,39 \times 10^9$  kilomètres. Essentiellement, il s'agit d'une sphère de gaz en rotation lente, en équilibre hydrostatique (avec une période de rotation d'environ 27 jours). La rotation du soleil entraîne un aplatissement aux régions polaires. L'aplatissement d'une étoile est défini comme la valeur numérique du rapport entre la différence des deux axes (rayon équatorial et rayon polaire du soleil) et l'axe principal (rayon équatorial) [16] [18]. Si la rotation du soleil est fixe (composition uniforme et vitesse de rotation uniforme), l'aplatissement peut être estimé théoriquement<sup>2</sup>. Cependant, le soleil ne peut pas être considéré comme un corps rigide en rotation. En effet, les différentes rotations de surface, bien identifiables par les taches solaires (25 jours à l'équateur et 35 jours aux pôles), compliquent les déterminations théoriques de l'aplatissement du soleil. De même, l'aplatissement du soleil est difficile à mesurer car sa valeur est si petite qu'elle peut être perturbée par l'activité magnétique de surface, en particulier les taches solaires et les éruptions. Les questions sur l'aplatissement du soleil (théorique, mesurée, etc.) intéressent les astronomes

depuis la fin du XIXe siècle. L'un des défis pour les astronomes de l'époque était d'expliquer ainsi la précession du périhélie de Mercure. En effet, les origines de cette recherche ont fait surface lorsque Urban Le Verrier (1811-1877) a montré que la précession observée de Mercure était "trop grande" [17].

### B. Mouvement de la terre autour du soleil

La terre effectue une orbite autour du soleil en 365,25 jours sur une trajectoire elliptique semi-circulaire appelée plan écliptique. La Terre se rapproche le plus du Soleil au solstice d'hiver (21 décembre) à une distance de 147 millions de km, et s'en éloigne au solstice d'été à 152 millions de km, cependant cette distance peut varier de  $\pm 1,7\%$  sur l'année en raison de l'excentricité orbitale [18] [19] [20] et [21]. La distance moyenne est de 149,5 millions de km. Aux équinoxes de printemps (21 mars) et d'automne (23 septembre), la Terre croise le petit axe de son orbite. Il tourne en 24 heures autour de son axe de rotation (l'axe polaire), qui a une direction fixe dans l'espace [20].

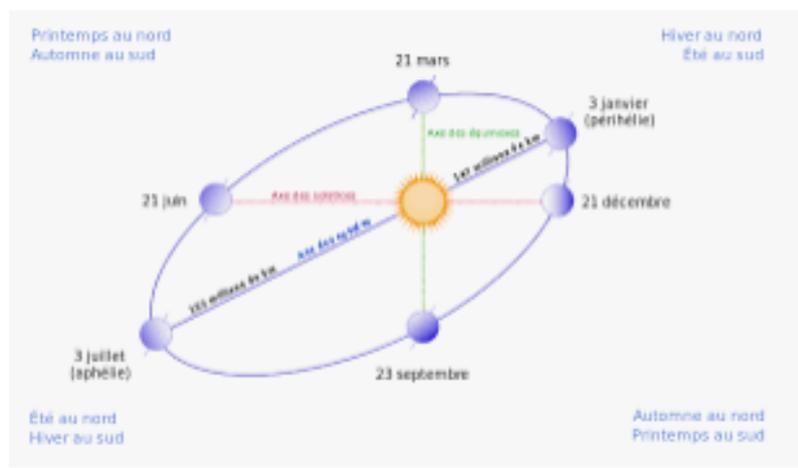


Figure 1.9 : Orbite de la Terre autour du soleil (<https://fr.wikipedia.org>)

### C. Les coordonnées géométriques du soleil

Deux fois par an, le plan équatorial passe et coupe le centre du soleil. Puis l'écliptique en deux points  $x$  et  $x'$  : Alors l'égalité du jour et de la nuit est donnée pour tous les points de la terre. Les points correspondants dans le temps sont appelés équinoxes. Le point  $x$  est appelé l'équinoxe vernal et correspond à l'équinoxe vernal dans l'hémisphère nord. Ce point est utilisé dans les coordonnées équatoriales et écliptiques. Le point opposé  $x'$  correspond à l'équinoxe d'automne. L'année tropique est la période entre deux équinoxes consécutifs [21] [22]. Le système solaire est projeté hors de l'espace à grande vitesse, mais toutes les étoiles sont visibles. Une distance

considérable (même infime) peut être perçue et le silence perçu comme constant. Ils forment un ciel immobile au-dessus duquel le soleil et la planète peuvent être vus depuis la Terre. Les équinoxes ne pointent pas nécessairement vers le même point dans le ciel immobile, tournent dans cette direction, reculent (sens antihoraire) et tournent à environ 26 000 tours par minute une fois en ans. Cela est dû à la précession de la Terre, semblable à une toupie. Son axe de rotation tourne autour du cône, provoquant un phénomène appelé précession des équinoxes. Il tourne donc en moyenne de  $360/26000 = 0,0138^\circ/\text{an}$  soit environ 50 secondes d'arc. Par conséquent, les calculs du capteur peuvent supposer que l'équinoxe vernal est fixe [21] [22].

#### D. Les coordonnées sphériques du le Soleil et la Terre

Plaçons l'axe de rotation du Soleil.

Coordonnées Écliptiques du pôle  $P_S$  :  $L_S$  et  $l_S$

Coordonnées Équatoriales du pôle  $P_S$  :  $\alpha_S$  et  $\delta_S$

Considérons le triangle sphérique  $P_S P_N Q$  (figure 1.10) [23] :

$$P_S Q P_N = 90^\circ - L_S$$

$$Q P_S P_N = 270^\circ - \alpha_S$$

$$\text{arc } P_S Q = i = 90^\circ - l_S$$

$$\text{arc } P_N Q = \varepsilon \beta$$

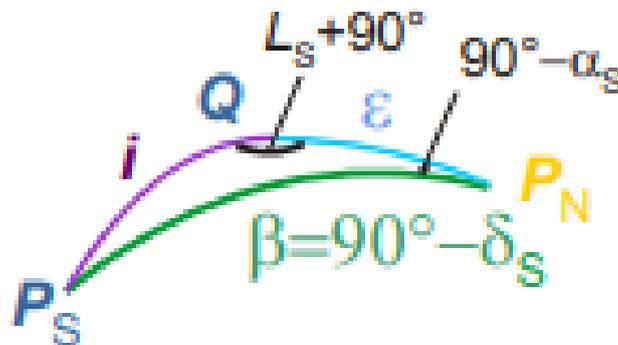


Figure 1.10 : Triangle des pôles [23]

Angle entre les deux axes de rotation :  $\beta = 90^\circ - \delta_S = 26.15^\circ$

Ce triangle contient tous les éléments de la rotation du soleil :  $i$  l'inclinaison du pôle  $\beta$  angle entre les deux axes de rotation. Nous verrons que  $\beta$  est l'angle maximum entre les deux axes vus de la Terre [23].



d'onde plus courtes que l'extrémité violette du spectre visible. 35% du rayonnement solaire capté par l'atmosphère terrestre est renvoyé vers l'espace. Le rayonnement qui atteint la Terre se propage dans toutes les directions lors de son passage dans l'atmosphère. Il rencontre des particules d'air et des particules de poussière et apparaît bleu (ce rayonnement diffus se trouve exclusivement à l'extrémité bleue du spectre visible), donc un ciel clair apparaît bleu. La vapeur d'eau, le dioxyde de carbone et l'ozone absorbent 10 à 15 % du rayonnement solaire, le reste du rayonnement frappe directement la surface [24].

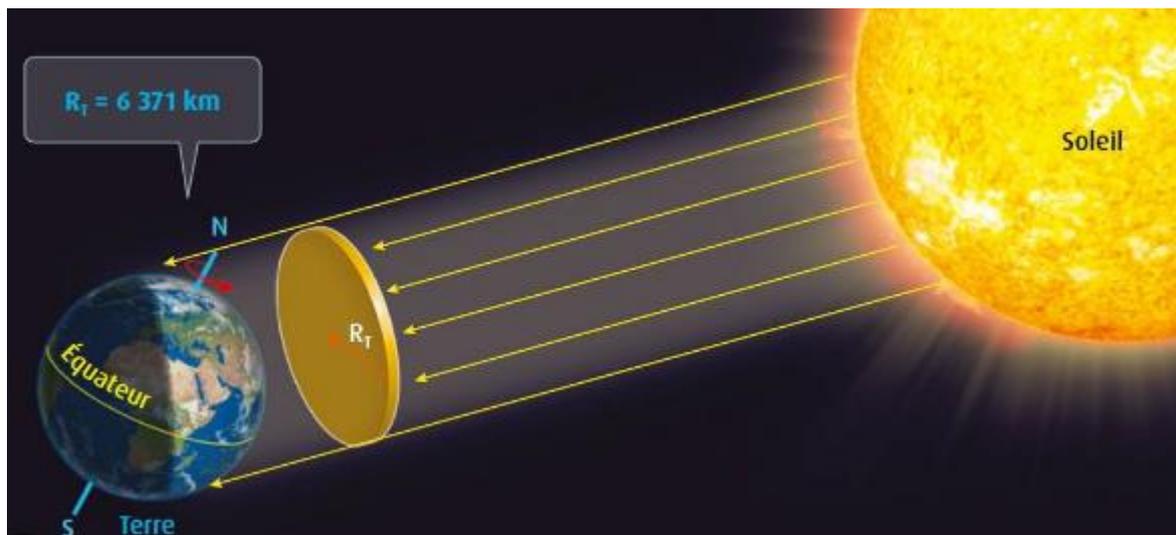


Figure 1.13 : le rayonnement solaire reçu par la terre (<https://manuelnumeriquemax.belin.education>)

### 1.2.5.3.1 Rayonnement Direct

Le rayonnement direct est donné par la formule :

$$s_n = g_n^e \exp(-k_0 \cdot m \cdot T) \quad (1)$$

$g_n^e = 1367[1 + 0.034 \cos(2\pi \cdot (N - 2) / 365)]$  ;  $g$  : Rayonnement solaire hors atmosphère.

$k_0 = [9.4 + 0.9 \text{ m}]^{-1}$  ;  $k_0$  : coefficient d'atténuation.

$m = 0.89z / \sin(h)$  ;  $m$  : masse atmosphérique.

$T = T^* + \Delta T$  ;  $T$  : facteur de trouble total.

$\sin(h) = \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(h) + \sin(\delta) \cdot \sin(\varphi)$  ;  $h$  : hauteur du soleil [25].

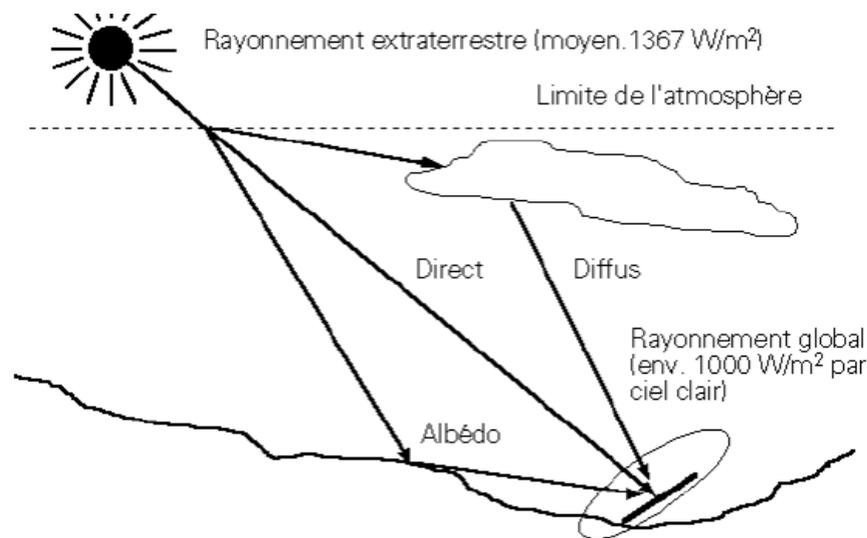
### 1.2.5.3.2 Rayonnement Diffus

Ce genre de rayonnement est évalué à l'aide d'un instrument nommé "pyranomètre", équipé d'un pare-soleil (un anneau métallique qui occulte le disque solaire). Ce rayonnement provient de la

voûte céleste, à l'exception du disque solaire lui-même. Il représente la partie du rayonnement solaire diffusée par les particules liquides ou solides en suspension dans l'atmosphère [27].

### 1.2.5.3.3 Rayonnement global

C'est la somme des rayonnements direct et diffus.



*Figure 1.14 : Composantes du rayonnement solaire : extraterrestre, global = direct + diffus + albédo [27]*

### 1.2.5.3.4 L'albédo

En fait, la Terre n'est pas un corps noir, mais une fraction du rayonnement solaire Les incidents sont réfléchis par l'atmosphère (principalement les nuages) et le sol Cette quantité est appelée flux d'albédo. L'albédo est communément défini comme le rapport de l'énergie solaire réfléchie par la surface à l'énergie solaire Incident. Utilise une échelle graduée de 0 à 1 correspondant au noir. Avec un miroir parfait pour un corps qui ne reflète pas les reflets et s'étale dans toutes les directions sans absorber toute la lumière visible reçue [27] [29]. Les valeurs d'albédo ou de réflectance au sol d'un site peuvent varier selon les saisons en raison des changements de neige et de la végétation locale. En général, les environnements arides sans feuillage ont un albédo élevé constant, car la végétation absorbe la lumière solaire. Les zones désertiques, en particulier, peuvent maintenir un albédo élevé constant. Aux latitudes élevées, les conditions hivernales peuvent entraîner des variations saisonnières de l'albédo, car des valeurs élevées favorisent la réflexion de l'irradiation. Des études sur le terrain ont également démontré que les modules bifaciaux facilitent la fonte de la neige après une tempête en raison de la capture de l'irradiation provenant de l'arrière [27] [29].

**Tableau 1.1** : Coefficients d'albédo usuels [27]

Type de surface	Albédo
Surface de lac	0.02 à 0.04
Forêt de conifères	0.05 à 0.15
Forêt tropicale	0.12
Herbe vert	0.15
Sable léger et sec	0.25 à 0.45
Sol sombre	0.05 à 0.15
Glace	0.30 à 0.40
Mer chaude	0.05
Mer froide	0.15
Neige tassée	0.60
Neige Frêche	0.85
Nuage	0.86
Verre à vitres	0.10

### 1.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons brièvement abordé les différents types d'énergies renouvelables, en particulier l'énergie photovoltaïque et l'énergie solaire thermique, et leurs principes. Nous avons également introduit les dimensions géométriques du Soleil et sa relation avec la Terre. En fait, ces connaissances de bases nous aident à bien comprendre le contenu de deuxième chapitre qui concerne les panneaux solaires photovoltaïque (PV) et thermique (T).

---

# Chapitre 2

---

## Les panneaux photovoltaïques (PV) et les capteurs thermiques (T)

---

### Sommaire

---

<b>2.1</b>	Introduction.....	<b>32</b>
<b>2.2</b>	Historique .....	<b>32</b>
<b>2.3</b>	L'énergie solaire .....	<b>33</b>
<b>2.3.1</b>	Panneau solaire photovoltaïque.....	<b>33</b>
<b>2.3.1.1</b>	L'effet photovoltaïque.....	<b>34</b>
<b>2.3.1.2</b>	Les différentes générations de technologie des cellules solaires photovoltaïques.....	<b>34</b>
<b>A</b>	Première génération : cellules cristallines.....	<b>35</b>
<b>A.1</b>	Cellules polycristallin.....	<b>35</b>
<b>A.2</b>	Cellules monocristallin.....	<b>36</b>
<b>B</b>	Deuxième génération : cellules couches minces.....	<b>37</b>
<b>B.1</b>	Filière CdTe.....	<b>37</b>
<b>B.2</b>	Filière CIGSe.....	<b>38</b>
<b>B.3</b>	Le silicium amorphe hydrogéné.....	<b>39</b>
<b>C</b>	Troisième génération.....	<b>40</b>
<b>C.1</b>	Cellules pérovskite.....	<b>40</b>
<b>C.2</b>	Cellule de Gretzel.....	<b>41</b>
<b>C.3</b>	Cellule de multi Junction.....	<b>41</b>
<b>2.3.1.3</b>	La conception d'un système photovoltaïque) .....	<b>42</b>
<b>2.3.1.3.1</b>	Caractéristique courant – tension.....	<b>43</b>
<b>2.3.1.3.2</b>	Influence de l'éclairement.....	<b>44</b>
<b>2.3.1.3.3</b>	Influence de la température.....	<b>45</b>
<b>2.3.2</b>	Capteur solaire thermique.....	<b>45</b>
<b>2.3.2.1</b>	Différents types des Capteur solaire thermique.....	<b>46</b>

---

2.3.2.1.1	Capteur a tubes.....	47
2.3.2.1.2	Capteur plan.....	47
2.3.2.2	Composants d'un système solaire thermique plan.....	48
A	La couverture transparente.....	48
B	L'absorbeur.....	49
C	Le coffre ou le cadre.....	51
D	Le fluide caloporteur.....	51
E	La lame d'aire.....	52
F	Isolation thermique.....	52
2.3.2.3	Transfert de chaleur.....	52
2.3.2.3.1	Transfert par conduction.....	52
2.3.2.3.2	Transfert par convection.....	52
2.3.2.3.3	Transfert par rayonnement.....	53
2.4	Conclusion.....	53

---

# Chapitre 2

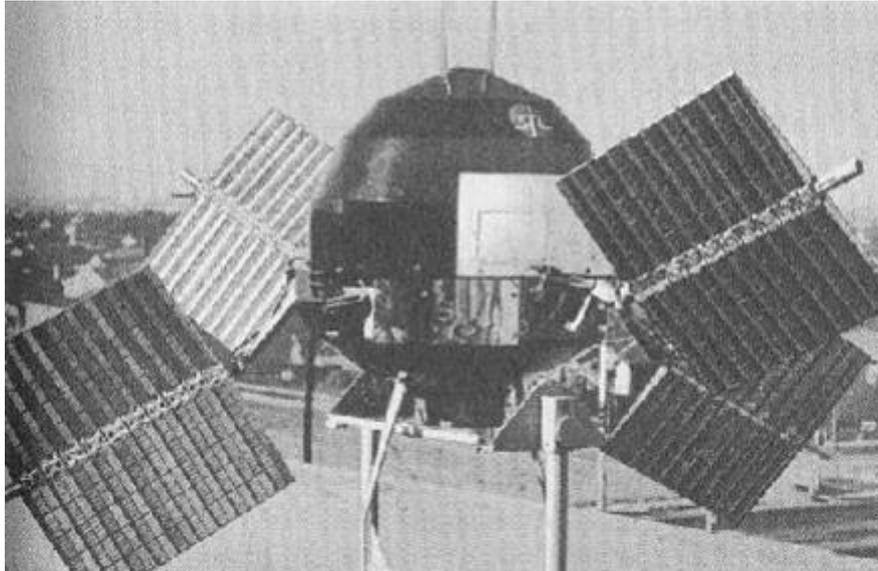
## 2.1 Introduction

Les panneaux photovoltaïques sont les éléments de base des systèmes de transformation de l'énergie solaire en électricité. Ils ont une caractéristique électrique de nature non linéaire et possèdent un point de puissance maximale (PPM) donné. Cependant, les capteurs solaires thermiques transforment l'énergie solaire en énergie thermique pour chauffer l'eau [28].

Dans ce chapitre, nous parlerons des panneaux solaires photovoltaïques et les capteurs solaires thermiques ainsi que leurs principes , conceptions et technologies.

## 2.2 Historique

Dans les temps anciens, les gens ont depuis longtemps découvert que l'énergie solaire pouvait être concentrée pour obtenir une température élevée. L'exploitation de l'effet de serre a été proposée au XVIIIe siècle par le physicien genevois Horace Benoît de Saussure (1757-1830), qui a été le premier à décrire le concept de vitrification qui est placé au-dessus d'un absorbeur et la vitrification elle-même dans un incubateur au-dessus le concept du collecteur Plan est encore utilisé aujourd'hui [26]. La conversion de la lumière en électricité s'appelle l'effet photoélectrique et a été découverte par le physicien français Antoine César Becquerel en 1839 (en faisant briller la lumière sur une électrode d'argent dans un électrolyte, un potentiel électrique est obtenu). En 1875, le physicien Werner von Siemens a soumis un article sur l'effet photoélectrique dans les semi-conducteurs à l'Académie des sciences de Berlin. La première cellule solaire utilisable a été fabriquée par Charles Fritts en 1883, mais les cellules étaient trop inefficaces pour être utilisées à l'époque [31]. Cependant, le phénomène était encore considéré comme anecdotique jusqu'à la Seconde Guerre mondiale. Les premières vraies cellules sont apparues en 1930 et comprenaient des cellules à l'oxyde de cuivre puis au sélénium. La recherche a amélioré leurs performances et leur échelle ce n'est qu'en 1954, lorsque trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, ont mis au point des cellules photovoltaïques au silicium aux Bell Telephone Laboratories, que nous avons vu la possibilité d'utiliser ces cellules pour produire de l'énergie [31].



*Figure 2.1 : le premier satellite scientifique américain explorer 6 lancé en aout 1959 [31]*

## **2.3 L'énergie solaire**

Comme nous avons mentionné dans le premier chapitre, l'énergie solaire se divise en trois parties à savoir : l'énergie solaire photovoltaïque, l'énergie solaire thermique ainsi que l'énergie thermodynamique basée sur les concentrateurs solaires. Dans cette partie nous allons nous focaliser sur l'énergie solaire photovoltaïque ainsi que l'énergie solaire thermique qui concernent directement notre projet de fin d'études.

### **2.3.1 Panneau solaire photovoltaïque**

L'énergie solaire est convertie directement en électricité à l'aide de capteurs photovoltaïques. Cette technologie utilise des matériaux photosensibles. Ces matériaux sont généralement des semi-conducteurs Silicium amorphe, silicium cristallin, etc. Ils ont des propriétés qui vous permettent de : Il émet des électrons lorsqu'il est exposé à une source d'énergie externe. Rayons de lumière, Lorsqu'ils entrent en collision avec ce matériau, ils libèrent des électrons qui induisent un courant électrique continu. L'énergie générée peut être utilisée directement à des fins locales ou transportée sur le réseau [32].

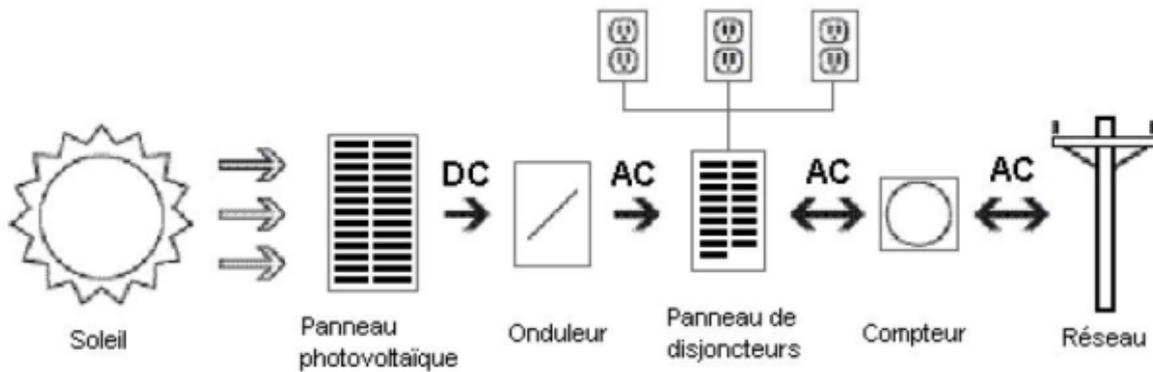


Figure 2.2 : schéma d'un système de production d'électricité à l'aide de panneau photovoltaïque [32]

### 2.3.1.1 L'effet photovoltaïque

Une cellule solaire cristalline est composée d'une jonction p-n, fabriquée par fusion, dopage, métallisation et texturation. Cette jonction génère une tension continue, produisant de l'électricité lorsqu'elle est connectée à une charge. Cependant, la tension d'une cellule à jonction p-n est généralement inférieure à 1 V, ce qui est insuffisant pour de nombreuses applications pratiques [36]. Une cellule solaire est composée d'une jonction pn éclairée. Lorsque la partie **n** est exposée à la lumière, les électrons majoritaires du côté n se diffusent vers le côté p, qui est minoritaire, laissant des atomes donneurs ionisés positivement. La majorité des trous du côté **p** se diffusent vers le côté **n** où ils se trouvent, tandis qu'une minorité laisse derrière elle des atomes accepteurs ionisés négativement. Cette différence de charges électriques crée un champ électrique qui génère un courant électrique dans la cellule solaire [37].

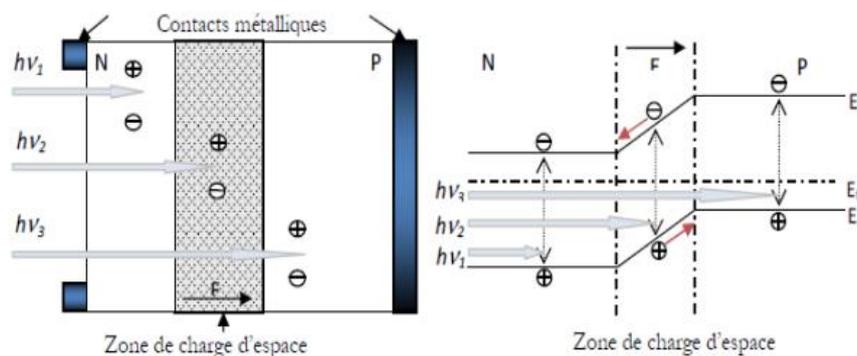


Figure 2.3 : structure et diagramme de bandes pour une jonction p-n sous illumination [37]

### 2.3.1.2 Les différents génération de technologie des cellules solaires photovoltaïques

## A. Première génération : Cellule cristalline

La première génération de technologie photovoltaïque était basée sur le silicium, l'un des matériaux les plus abondants sur Terre. Parce que le matériau a une bande interdite de 1,1 eV, ils ont pu exploiter l'énergie solaire [38] [39]. Ces cellules sont généralement constituées de silicium et n'ont qu'une jonction **p-n**. La technologie de fabrication de ces cellules repose sur la production de « wafers » à partir de silicium très pur, mais reste très énergivore et coûteuse. La limite de rendement théorique pour de telles cellules est de  $\pm 27\%$ . Les nouvelles batteries se rapprochent de plus en plus de cette limite chaque année. Il existe deux types de cellules cristallines [38] [39] et [51].

### A.1 Cellule polycristallin

Les cellules solaires polycristallines ont des coins carrés, ce qui signifie qu'elles peuvent couvrir une plus grande partie de la surface du module avec un matériau de cellule, ce qui augmente l'efficacité et compense la température plus basse. Ces cellules ont souvent un aspect bleu marbré. Leur numéro de modèle contient généralement un "P" pour indiquer qu'il s'agit d'une unité polycristalline [39].



*Figure 2.4 : Cellules polycristallines [39]*

Le silicium est désigné par l'élément chimique Si et ne se trouve pas dans la nature sous forme pure. Par conséquent, le silicium (Si) est extrait du dioxyde de silicium (SiO<sub>2</sub>) en utilisant la réaction chimique simplifiée suivante :  $\text{SiO}_2 + 2\text{C} \rightarrow \text{Si} + \text{CO}$ . Le silicium liquide est placé dans un creuset en graphite. La technologie est simple et économe en énergie. Le silicium polycristallin est obtenu par coulée en lingotière et refroidissement lent pendant une dizaine

d'heures. Le résultat final est un lingot cubique (obtenues par découpage en lamelles des lingots de silicium). Cette forme a été recherchée pour optimiser l'espace lors du rembourrage. Seront placées en série sur le module PV [40]. Le rendement 16-18 % (On obtient ainsi une puissance de 160 à 180 Wc (et même plus) par m<sup>2</sup>). Ces cellules restent les plus utilisées car elles présentent un meilleur rapport performance/prix que les cellules monocristallines [51].

## A.2 Cellule monocristallin

Les cellules solaires monocristallines ont généralement un rendement légèrement supérieur, ce qui peut parfois se traduire par des modules un peu plus petits pour une puissance équivalente. En raison des processus de fabrication, les coins de ces cellules sont généralement inclinés. Elles ont également une couleur foncée constante. Bien que leur coût historique ait été plus élevé, les prix sont aujourd'hui comparables [39].



*Figure 2.5 : Cellules monocristallines [39]*

La production de tranches de silicium implique plusieurs étapes, de la conversion du silicium pur en granulés à la production de silicium monocristallin. Le processus comprend l'injection de silane dans une enceinte chauffée, le dépôt de silicium sur des plaques de verre, la présence d'hydrogène pour maintenir la qualité du matériau et enfin le découpage des plaques en tranches minces pour produire des wafers [41]. La méthode de Czochralski est utilisée pour produire du silicium monocristallin. Le silicium est fondu dans un creuset en quartz et une graine monocristalline est immergée dans le liquide. Le silicium se solidifie en un lingot monocristallin de forme ronde. La température et la vitesse sont surveillées avec soin et les graines sont lentement retirées vers le haut. Le silicium monocristallin a un rendement supérieur à celui du

silicium polycristallin dans la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique, mais sa production consomme plus d'énergie [40].

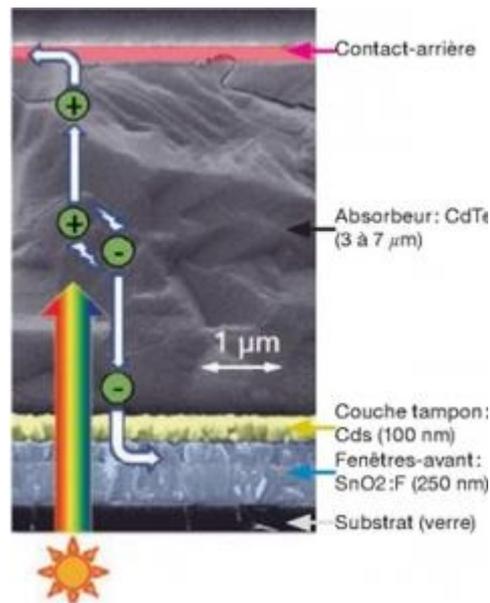
Le rendement 17-20 % (On obtient ainsi une puissance de 170 à 200 Wc (et même plus) par m<sup>2</sup>) [51].

## **B. Deuxième génération : Cellule en couches minces**

Les cellules solaires à couches minces, souvent appelées cellules de deuxième génération, combinent différentes technologies telles que le silicium amorphe, le tellure de cadmium (CdTe) et un alliage Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> (di-séléniure de cuivre, d'indium et de gallium) noté CIGSe. Ces technologies permettent aux cellules photovoltaïques d'atteindre des rendements records de 16,3 %, 17,3 % et 20,3 %, respectivement [39]. Les avantages de ces techniques sont une faible consommation de matière et l'utilisation de procédés de fabrication compatibles avec de grandes surfaces sur différents types de substrats, qu'ils soient souples ou rigides. En effet, ces matériaux sont plus absorbants que le silicium cristallin (coefficient d'absorption 100 fois supérieur), il ne faut donc que quelques micromètres d'épaisseur (le silicium cristallin fait environ 200 μm d'épaisseur) pour absorber tous les photons d'énergies supérieures à la bande interdite [42].

### **B.1 Filière CdTe**

La technologie CdTe s'est développée rapidement, bénéficiant de sa compétitivité en termes de coût, d'efficacité de conversion et de procédé de fabrication. CdTe est actuellement la principale technologie à couches minces de l'industrie photovoltaïque, avec des rendements de modules commerciaux pouvant atteindre 12,6 %. CdTe a une bande interdite directe de 1,45 eV, ce qui est bien adapté au spectre solaire. Des techniques de dépôt simples et adaptées ont été développées pour parvenir à une production à faible coût, telles que la sublimation ou l'électrodéposition [42]. Dans cette technique (Figure 2.6), une couche de sulfure de cadmium (CdS) de type n est d'abord déposée sur un substrat en verre dopé à l'oxyde d'étain (SnO<sub>2</sub>), suivie d'une couche de CdTe de type p (environ 3 à 7 microns d'épaisseur). ), et enfin une couche conductrice en carbone ou antimoine de tellure dopé au cuivre comme contact arrière. Un substrat en verre revêtu de SnO<sub>2</sub> dopé à l'oxyde d'étain agit à la fois comme un contact et une fenêtre frontale, laissant passer un maximum de lumière avant d'être absorbé par la couche absorbante CdTe. Le dépôt de CdTe est généralement réalisé par sublimation sous vide à partir d'une source chauffée à 600-700°C, ce qui permet des vitesses de dépôt de quelques microns par minute, tandis que le substrat de verre est maintenu à une température d'environ 500°C [42].



*Figure 2.6 : Schéma d'une cellule solaire de type Verre/SnO<sub>2</sub> : F/CdS/CdTe/contact arrière [42]*

## B.2 Filière CIGSe

La technologie CIGSe présente le potentiel le plus élevé en termes de rendement parmi les technologies de couches minces, avec des rendements de module allant de 11 % à 14 %, se rapprochant ainsi du poly silicium. La (figure 2.7) illustre la structure de base des cellules CIGSe. L'empilement des couches débute par le dépôt du contact arrière métallique en molybdène sur du verre par pulvérisation cathodique [42].

Ensuite, une couche de CIGSe d'environ 2 microns est déposée par co-évaporation sous ultra-vide à des températures de substrat d'environ 550 °C. La substitution de l'indium (In) par du gallium (Ga) permet de faire varier la largeur de la bande interdite entre 1 eV et 1,7 eV, la composition la plus efficace atteignant une valeur de 1,15 eV [42]. Par la suite, une couche interfaciale d'environ 50 nanomètres de sulfure de cadmium (CdS) ou progressivement de sulfure de zinc de type n (ZnS), également appelée « couche tampon », est déposée par dépôt en solution chimique. Cette couche permet d'ajuster l'interface entre les couches de CIGSe et de ZnO (oxyde de zinc) non dopé (i-ZnO) ainsi que les couches conductrices transparentes d'oxyde de zinc de type n dopé à l'aluminium (ZnO:Al). Il est ensuite déposé par pulvérisation afin d'assurer un contact frontal tout en laissant passer un maximum de lumière avant d'être absorbé par le CIGSe [41] [43].

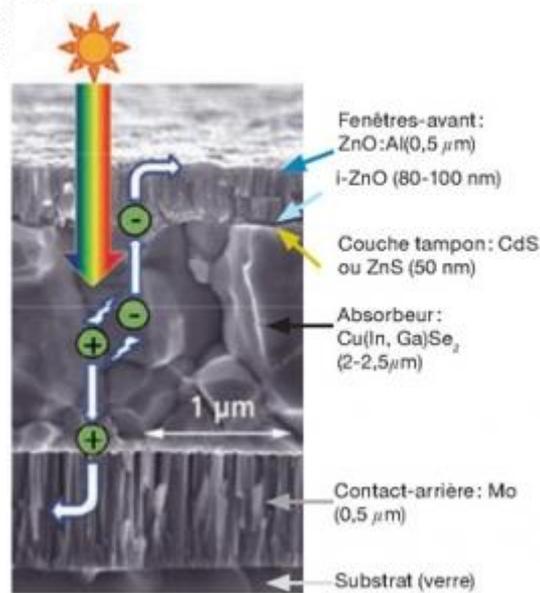


Figure 2.7 : Schéma d'une cellule solaire de type Verre/Mo/Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub>/CdS/i-ZnO/ZnO : Al [42]

### B.3 Le silicium amorphe hydrogéné

Le silicium amorphe présente une structure atomique désordonnée amorphe et vitreuse. Son coefficient d'absorption lumineuse est environ 1000 fois supérieur à celui du silicium cristallin. Une fine couche de 0,0003 mm d'épaisseur est suffisante car elle absorbe la majeure partie du spectre visible. Le silicium est formé à partir de gaz silane (SiH<sub>4</sub>) directement sur la plaque de verre [44].

C'est actuellement le semi-conducteur de référence pour les gros appareils électroniques. En effet, grâce au procédé plasma basse température (200°C), il peut être déposé uniformément sur de grandes surfaces (~6 m<sup>2</sup>) et sur différents types de substrats. De plus, il offre les avantages d'abondance, de non-toxicité et de dopage facile de type p ou n en ajoutant de la phosphine ou du diborane lors du dépôt [42]. Malgré la nature amorphe (hétérogène) du matériau, percées industrielles ont été réalisées dans l'énergie solaire et les écrans plats à matrice active. Cependant, cette nature amorphe affecte ses propriétés électroniques. Par exemple, la mobilité électronique dans le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) n'est que d'environ 1 cm<sup>2</sup>/V.s, alors que celle dans le silicium cristallin (c-Si) dépasse 1000 cm<sup>2</sup>/V.s. De plus, ces propriétés sont métastables, c'est-à-dire qu'elles se dégradent sous l'effet de la lumière mais peuvent être restaurées par un recuit à 180°C.

Cet inconvénient peut être évité en créant une jonction "PIN", où une fine couche intrinsèque (i) (non dopée) d'une épaisseur de 0,2 µm est insérée entre deux couches ultrafines dopées p et n (~10 nm) [42].

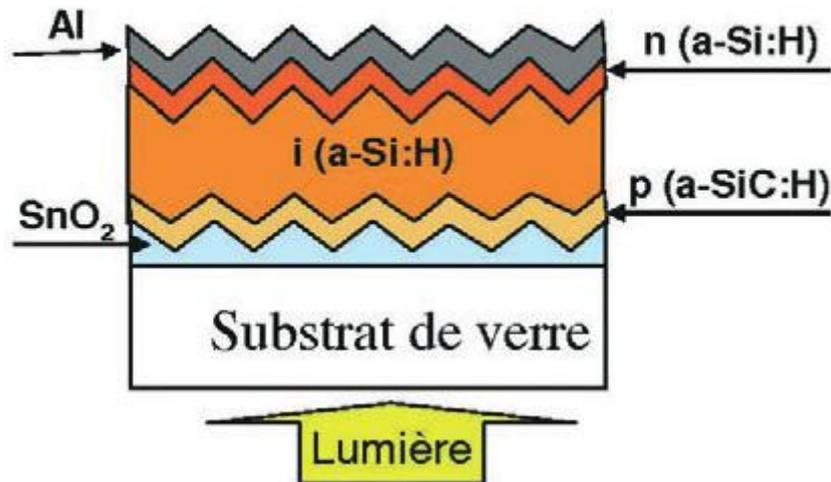


Figure 2.8 : Schéma de base d'une cellule p-i-n en silicium amorphe hydrogéné [42]

### C. Troisième génération

Les cellules solaires de troisième génération sont capables de dépasser la puissance maximale de 31 à 41 % par rapport aux cellules solaires à bande interdite unique. Il s'agit notamment des différentes variantes de cellules de première et de deuxième génération [45].

Il existe de nombreuses cellules solaires de troisième génération, notamment :

#### C.1 Cellule pérovskite

Des progrès significatifs ont été réalisés dans la conception des cellules solaires en pérovskite. Un nouveau procédé de fabrication est utilisé. Cependant, la technologie d'impression révolutionne l'industrie photovoltaïque avec de nombreux avantages tels que : elle implique une adaptation facile aux conditions environnementales et une flexibilité dans le choix des matériaux [46].

Les structures multicouches représentent une configuration standard pour les cellules photovoltaïques à base de pérovskite. Il représente un empilement de plusieurs couches minces. Cette configuration offre un choix d'épaisseurs plus large par rapport à la configuration bicouche, où l'épaisseur de la couche active est plus fine (30-50 nm) pour éviter les courts-circuits.

La structure de la cellule pérovskite étudiée consiste en une couche active placée entre une couche donneuse (D) et une couche acceptrice (A), où le donneur (D) représente la couche p et l'accepteur (A) représente la couche n, le composant est placé entre les deux électrodes, comme le montre la figure 2.9 [46].



Figure 2.9 : Configuration multicouche [46]

### C.2 Cellule de Graetzel

La cellule de Gretzel a été mise au jour en 1991 par Michael Gretzel, un chimiste suisse et professeur à l'École polytechnique de Lausanne. Le défi général de ces cellules est d'augmenter l'efficacité en gardant les mêmes composants et en n'ajoutant pas d'autres éléments tels que les terres rares qui sont nocifs pour l'environnement, et leur production est très bon marché et propre pour l'environnement. Leurs cellules Grätzel peuvent fournir des rendements allant jusqu'à 11 % [47].

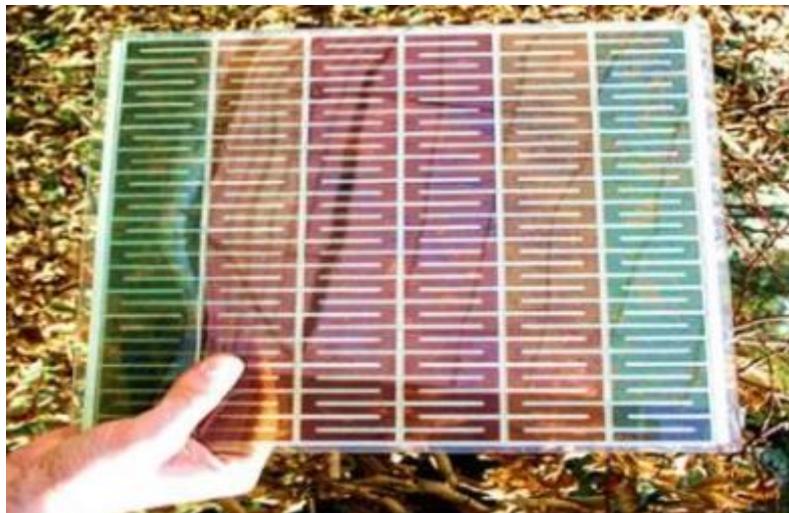


Figure 2.10 : Solar cell GRÄTZEL (<https://finance.yahoo.com/news/2010-06-10-michael-gratzel-inventor-of-the-dye-sensitized-solar-cell->)

### C.3 Cellule de multi Junction

L'utilisation d'un système avec des cellules MJ permet de dépasser la quantité d'énergie solaire imposée par la limite thermique aux cellules de première génération. Chaque sous-cellule du MJ absorbe une gamme de longueurs d'onde résultant en une utilisation maximale du spectre solaire. Les alliages des groupes 3 et 5 du tableau périodique sont un bon choix pour fabriquer

des cellules MJ grâce à leurs bandes interdites couvrant une large gamme spectrale et la plupart des bandes interdites impliquant directement un coefficient d'absorption élevé [48].

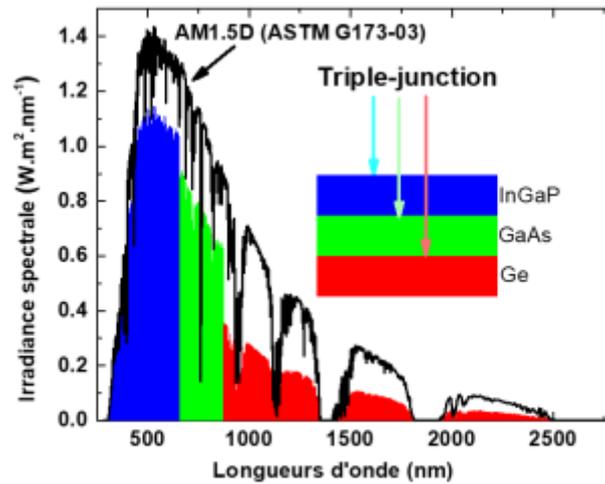


Figure 2.11 : Évolution d'irradiance spectrale par une cellule MJ [48]

### 2.3.1.3 La conception d'un module photovoltaïque

Un panneau ou module photovoltaïque est composé de plusieurs éléments appelés cellules solaires connectés en série pour convertir l'énergie solaire directement en électricité. Les éléments des cellules solaires génèrent une tension assez basse : 0,5 à 1,5 V. Ils sont connectés en série pour pouvoir produire suffisamment de tension pour charger la batterie [49].

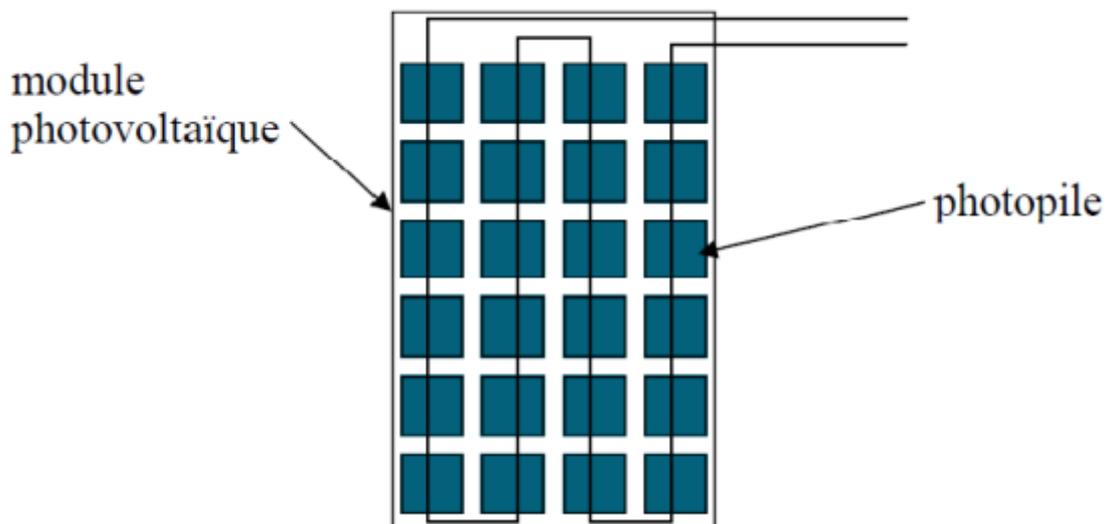


Figure 2.12 : Conception d'un module photovoltaïque [49]

### 2.3.1.3.1 Caractéristiques des panneaux solaires

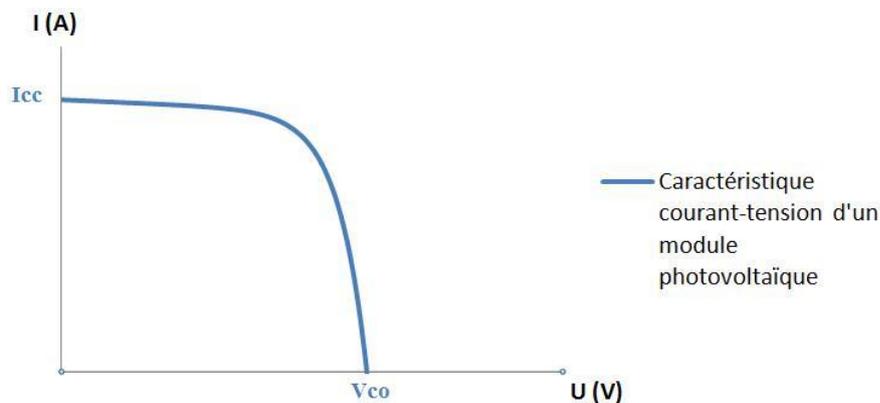
La puissance d'un panneau solaire photovoltaïque s'exprime en "Watt Peak" avec le symbole  $W_c$  ou en anglais "Watt Peak"  $W_p$ . Il s'agit de la puissance instantanée délivrée par le panneau dans les conditions STC (Standard Test Conditions) [59], c'est-à-dire :

- o Un ensoleillement instantané de  $1000 \text{ W/m}^2$  (ensoleillement maximal)
- o Une température du panneau de  $25^\circ\text{C}$
- o Un coefficient Air-Masse de 1,5

Ainsi, dans des conditions STC, un panneau solaire photovoltaïque de  $300 \text{ W}_c$  fournit une puissance instantanée de  $300 \text{ W}$ . Lorsque le rayonnement solaire est moins important (par exemple lorsqu'il y a des nuages), la puissance de sortie instantanée de ce panneau est inférieure à  $300 \text{ W}$  [59].

Le graphique suivant illustre l'évolution typique d'une courbe courant-tension d'un module solaire photovoltaïque, où :

- **$U_{co}$  est la tension de circuit ouvert**, c'est-à-dire celui mesuré aux bornes du panneau lorsqu'il est exposé à un ensoleillement, mais sans production de courant ( $I=0\text{A}$ )
- **$I_{cc}$  est la tension de court-circuit** dont la mesure peut être approchée en connectant un ampèremètre aux bornes exposées à la lumière (on approche alors le court-circuit avec la très faible résistance de l'ampèremètre) [59].



**Figure 2.13 :** Caractéristique Courant-Tension d'un module photovoltaïque

A partir de cette courbe, et en utilisant la formule  $P = U \times I$ , une courbe de puissance peut être tracée afin de trouver le couple courant/tension qui donne la puissance maximale (appelée  $P_{mpp}$ ), où  $mpp$  signifie "Maximum Power Point" [59].

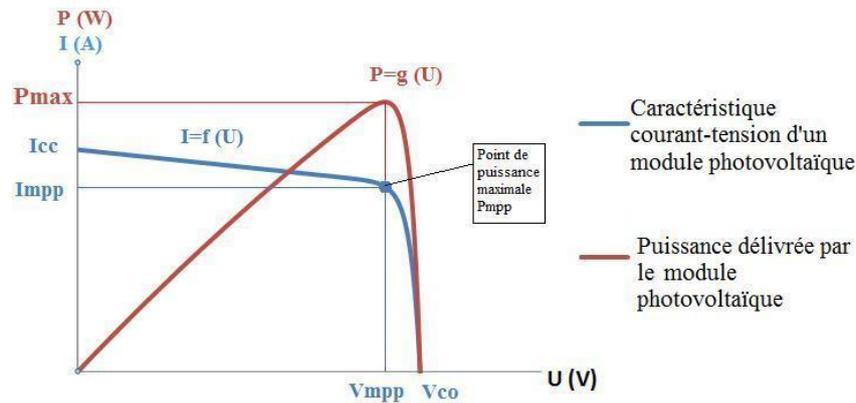


Figure 2.14 : Caractéristiques Courant-Tension et puissance d'une cellule solaire

Cette puissance maximale ( $P_{mpp}$ ) est obtenue par les couples  $U_{mpp}$  et  $I_{mpp}$ , donc  $P_{mpp} = U_{mpp} \times I_{mpp}$ .

L'un des rôles de l'onduleur ou du micro-onduleur est **de s'assurer que cette  $P_{mpp}$**  est atteinte grâce à la fonction MPPT (Maximum Power Point Tracker) : c'est ce qu'on appelle la régulation MPPT [59].

### 2.3.1.3.2 Influence de l'éclairement

La luminosité a un impact majeur sur les performances des cellules.

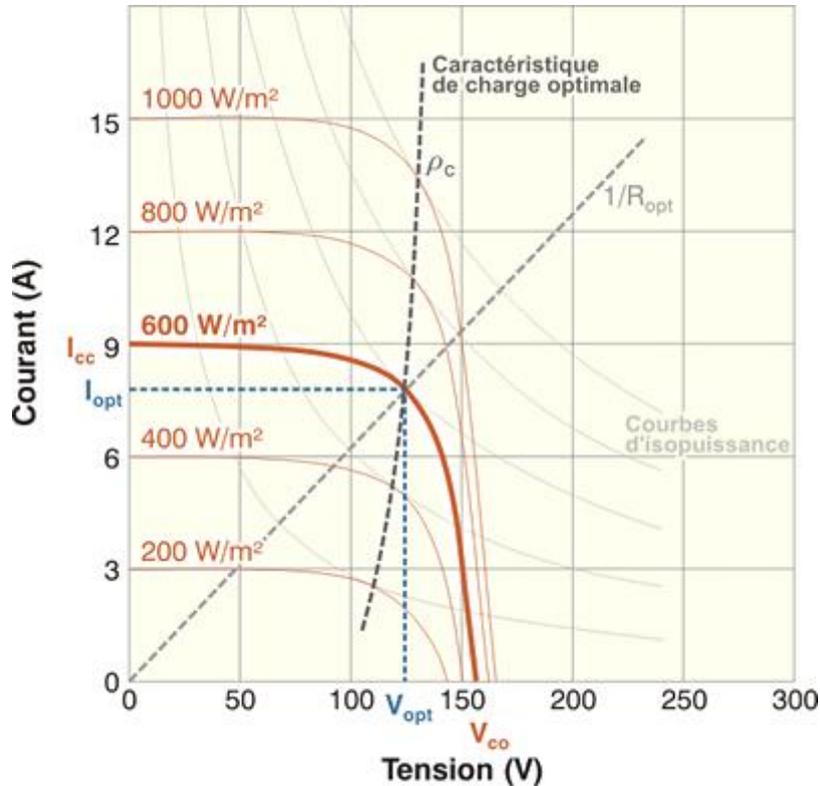


Figure 2.15 : Caractéristique courant-tension pour différentes valeurs du rayonnement

Comme on peut le voir sur ce graphique, le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) augmente proportionnellement à l'éclairement, tandis que la tension à vide ( $V_{co}$ ) varie très peu (de l'ordre de 0,5 V).

Par conséquent, plus le nuage est nuageux, plus le courant produit est faible.

### 2.3.1.3.3 Influence de la température

La température a une influence considérable sur le comportement de la batterie et son efficacité. Cet effet se traduit principalement par une diminution de la tension résultante (et une légère augmentation du courant).

Selon le modèle, ce comportement entraîne une perte d'efficacité de 0,5 % pour chaque degré d'augmentation par rapport à l'efficacité maximale de la cellule.

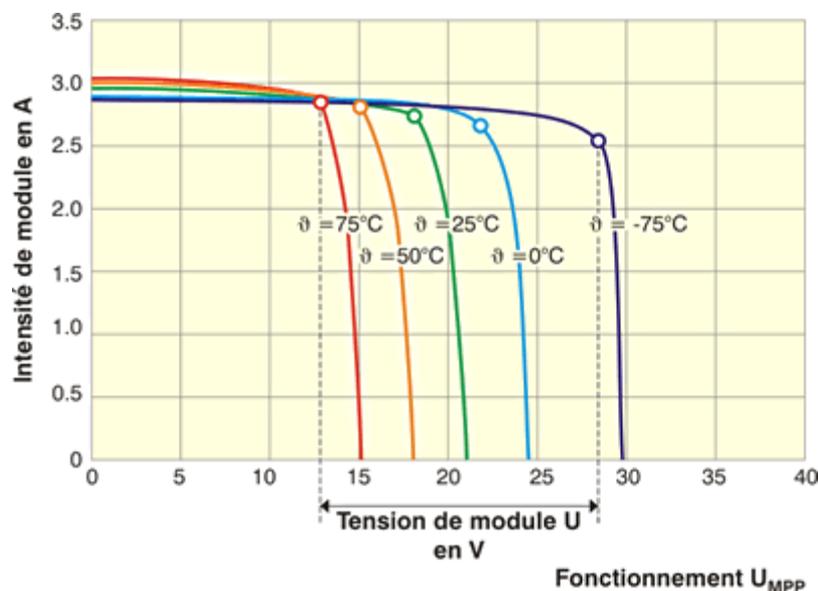


Figure 2.16 : Caractéristique courant-tension pour différentes valeurs de la température

### 2.3.2 Capteur solaire thermique

Un capteur solaire est un dispositif qui capte l'énergie transmise par le rayonnement solaire, la convertit en énergie thermique et la transmet à un fluide caloporteur. Il combine deux principes physiques : l'effet de serre et l'effet de corps noir.

- **Effet corps noir** : les corps noirs absorbent la chaleur du soleil
- **Effet de serre** : les fenêtres piègent la lumière infrarouge, empêchant la chaleur de s'échapper. La circulation de l'eau ou du liquide de refroidissement peut être réalisée par des principes physiques de thermosiphon ou en utilisant des pompes.

• **Principe du thermosiphon** : Le thermosiphon est un système de circulation de fluide (gaz ou liquide) développé par Jean-Simon Bonnemain au 18ème siècle basé sur la dilatation et la contraction thermiques et la poussée d'Archimède. Il s'agit d'un système de chauffage qui assure la circulation de l'eau grâce aux différences de température [https://fr.wikipedia.org/wiki/Thermosiphon].

Les capteurs plans peuvent fournir des températures de 30°C à 150°C, ne nécessitant ni concentration du rayonnement incident ni suivi du soleil. La raison de la température relativement basse des capteurs plans est la réémission de rayonnement du récepteur et la perte de chaleur à la périphérie du capteur. La fonction d'un capteur solaire thermique est de convertir le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie thermique utilisable, le plus souvent via un fluide caloporteur (eau, air, etc.) [30] [33].

Sa performance:

- L'irradiation est importante : s'adapter au sens et à l'inclinaison d'utilisation.
- Il fonctionne avec un faible écart température sonde/température ambiante.

Les capteurs solaires peuvent être utilisés pour le chauffage : émetteurs de grande surface : chauffage au sol, chauffage mural, radiateurs BT [30] [34].

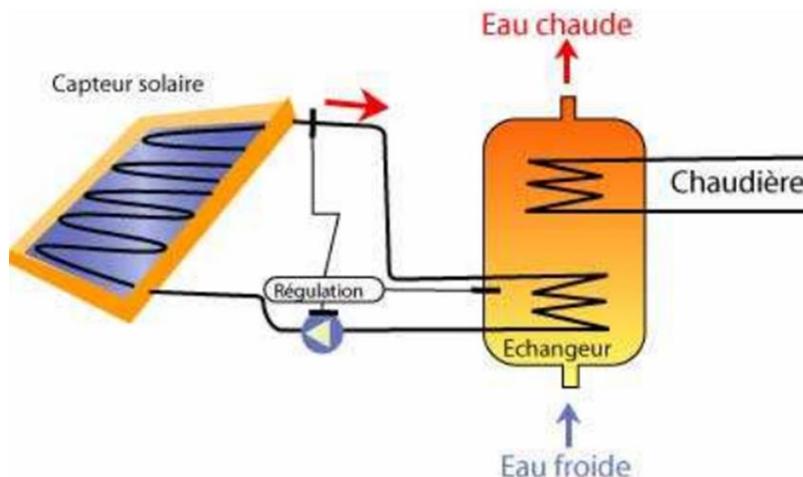


Figure 2.17 : Chauffe-eau solaire [34]

### 2.3.2.1 Différents types des Capteur solaire thermique

Il existe différents types (capteurs sans verre, capteurs en verre, capteurs sous vide) dont les plus courants sont les capteurs solaires plats en verre avec des températures de sortie du fluide

caloporteur jusqu'à 100°C [50]. Dans cette partie, nous nous concentrons sur les capteurs solaires sous vide et les capteurs solaires à panneaux plats en verre.

### A. Capteur solaire à tube

Il se compose d'une série de tubes transparents placés sous vide pour isoler l'absorbant. Un vide est fait à l'intérieur de ces tubes pour réduire les pertes de chaleur par convection thermique et conductivité thermique. La qualité du vide joue un rôle crucial dans la limitation du transfert de chaleur [54]. Comparés aux capteurs classiques, ce type de capteurs réagit plus rapidement, se réchauffe plus rapidement, ce qui permet de mieux utiliser les périodes d'ensoleillement plus courtes, ainsi que l'éclairage matinal et du soir. Les températures des capteurs à tubes sous vide atteignent une valeur élevée supérieure à 150 degrés Celsius, c'est pourquoi un fluide caloporteur est utilisé pour ce type d'installation. L'efficacité est plus élevée par rapport aux capteurs en verre plat en raison de moins de pertes [54].



*Figure 2.18 : Capteur à tubes sous vide [54]*

### B. Capteur solaire plan

Les capteurs solaires plans en verre sont le type de capteur solaire le plus courant. Il capte l'énergie thermique du soleil grâce à l'effet de serre. Les capteurs solaires plans en verre sont généralement constitués d'un cadre en forme de caisson, d'un isolant en partie basse, d'un absorbeur noir constitué de tubes de cuivre dans lesquels circule le fluide caloporteur, et de fenêtres [30].

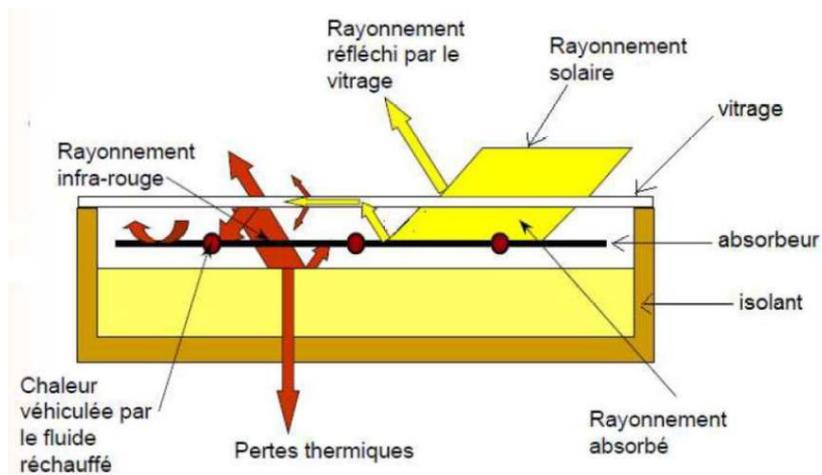


Figure 2.19 : Schéma de principe d'un capteur plan vitré [50]

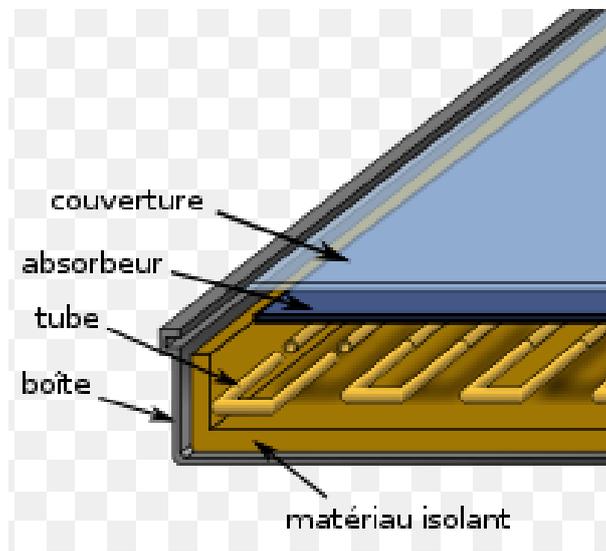


Figure 2.20 : Le contenu des capteurs solaire thermique (<https://www.ecosources.org/panneau-solaire-hybride>)

### 2.3.2.2 Les composants d'un capteur solaire thermique plan

#### A. La couverture transparente

C'est une surface faite constituée de matériaux transparents aux rayonnements visibles mais opaques aux rayonnements infrarouges et ultraviolets, ce qui permet l'effet de serre. Les couvercles transparents courants sont principalement constitués de verre ordinaire ou traité qui laisse passer jusqu'à 95 % de la lumière en raison de la faible teneur en oxyde de fer, mais vous pouvez également trouver des produits synthétiques [52]. L'utilisation d'un couvercle transparent pour le capteur augmente son efficacité et assure des températures supérieures à 70°C, réduit les pertes de chaleur devant l'absorbeur en créant un effet de serre, en effet le rayonnement solaire est constitué de 42% de rayonnement visible qui sera transmis à l'absorbeur, lorsqu'il est chauffé, l'absorbeur réémettra un rayonnement infrarouge, tandis que le verre a une transmittance plus faible [52].



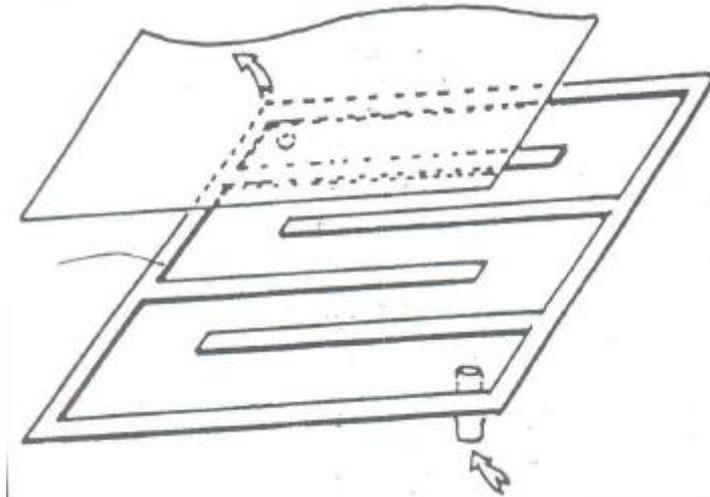


Figure 2.22 : absorbeur film d'eau [50]

- **S-Tubes** : L'absorbeur est constitué d'une plaque métallique avec des tubes en forme de S dans lesquels circule le fluide caloporteur . L'inconvénient de ce type d'absorbeur est la répartition inégale de la température du liquide.

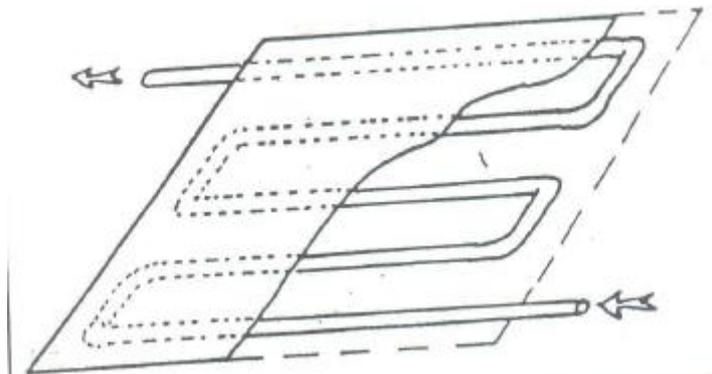


Figure 2.23 : Absorbeur tube S [50]

- **Absorbeur à tubes parallèles installé à Tickelman** : C'est la technique la plus couramment utilisée. Elle consiste à souder une série de tubes parallèles sur une plaque métallique à une distance constante fixe. Ces tubes sont reliés par deux collecteurs en haut et en bas. L'entrée du fluide caloporteur est située à l'opposé de la sortie de l'autre côté pour assurer le même débit dans chaque tube.

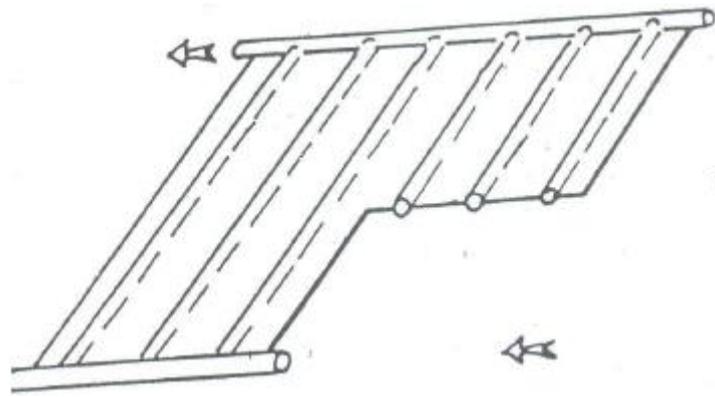


Figure 2.24 : Absorbeur montage Tickelman [50]

- **Absorbeurs « en échelle »** : Les absorbeurs « en échelle » ont gagné une part importante. Une pluralité de tuyaux sont connectés en parallèle, et le tuyau d'écoulement et le tuyau de retour sont connectés et combinés pour former une échelle. C'est le type d'absorbeur utilisé dans les systèmes à thermosiphon.

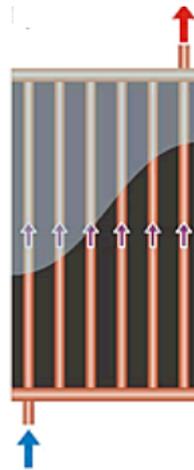


Figure 2.25 : Les absorbeurs type « échelle » [https://energieplus-lesite.be]

### C. La cadre ou le coffré

Il doit assurer une protection efficace contre les éléments atmosphériques. Il est fait de fibre de verre stratifiée ou de tôles minces (acier galvanisé, aluminium et acier inoxydable) avec un revêtement protecteur [50].

### D. Le fluide caloporteur

Dissiper globalement la chaleur emmagasinée dans la surface absorbante De l'air, de l'eau et, dans certaines conditions, un mélange d'eau et de glycol sont également utilisés. Dans les conditions climatiques, la chaleur spécifique de ces mélanges est inférieure à celle de l'eau pure. Depuis Contrairement à l'eau, elle peut geler en hiver ou bouillir en été [55].

### **E. La lame d'air**

L'épaisseur de la couche d'air affecte l'échange convectif entre l'absorbeur et le verre. En général, pour des entrefers compris entre 2,5 et 4 cm, le facteur d'échange ne change pas. Dans les couches inférieures de l'air, la chaleur n'est transférée que par conduction, puisque l'air est au repos, augmentant ainsi le coefficient d'échange. Une épaisseur supérieure à 4 cm entraîne une augmentation du mouvement convectif et peu d'amélioration du coefficient d'échange [50].

### **F. Isolation thermique**

La résistance thermique peut être augmentée pour minimiser la perte de chaleur en utilisant l'isolation. Tout simplement parce qu'il peut y avoir contact entre deux surfaces en cas de forte rugosité. Un film d'air qui rend difficile le transfert de chaleur par conduction [52].

#### **2.3.2.3 Transfert de chaleur**

Le transfert de chaleur, devrait-on l'appeler transfert de chaleur ou transfert de chaleur, est le processus de transfert d'énergie thermique d'un système à un autre en raison des différences de température. Il existe 3 types de transfert de chaleur [56].

##### **2.3.2.3.1 Transfert par convection**

Ce transfert d'énergie accompagne le mouvement des molécules dans un gaz ou un liquide. La convection libre implique un échange de chaleur et est responsable du mouvement. C'est le transfert thermique qui entraîne le mouvement, par exemple un radiateur électrique sans ventilateur fera diffuser de l'air chaud naturellement [57]. En revanche, on parle de convection forcée lorsque le mouvement des molécules est induit par un système mécanique en direction de la source de chaleur. Dans ce cas, le mouvement facilite le transfert thermique. Ce même principe est observé dans les radiateurs à circulation d'eau ou d'air [57].

##### **2.3.2.3.2 Transfert par conduction**

Le transfert par conduction est l'échange d'énergie qui se produit lors du contact. Dans un liquide ou un gaz, l'énergie est transmise par contact direct entre les molécules à l'échelle microscopique en raison de collisions aléatoires. Dans les solides, la conduction thermique est obtenue par la conduction des électrons et des phonons, qui sont des vibrations du réseau cristallin [57]. Ces phonons interagissent avec les électrons libres, c'est pourquoi la conductivité thermique et électrique sont liées. C'est pourquoi certains métaux comme le cuivre, l'argent, l'aluminium et l'acier inoxydable sont de bons conducteurs d'électricité et de chaleur. La conduction thermique est le transfert spontané de chaleur d'une zone chaude vers une zone

froide. Selon la loi de Fourier, le flux de chaleur est proportionnel au gradient de température [57].

### **2.3.2.3.3 Transfert par rayonnement**

Cette transmission s'effectue via un rayonnement électromagnétique, tel que la lumière infrarouge, et peut avoir lieu dans le vide sans matière. Un exemple typique est le rayonnement solaire dans l'espace [57] [58].

Le récepteur réfléchit certaines longueurs d'onde et seules les longueurs d'onde absorbées contribuent à son équilibre thermique. Si le récepteur est un corps noir, il absorbe tout le rayonnement électromagnétique sans le réfléchir ni le retransmettre, ce qui signifie que tout rayonnement contribue à son équilibre thermique [57] [58].

## **2.4 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les panneaux photovoltaïques (PV), les cellules solaires, leurs principes de fonctionnement ainsi que ses différentes générations. On outre, nous avons présenté les capteurs solaires thermiques (T) ; leurs principes de fonctionnement ainsi que leurs conceptions. Cela nous permettra de bien maîtriser le principe de fonctionnement des systèmes hybrides (PV/T), et ce dans le chapitre suivant.

# Chapitre 3

## Système hybride photovoltaïque / thermique

### Sommaire

<b>3.1</b>	Introduction.....	<b>57</b>
<b>3.2</b>	Le concept de system hybride photovoltaïque-thermique.....	<b>57</b>
<b>3.3</b>	Les composants constituant le système hybride (PV/T).....	<b>58</b>
<b>3.3.1</b>	Absorbeur d'aluminium.....	<b>59</b>
<b>3.3.2</b>	Absorbeur de cuivre.....	<b>60</b>
<b>3.3.3</b>	Isolation.....	<b>61</b>
<b>3.3.3.1</b>	Laine de verre.....	<b>61</b>
<b>3.3.3.2</b>	Alucobond.....	<b>62</b>
<b>3.3.4</b>	Pompe.....	<b>63</b>
<b>3.3.5</b>	Refroidisseur.....	<b>63</b>
<b>3.4</b>	Réalisation du système hybride PV/T.....	<b>64</b>
<b>3.4.1</b>	Choix du panneau solaire.....	<b>64</b>
<b>3.4.2</b>	Choix de l'absorbeur.....	<b>65</b>
<b>3.4.3</b>	Insertion du serpentin.....	<b>66</b>
<b>3.4.4</b>	Insertion de la laine de verre.....	<b>66</b>
<b>3.4.5</b>	Insertion de l'Alucobond.....	<b>67</b>
<b>3.4.6</b>	Finalisation du système hybride.....	<b>67</b>
<b>3.4.7</b>	Partie électrique.....	<b>68</b>
<b>3.5</b>	Principe de fonction du système PV/T .....	<b>69</b>
<b>3.6</b>	Préparation des nano-fluides en Carbone .....	<b>70</b>
<b>3.6.1</b>	Aperçus sur les Nano-fluides.....	<b>70</b>
<b>3.6.2</b>	Protocole de préparation des nano-fluides.....	<b>71</b>
<b>3.7</b>	Procédures expérimentales.....	<b>73</b>
<b>3.9</b>	Résultats et discussion.....	<b>74</b>

<b>3.10</b>	Conclusion.....	<b>79</b>
-------------	-----------------	-----------

---

# Chapitre 3

### 3.1 Introduction

Les systèmes PV / T peuvent être divisés en différentes catégories en fonction de la structure ou de la méthode d'extraction de chaleur. Du point de vue structurel, les systèmes PV / T peuvent être divisés en plaques planes, concentrant et construisant des systèmes intégrés. D'autre part, les systèmes PV / T sont classés en systèmes à base d'air, à base de liquide, à base de caloducs, à base de matériau à changement de phase (PCM) et à base thermoélectrique selon la méthode d'extraction de chaleur. Les catégories mentionnées sont représentées sur la figure ci-dessous.

Dans ce chapitre, nous allons étudier l'effet des nano-fluides de carbone sur la récupération de chaleurs des panneaux photovoltaïques produite par les rayonnements solaires. Pour ce faire, nous allons réaliser un système hybride photovoltaïque / thermique (P/T) avec refroidisseur et un circuit électrique d'affichage des valeurs de température à l'entrée et à la sortie des systèmes (PV/T) ainsi que la température ambiante et les tension des panneaux photovoltaïques. Ensuite, nous allons effectuer ces mesures avec et sans l'utilisation des nano-fluides durant une journée.

### 3.2 Le concept de system hybride photovoltaïque-thermique (PV/T)

Le concept d'un capteur hybride photovoltaïque-thermique repose sur la superposition de deux fonctions énergétiques l'électricité et la chaleur. Le système hybride (PV / T) permet de produire de l'électricité à travers les cellules photovoltaïques et de l'eau chaude à travers un échangeur. Le panneau solaire capte la lumière du Soleil puis la transforme, grâce à l'effet photovoltaïque, en électricité. Cependant, le serpentin capte la chaleur produite au niveau de la face arrière du panneau photovoltaïque, pour chauffer le fluide caloporteur qui circule depuis l'entrée (froid) jusqu'à la sortie (chaud). Dans tels composants hybrides, les cellules PV agissent comme des absorbeurs. Le chauffage et le refroidissement sont assurés par circulation de fluide caloporteur sur le dos [35].

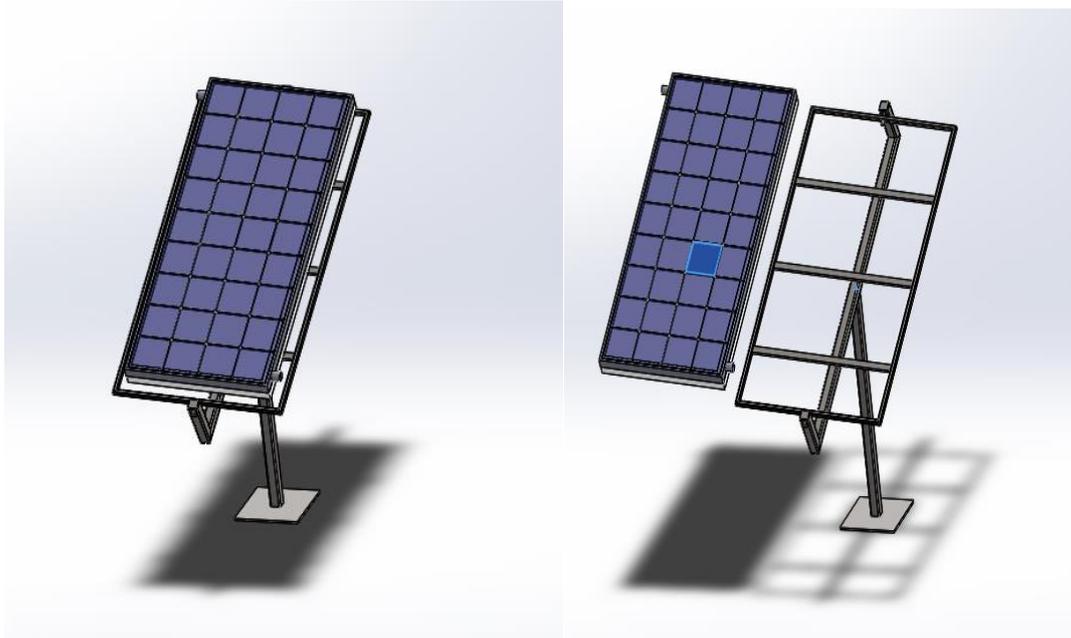


Figure 3.1 : Schéma de système hybride (PV/T)

Un capteur thermique photovoltaïque (PV/T) est un système solaire hybride qui convertit l'énergie solaire collectée en électricité au lieu de la gaspiller en produisant de la chaleur. L'idée est de combiner les fonctions de l'électricité et de la chaleur. Dans de tels composants hybrides, les cellules photovoltaïques agissent comme des collecteurs de chaleur et sont refroidies par la circulation d'un fluide caloporteur derrière elles [60].

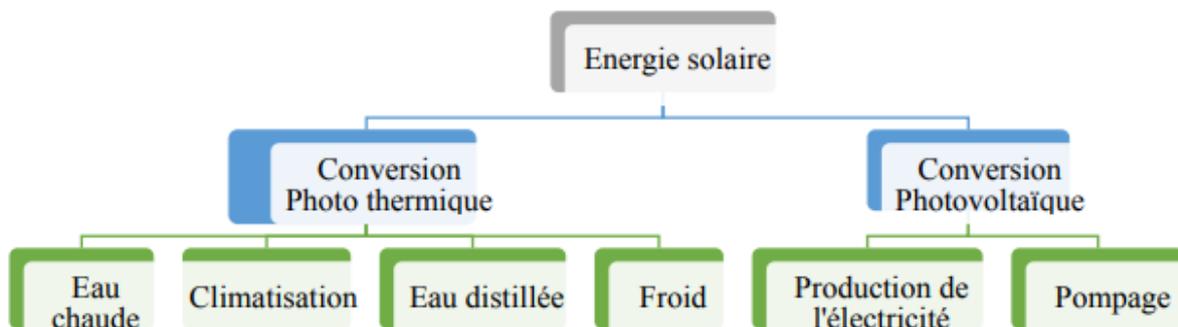
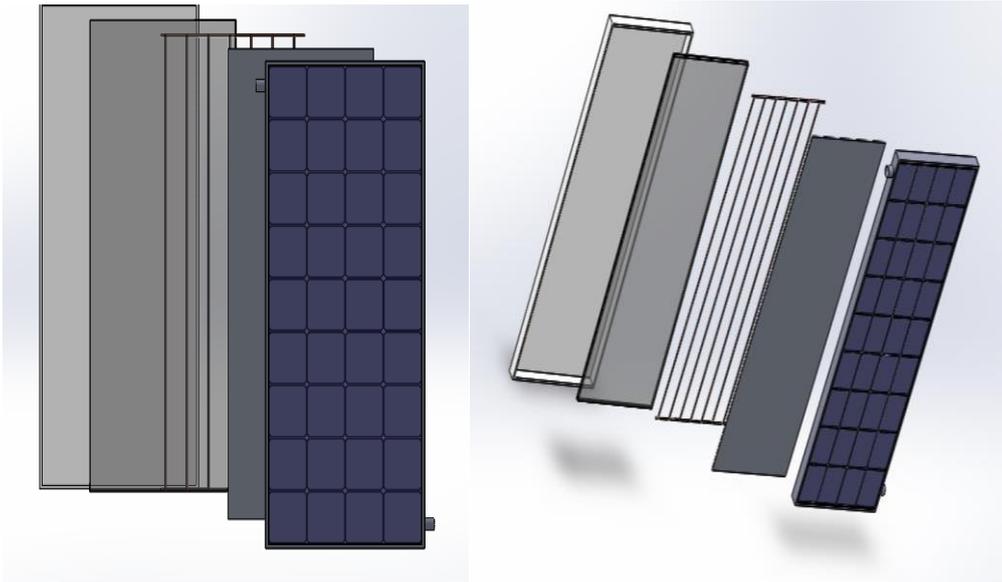


Figure 3.2 : Classification de l'énergie solaire [60]

### 3.3 Les composants constituant le système hybride (PV/T)

Ce système se compose d'un panneau solaire relié à une pompe et un refroidisseur qui circule en cycle fermé.



*Figure 3.3 : Schéma des composants de panneau solaire (PV/T) (dessin élaboré par Le logiciel de CAO SolidWorks)*

### **3.3.1 Absorbeur d'aluminium**

La tôle d'aluminium gaufrée, qui joue le rôle d'un absorbeur, présente divers avantages à savoir sa durée de vie élevée et sa résistance élevée à l'usure, ce qui lui permet de bien fonctionner dans les environnements humides. De plus, ses propriétés remarquables lui permettent d'être largement utilisé dans de nombreux domaines. Selon le principe physique lié à la vitesse de refroidissement, la conductivité thermique de la feuille d'aluminium gaufrée est de 237 W/mK. Des valeurs de conductivité thermique plus élevées indiquent une meilleure efficacité du transfert de chaleur [61].



*Figure 3.4 : Feuille d'aluminium ([https://fr.made-in-china.com/co\\_alucosuper/product\\_Stucco-Embossed-Aluminum-Sheet-for-Freeze-Chest-Refrigerator\\_reeigssng.html](https://fr.made-in-china.com/co_alucosuper/product_Stucco-Embossed-Aluminum-Sheet-for-Freeze-Chest-Refrigerator_reeigssng.html))*

### 3.3.2 L'absorbeur de type "échelle"

L'absorbeur de type "échelle" a acquis une part de marché importante. Plusieurs tubes en parallèle, reliés à un tube d'aller et un tube de retour, sont regroupés pour former une structure en échelle. C'est le type d'absorbeur utilisé dans les systèmes à thermosiphon [53].



*Figure 3.5 : L'absorbeur de type échelle [53]*

### 3.3.3 Isolation

L'isolation est assurée par la laine de verre et l'Alucobond

#### 3.3.3.1 La laine de verre

La laine de verre est obtenue par fusion de sable de quartz et/ou de verre recyclé. Cela produit est une pâte qui est ensuite fibrée et liée avec des liants chimiques avant d'être stabilisée par chauffage dans un four. Ce matériau est de bonnes propriétés d'isolation et d'insonorisation, mais est facilement endommagé par les rongeurs. En revanche, son bilan en termes d'énergie grise est généralement assez élevé [62].



*Figure 3.6 : Coquille de Tube en Laine de Verre [63]*

#### Caractéristiques :

1. Le matériau en laine de roche de verre résistant au gel, imperméable et résistant à l'humidité, résistant à la corrosion, étanche et anti-condensation.
2. Objectif principal utilisé pour l'isolation des conduites d'eau solaires, ainsi que pour les conduites électriques, les conduites de vapeur, les cheminées, etc. Offre une forte protection.
3. Résistance aux températures élevées et basses, isolation thermique ; matériaux ignifuges, sûrs et fiables ; fibre intérieure douce, absorption acoustique et réduction du bruit.

4. Facile à installer épaisseur de paroi : 30/50 mm, longueur : 1 m, installation et découpe faciles, économisant du travail et des efforts.
5. Isolation antigel pour tuyau auto-adhésif, diamètre intérieur : 27 mm à 273 mm. Utilisé pour protéger les conduites d'eau et les tuyaux de chauffage extérieurs. Le diamètre intérieur du manchon isolant correspond au diamètre extérieur de votre tuyau.
6. Hautement efficace et abordable, elle est le matériau d'isolation le plus largement vendu à travers le monde [63].

Tableau 3.1 : Propriétés physiques de matériau [62]

Conductivité thermique	0.032 à 0.042 W/m.°C
Densité	10 à 150 kg/m <sup>3</sup>
Chaleur spécifique	840 à 1000 J/kg. °C
Coefficient de diffusion à la vapeur d'eau	6.47
Perméabilité à la vapeur d'eau	35.10 <sup>-5</sup> à 70.10 <sup>-5</sup> g/m.h. mmHg
Bilan CO <sub>2</sub>	7.5 kg équivalent CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>

### 3.3.3.2 Alucobond

ALUCOBOND est le matériau composite en aluminium (ACM) d'origine, largement utilisé dans les secteurs de l'architecture et du revêtement de bâtiment depuis plus de 50 ans [65].

Les panneaux en aluminium composite (ACP), fabriqués à partir de matériau composite en aluminium (ACM), sont des panneaux plats composés de deux fines feuilles d'aluminium prélaquées collées à un noyau non aluminium [67].



*Figure 3.7 : Alucobond (<https://www.aikolon.fi/en/products/composite-materials/alucobond-pe>)*

### 3.3.4 Pompe

Nous utilisons une pompe de 12v pour faciliter le transfert des fluides à travers les tubes.



*Figure 3.8 : Pompe de 12V*

### 3.3.5 Refroidisseur

Le refroidisseur est un dispositif de refroidissement liquide, que nous utilisons dans ce système spécifiquement pour refroidir les liquides chauds après qu'ils aient quitté le serpentin et avant d'y retourner car il s'agit d'un circuit fermé.

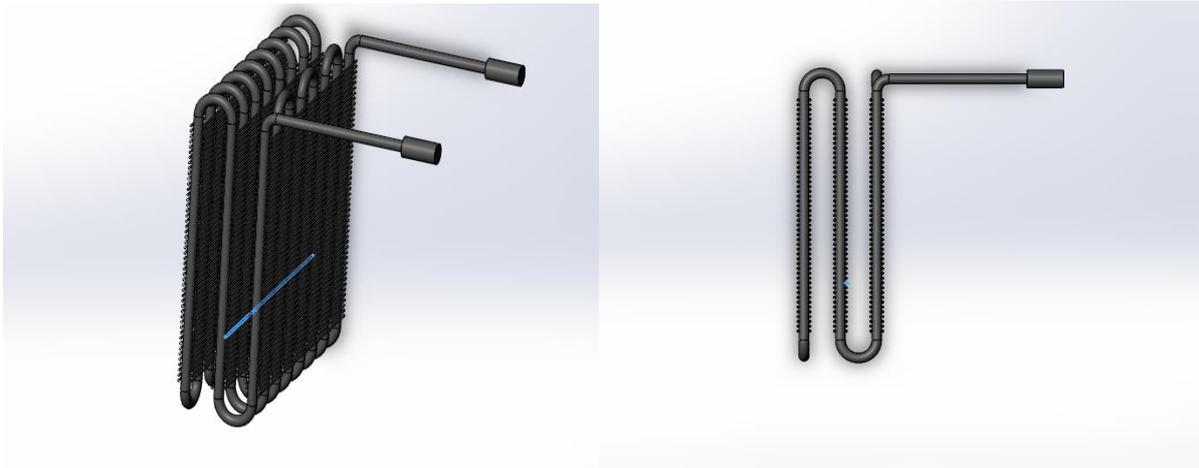


Figure 3.9 : Refroidisseur (dessin élaboré par Le logiciel de CAO SolidWorks)

### 3.4 Réalisation du système hybride PV/T

#### 3.4.1 Choix du panneau solaire

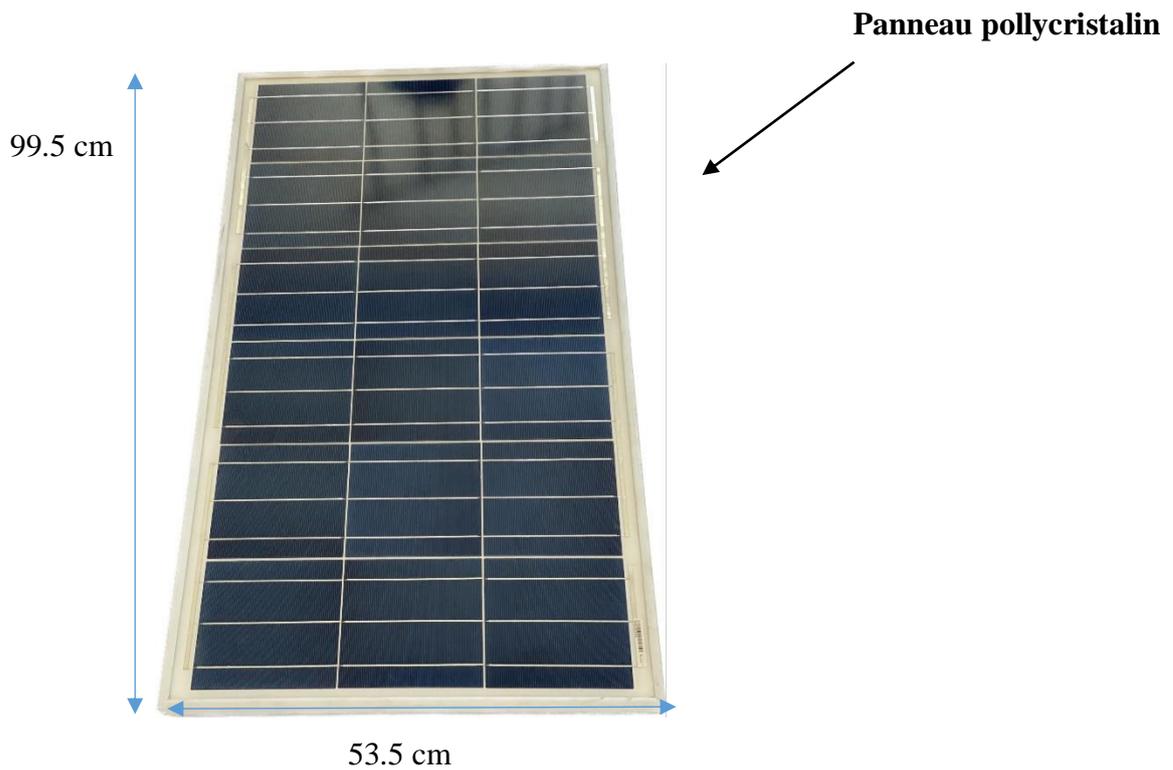
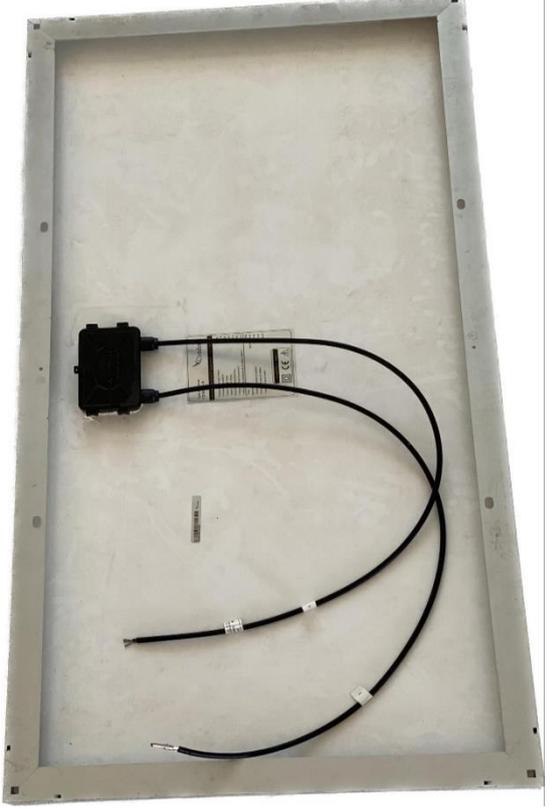


Figure 3.10 : Vue de Façade du panneau solaire

	<p>           Puissance maximale (<math>P_{max}</math>) : 70 W            Tolérance de puissance : <math>\pm 5</math> %            Courant à <math>P_{max}</math> (<math>I_{mp}</math>) : 7.98 A            Tension à <math>P_{max}</math> (<math>V_{mp}</math>) : 9.32 V            Courant en court-circuit (<math>I_{sc}</math>) : 8.57 A            Tension en circuit-ouvert (<math>V_{oc}</math>) : 11.19 V            Temp nominale d'utilisation de la cellule (NOCT) : <math>45 \pm 2</math> °C            Poids : 6.5 Kg            Tension maximal du système : 1000 V DC            Charge maximale de fusibles : 15 A         </p>
<p><b>Figure 3.11</b> : Vue face arrière du panneau solaire</p>	<p><b>Figure 3.12</b> : Caractéristique du panneau solaire</p>

### 3.4.2. Choix de l'absorbeur

Après avoir pris les mesures nécessaires pour couper la feuille d'aluminium, nous la peignons en noir pour agir comme absorbant.

Avant



Après



Figure 3.13 : Feuille d'aluminium

### 3.4.3 Insertion du serpentin

Nous faisons quatre trous dans le cadre du panneau solaire pour insérer le serpentin de cuivre.

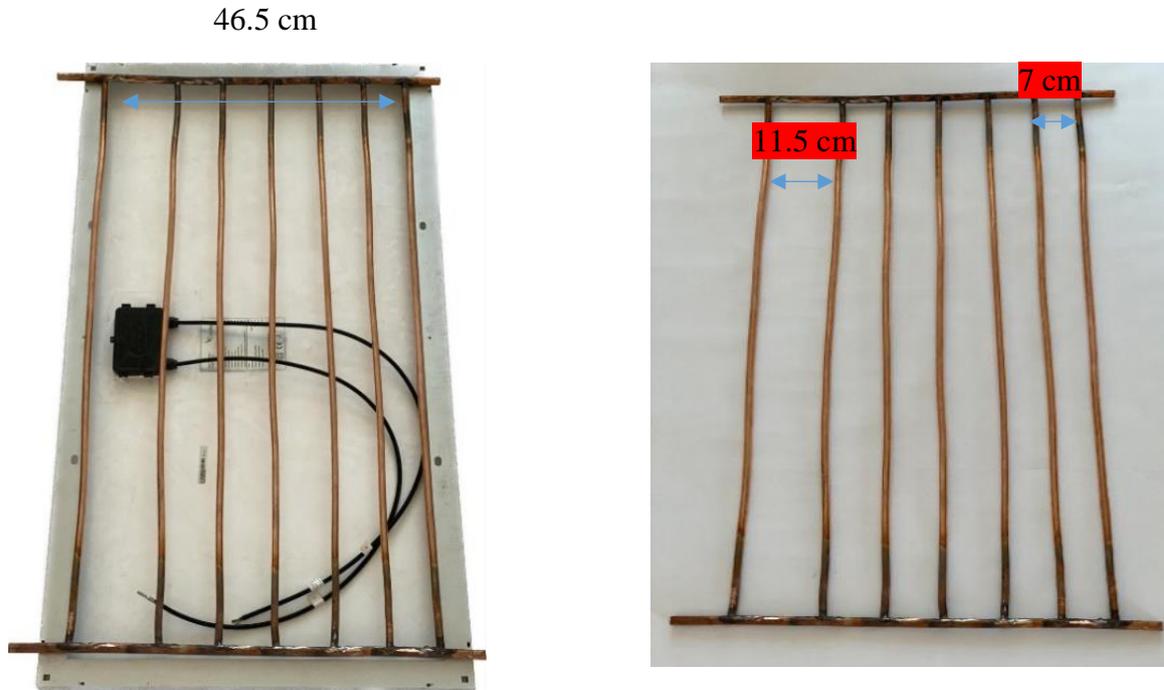
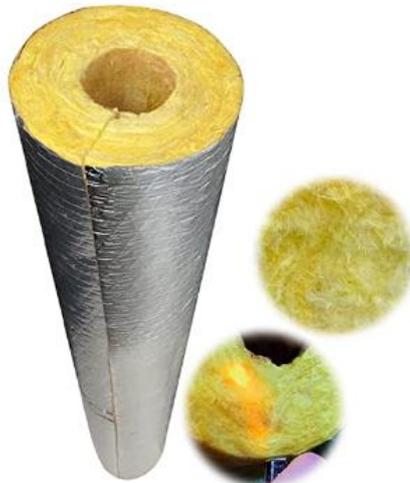


Figure 3.14 : Serpentin de cuivre

### 3.4.4 Insertion de la laine de verre

Nous plaçons la laine de verre sur le serpentin de cuivre pour agir comme un isolant.



**Figure 3.15:** *Laine de verre*

### 3.4.5 Insertion de l'Alucobond

Enfin, on ferme le panneau avec un alucobond qui sert aussi d'isolant.



Alucobond

**Figure 3.16 :** *Alucobond*

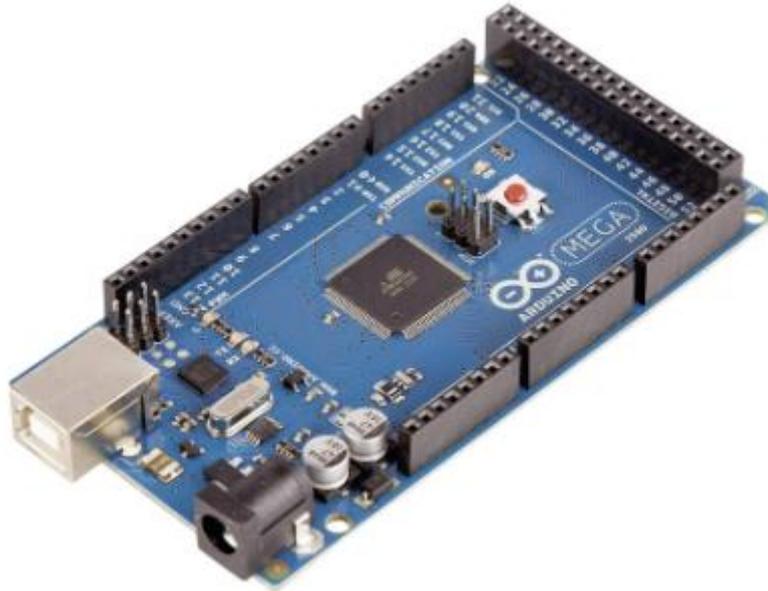
### 3.4.6. Finalisation du système hybride



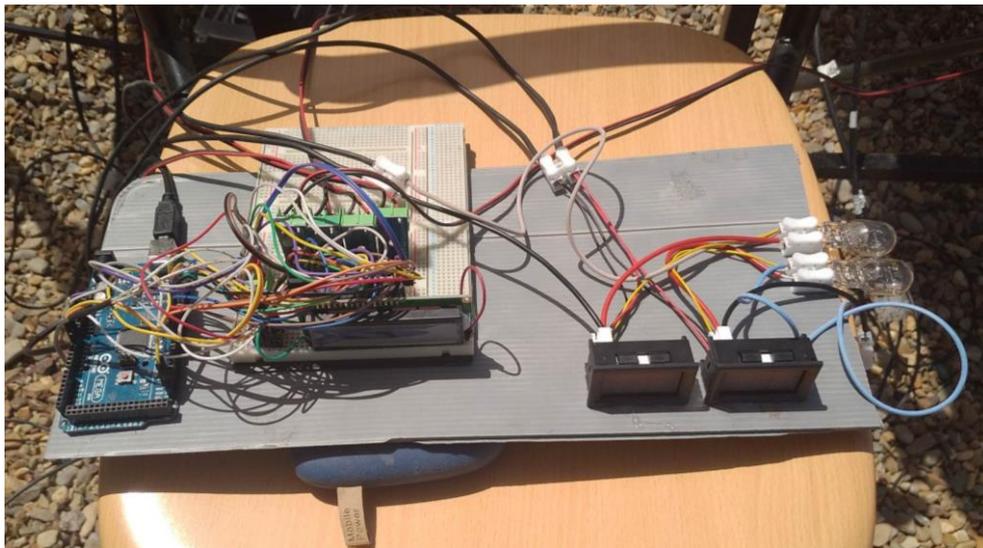
**Figure 3.17 :** *Vue globale du système hybride déposé sur un support*

### **3.4.7 Partie électrique**

La partie électrique se compose d'une carte de contrôle Arduino, de cinq capteurs de température, d'un boîtier d'alimentation, d'un afficheur de température et deux afficheurs des tensions 1 et 2. Le système est contrôlé par une carte Arduino Mega, sur laquelle se trouve un microcontrôleur qui peut être programmé pour analyser et produire des signaux électriques. La carte de commande reçoit des quantités de température aux entrées et sorties du circuit de refroidissement du panneau solaire.



*Figure 3.18 : Carte Arduino*



*Figure 3.19 : Le système électronique*

### **3.5 Principe de fonction du système PV/T**

Le premier prototype (système PV/T) est rempli d'eau distillée et le second de nano-fluides. Le rôle des fluides est de refroidir le panneau solaire pour produire plus d'électricité. A sa sortie, le rôle du le refroidisseur est de refroidir le fluide et de le repomper à l'aide de la pompe en cycle fermé, et ce pour assurer le refroidissement continue du panneau solaire.



Figure 3.20 : Schéma de système (PV/T) ( dessin élaboré par le logiciel de CAO SolidWorks)

### 3.6 Préparation des nano-fluides en Carbone

#### 3.6.1 Aperçus sur les Nano-fluides

Dans la littérature on trouve un grand nombre de stratégies pour améliorer la transmission de chaleur, telles que l'amélioration des surfaces de transfert et des plaques à ailettes, l'oscillation des substrats chauffés, etc. Une prochaine stratégie pour augmenter la transmission de chaleur est l'utilisation des nano-fluides. Les nano-fluides sont composés de particules nanométriques (1-100 nm) dispersées dans des fluides conventionnels. En 2006, une étude s'est concentrée sur l'écoulement 3D d'un nanofluide à base d'eau sur une plaque à expansion exponentielle, en tenant compte de plusieurs facteurs tels que la variation non linéaire de la température, la variabilité de l'expansion et la taille des nanoparticules (NP) [64]. Une préparation appropriée des nano-fluides hybrides est un facteur critique pour mesurer les propriétés thermophysiques de ces nano-fluides. Dans cette étude, des quantités estimées de nanoparticules ont été mises en suspension dans de l'eau distillée pour obtenir la fraction volumétrique requise des nano-fluides. Cette méthode garantit que les nanoparticules ne s'agglomèrent pas dans le liquide de base, assurant ainsi la stabilité du nano-fluide préparé grâce à la technique de sonication [66]. En effet, La sonication est une technique éprouvée pour préparer des nano-dispersions stables avec une distribution uniforme des nanoparticules par l'utilisation d'un appareil agitateur magnétique.

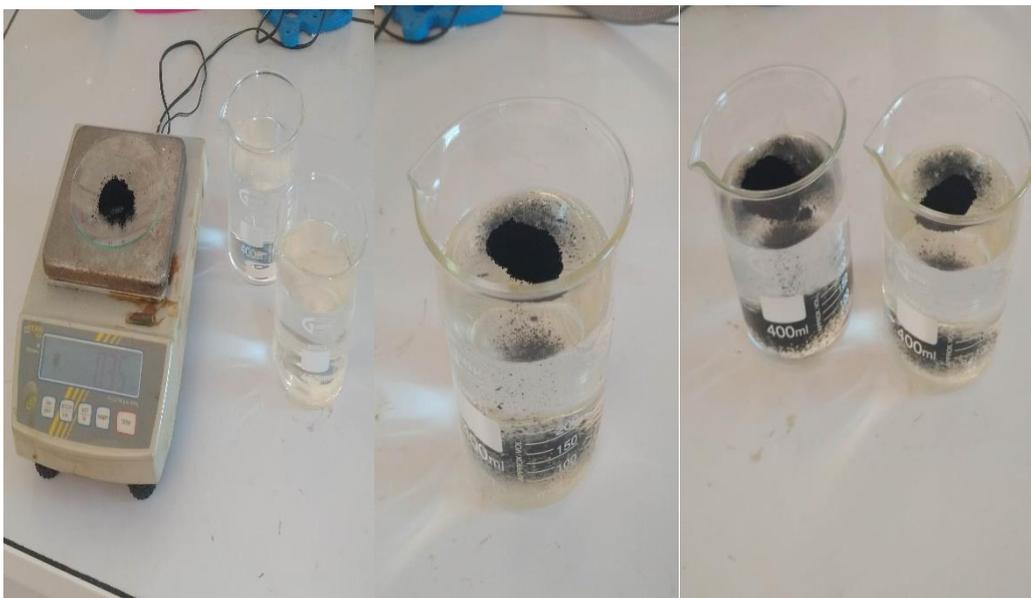
### 3.6.2 Protocole de préparation des nano-fluides

- Nous prenons 0,35 gramme de nanoparticules et les vidons dans un bécher contenant 350 ml d'eau distillée.



*Figure 3.21 : Nanoparticule de charbonne*

**Remarque :** Nous utilisons deux béchers dans ce cas car l'appareil peut en accueillir deux à la fois.



*Figure 3.22 : Décharger le nanofluide dans de l'eau distillée*

- Nous commençons le processus de sonication en plaçant le bécher dans l'appareil agitateur magnétique, que nous remplissons aux deux tiers avec de l'eau distillée, puis nous fixons la durée du processus à trente minutes.



*Figure 3.23 : Processus de sonication*

- Nous répétons l'expérience trois fois pour obtenir suffisamment de solution.



*Figure 3.24 : Fin du processus de sonication*

Le résultat final :



*Figure 3.25 : Le résultat final du nano-fluide*

### 3.7 Procédures expérimentales

Pour assurer une bonne comparaison des résultats de l'effet des nanoparticules sur le rendement du système hybride PV/T nous avons réalisé les deux systèmes avec les mêmes caractéristiques des composants internes et externes, et dans les mêmes conditions climatiques.

Nous remplissons le premier système avec de l'eau distillée et l'autre avec des nano-fluides pour voir l'influence des nano-fluides sur le rendement énergétique du système.



*Figure 3.26 : Système hybride ( PV / T )*

### 3.8 Résultats et discussion

Après avoir validé le bon fonctionnement du système hybride PV/T, nous allons prendre les valeurs des résultats tous les quarts heure de 10h15 du matin jusqu'à 14h30 de l'après-midi. Comme nous avons mentionné plus haut, nous remplissons le premier système avec de l'eau distillée et l'autre avec des nano-fluides. Les valeurs sont la température d'entrée du premier système ( $T_1$ ), température de sortie du premier système ( $T_2$ ) température d'entrée du deuxième système ( $T_3$ ) température d'entrée du deuxième système ( $T_4$ ) et la température ambiante ( $T_5$ ). En outre, on mesure les valeurs de la tension de sortie du premier système ( $V_1$ ) et la tension du deuxième système ( $V_2$ ).

En d'autre part les valeurs prises représentent ce qui suit :

- $T_1$  : Température l'eau distillée à l'entrée du premier système.
- $T_2$  : Température l'eau distillée à la sortie du premier système.
- $T_3$  : Température du nanofluides à l'entrée du deuxième système.
- $T_4$  : Température l'eau distillée à la sortie du deuxième système.
- $T_5$  : la température ambiante

- V1 : Tension du système avec l'eau distillé
- V2 : Tension de système avec nano fluide

**Tableau 3.2 : Résultats de l'expérience**

Heures	T1	T2	T3	T4	T5	Tension (1)	Tension (2)
10:15	46	47,2	51,75	54	42	9,4	9,4
10:30	45	47	51	54	41,75	9,4	9,4
10:45	47	50,7	52	57,7	43	9,3	9,3
11:00	49,25	56,2	54,25	62	44	9,2	9,2
11:15	52	55	52,75	58,7	43	9,2	9,3
11:30	50,5	53,7	50,75	58	44	9,2	9,3
11:45	48	52	49,5	58,25	41,75	9,3	9,4
12:00	51,25	52,5	49	58	41,5	9,3	9,4
12:15	52,25	52,7	48,7	54,75	42,5	9,2	9,4
12:30	55,5	57,25	55,75	60,5	43,25	9,2	9,2
12:45	56	58,25	54,5	62,7	43,5	9,2	9,2
13:00	66	67,5	64,5	68,7	45,75	9	9
13:15	56,2	56,75	57,75	66,2	43,25	9,2	9,2
13:30	56,25	56,7	54,2	65,7	43,25	9,2	9,2
13:45	58,5	61,25	57,25	63,2	44	9,1	9,1
14:00	54,7	57	54	62,2	43,25	9,2	9,2
14:15	57,25	58,55	56	61,7	42,5	9,2	9,3
14:30	47	51	49,5	60,2	43	9,4	9,5

Pour mettre en exergue clairement l'effet du nano-fluide par à l'eau distillée, nous avons rapporté dans les tables 3.3 et 3.4 les écarts et les erreurs relatives des températures ainsi que les écarts entre les tensions V1 et V2 .

Il est à noter que :

$\Delta t_{ed}$ : écart de température entre la température d'entrée et de sortie du premier système (eau distillée)

$\Delta t_{nf}$ : écart de température entre la température d'entrée et de sortie du deuxième système (nano-fluides)

$\Delta t_{ed}$ : écart de température entre la température d'entrée et de sortie du premier système (eau distillée)

$\Delta_{nf}$  : écart de température entre la température d'entrée et de sortie du premier système (nano-fluides)

$\Delta_{tension}$  : écart entre la tension des deux systèmes.

**Tableau 3.3 :** Les différences des températures d'eau distillée et de nano-fluide et leurs écarts

Heure	$\Delta t_{ed} = T_2 - T_1$ (°C)	$\Delta t_{nf} = T_4 - T_3$ (°C)	$\Delta_{ed} = \frac{T_2 - T_1}{T_2}$ (°C)	$\Delta_{nf} = \frac{T_4 - T_3}{T_4}$ (°C)
10:15	1.2	2.25	0.026	0.043
10:30	2	3	0.044	0.058
10:45	3.7	5.7	0.078	0.109
11:00	6.95	7.75	0.14	0.142
11:15	3	5.95	0.05	0.112
11:30	3.2	7.25	0.05	0.142
11:45	4	8.75	0.08	0.176
12:00	1.25	9	0.024	0.183
12:15	0.45	6.05	0.008	0.124
12:30	1.75	4.75	0.030	0.085
12:45	2.25	8.2	0.038	0.150
13:00	1.5	4.2	0.022	0.065
13:15	0.5	8.45	0.009	0.146
13:30	0.45	11.5	0.008	0.212
13:45	2.75	5.95	0.044	0.103
14:00	2.3	8.2	0.040	0.151
14:15	1.3	5.7	0.022	0.101
14:30	4	10.7	0.078	0.216

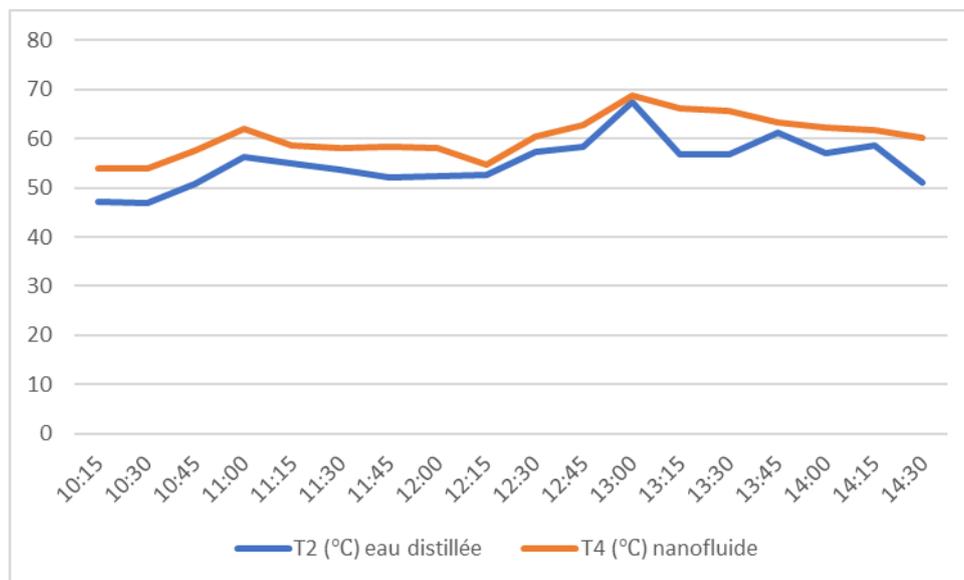
**Tableau 3.4 :** La différence entre tension (V1) et tension (V2)

Heure	$\Delta_{tension}$ (Volt)
10:15	0
10:30	0
10:45	0
11:00	0
11:15	0.1
11:30	0.1
11:45	0.1
12:00	0.1
12:15	0.2
12:30	0
12:45	0
13:00	0
13:15	0
13:30	0
13:45	0
14:00	0
14:15	0.1

14:30	0.1
-------	-----

Selon les tableaux (3.2) , (3.3) et (3.4) on constate que les écarts de température du système en nano-fluides , le long de la journée, est toujours supérieur aux écarts de température du système en eau destinée et atteint 10.7 °C à 14h30 min. Ceci prouve que l'efficacité du nano-fluide en carbone est meilleure par rapport à l'efficacité de l'eau distillée.

Le premier graphe (Figure 3.27) représente les valeurs de température de l'eau distillée et du nano-fluide à la sortie des deux systèmes.



**Figure 3.27 :** Comparaison entre la sortie de nanofluide et l'eau distillée

Selon la Figure 3.27 on remarque que les températures du nano-fluide à la sortie du deuxième système (T4) sont toujours supérieures, tout au long de la journée, par rapport aux températures de sortie de l'eau distillée du premier système (T2). On remarque aussi que les deux courbes atteignent leur maximum point vers 13h00 68,7 °C pour T4 et 67,5 °C pour T2.

Les figures 3.28 et Figure 3.29 représentent la différence entre la température de l'eau distillée et du nano-fluide avec la température de l'air du milieu ambiant, d'où on remarque que les températures à la sortie des deux systèmes suivent le même comportement.

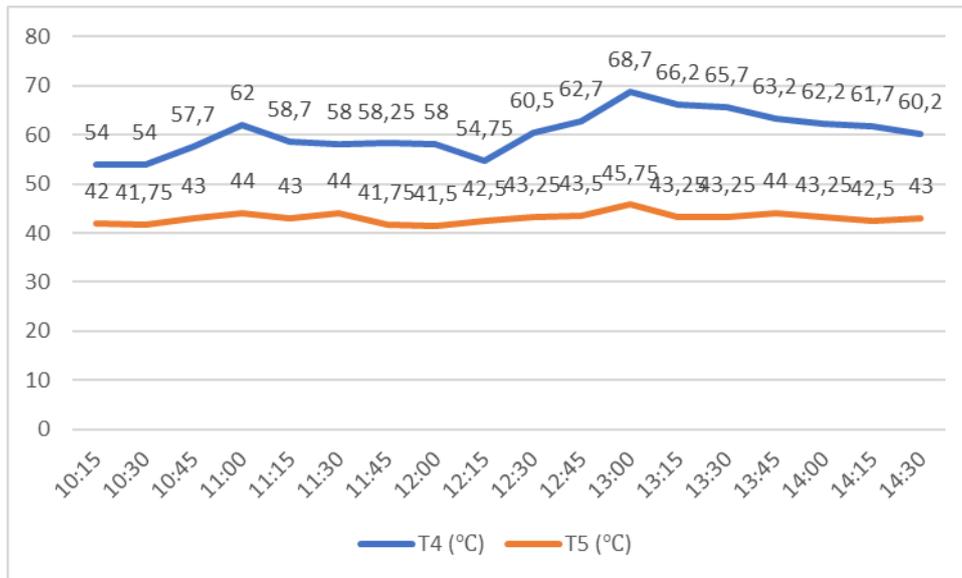


Figure 3.28 : Comparaison entre T<sub>4</sub> et T<sub>5</sub>

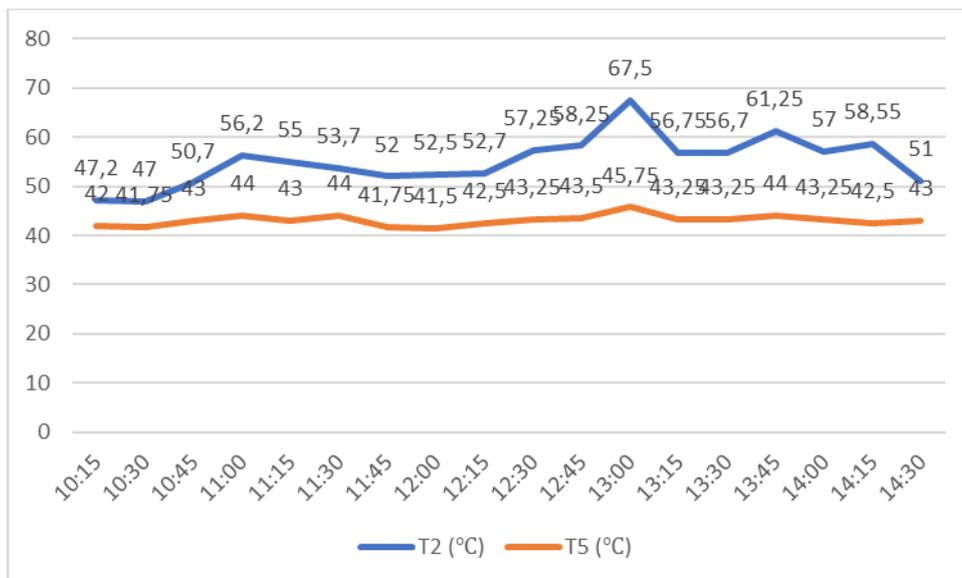
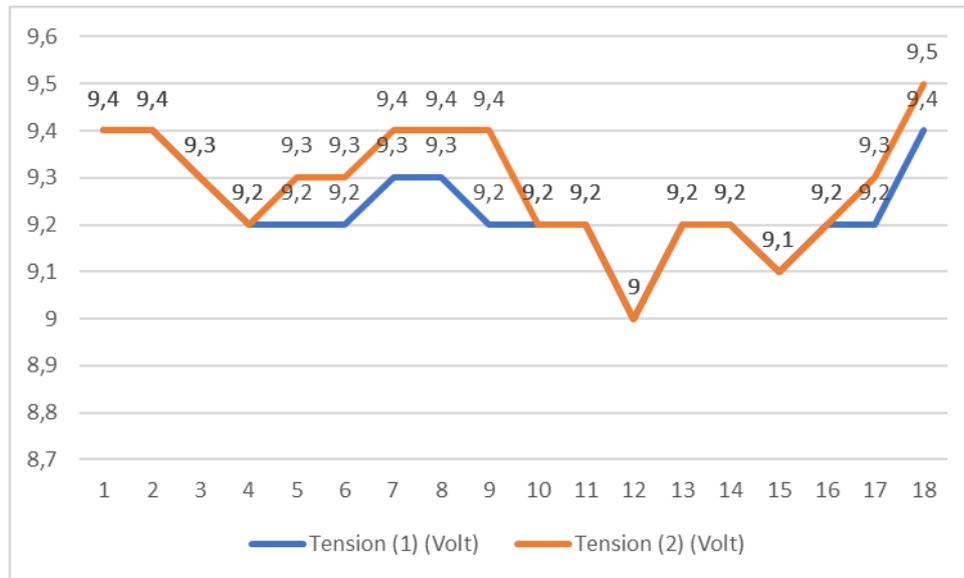


Figure 3.29 : Comparaison entre T<sub>2</sub> et T<sub>5</sub>



**Figure 3.30 :** Comparaison entre Tension (V1) et Tension (V2)

Selon le quatrième graphe (Figure 3. 30) qui représente la différence de tension (V1) pour le système à eau distillée et de tension (V2) pour le système au nano-fluide, la tension obtenue par le panneau solaire du système hybride avec les nano-fluides est toujours meilleurs , presque tout au long de la journée , par rapport à ceux obtenu par le panneau solaire du système avec l'eau distillée. Ceci, démontre l'efficacité du nano-fluide en carbone par rapport à l'efficacité de l'eau distillée.

### 3.10 Conclusion

Dans ce troisième et dernier chapitre, nous avons donné des explications détaillées sur la conception, par l'utilisation du logiciel solidworks et les différents composants ainsi que la réalisation du système hybride (PV/T) étudié. Ensuite nous avons illustré le processus d'élaboration de nano-fluide en utilisant la sonication pour assurer la nano-dispersions stables avec une distribution uniforme des nanoparticules par l'utilisation d'un appareil agitateur magnétique. Après avoir validé le bon fonctionnement du système hybride PV/T, nous avons pris les valeurs des résultats tous les quarts heure de 10h15 du matin jusqu'à 14h30 de l'après-midi.

Nous avons constaté que les températures du nano-fluide à la sortie du deuxième système (T4) sont toujours supérieur , tout au long de la journée , par rapport aux températures de sortie de l'eau distillée du premier système (T2). En outre, la tension obtenue par le panneau solaire du système hybride avec les nano-fluides est toujours meilleurs , presque tout au long de la journée

, par rapport à ceux obtenu par le panneau solaire du système avec l'eau destinée. Ceci, démontre l'efficacité du nano-fluide en carbone par rapport à l'efficacité de l'eau distillée.

## **C**onclusion

---

Notre projet était l'étude expérimentale de l'effet des nano-fluides en carbone intégrés comme caloporteur dans un système hybride Photovoltaïque /Thermique (PV/T) pour la production d'électricité et d'eau chaude. Pour ce faire, et après avoir conçu le système hybride photovoltaïque / thermique (PV/T), par l'utilisation du logiciel SolidWorks, nous l'avons réalisé avec l'intégration d'un refroidisseur et un circuit électrique d'affichage des valeurs de température à l'entrée et à la sortie des systèmes (PV/T) ainsi que la température ambiante et la tension des panneaux photovoltaïques.

Ensuite nous avons illustré le processus d'élaboration de nano-fluide en utilisant la sonication pour assurer une bonne stabilité et distribution uniforme des nanoparticules par l'utilisation d'un appareil agitateur magnétique. Après la validation de bon fonctionnement du système hybride PV/T, nous avons pris les valeurs des résultats tous les quarts d'heure de 10h15 du matin jusqu'à 14h30 de l'après-midi.

Nous avons constaté que les températures du nano-fluide à la sortie du deuxième système (T4) sont toujours supérieures, tout au long de la journée, par rapport aux températures de sortie de l'eau distillée du premier système (T2). En outre, la tension obtenue par le panneau solaire du système hybride avec les nano-fluides est toujours meilleure, presque tout au long de la journée, par rapport à celle obtenue par le panneau solaire du système avec l'eau distillée. L'augmentation de la tension est justifiée par le fait que l'augmentation du rendement des cellules photovoltaïques est liée à la réduction de leur température. Ceci, démontre l'efficacité du nano-fluide en carbone dans la récupération d'énergie par rapport à l'efficacité de l'eau distillée.

En somme, nous constatons que l'efficacité du système PV/T est grandement influencée et augmentée par l'intégration des nano-fluides en carbone dans les échangeurs du système hybride PV/T.

## Bibliographie

- [1] Jean-Louis BAL, “*Le livre blanc des énergies renouvelables*”, (Février 2012) P10. <https://www.fichier-pdf.fr/2017/06/20/livre-blanc-des-energies-renouvelables-fevrier-2012/>, consulté le 06 Juin 2023.
- [2] MIQDAM Tariq Chaichan, Hussein A. Kazem, “*Generating Electricity Using Photovoltaic Solar Plants in Iraq*” P6-8 (2018).
- [3] B. Nada Hibat Errahmen, Energie éolienne, mémoire de master Electrotechnique, université de Annaba 2020-2021.
- [4] Fondation Good Planet, *les énergies hydrauliques*, [https://www.missionenergie.goodplanet.org/uploads/2019/09/10-decouverte\\_les-energies-hydrauliques\\_college.pdf](https://www.missionenergie.goodplanet.org/uploads/2019/09/10-decouverte_les-energies-hydrauliques_college.pdf), Consulté le 26/03/2023 à 19h.
- [5] *La géothermie collection “Les enjeux des Géosciences”* 2e édition (2008). [https://www.geothermies.fr/sites/default/files/inline-files/La-Geothermie\\_2eme-edition\\_2008%20-%20Copie.pdf](https://www.geothermies.fr/sites/default/files/inline-files/La-Geothermie_2eme-edition_2008%20-%20Copie.pdf)
- [6] A. Lilia, Contribution à l'Amélioration des Performances des Générateurs Eoliens - Evaluation de l'Impact des Energies Renouvelables sur l'Environnement, THESE DOCTORAT, Université Hadj Lakhdar de Batna 2012.
- [7] *FILIERE D'ÉNERGIE RENOUVELABLE L'ÉNERGIE DE LA BIOMASSE*, Québec 4e trimestre (2014). <https://fr.scribd.com/document/479580537/fiche-biomasse-pdf#>
- [8] BOUZEGANE Mhenna, GAOUAOUI Ferhat, Alimentation d'un moteur à courant continu par une source photovoltaïque, thème mémoire, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou 2018.
- [9] GAOUAS MEHDI REDHA, IBN CHERIF KARIM, Etude d'une chaine de conversion de L'énergie solaire avec système De suiveur solaire, thème mémoire, Université Larbi Ben Mhidi –Oum El Bouaghi 2021.
- [10] <https://particuliers.alpiq.fr/guide-energie/energie-renouvelable/differents-types-energie-solaire>, Consulté le 23/06/2023 à 14h.
- [11] Miro Zeman, “*INTRODUCTION TO PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY*”, chapter 1 P 18, Delft University of Technology.
- [12] Brahim.M et Belgendouz.M, Optimisation des performances d'un panneau solaire à air système hybride PV/T étude expérimental, physique énergétique, thème mémoire, université Msila 2021-2022.
- [13] Ferrah Billel, étude d'un système hybride (photovoltaïque – éolienne), ÉNERGETIQUE ET ENVIRONNEMENT, thème mémoire, université Annaba 2015.
- [14] Mark Hankins, “*INSTALLATIONS SOLAIRES PHOTOVOLTAÏQUES AUTONOMES Conception et installation d'unités non raccordées au réseau*”, P 15 (2010).
- [15] G. N. Tiwari, Swapnil Dubey, “*Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications*”, Indian Institute of Technology (IIT) Delhi, Series No. 2 P 1-2 (2010).
- [16] Arno Smets et al, “*Solar Energy The physics and engineering of photovoltaic conversion technologies and Systems*”, UIT Cambridge (2016).
- [17] Guy Isabel, “*Les capteurs solaire à air*”, P 24-25 (2012).
- [18] Majid Jamil, M. Rizwan, D. P. Kothari, “*Grid Integration of Solar Photovoltaic Systems*”, india, P 25 (2018).
- [19] G. Lorenzini, C Beserni, G Flacco, “*Solar thermal and biomass energy*”, University of Bologna, Italy P 3 (2010).
- [20] Benrabah.A, Djaidja.F, détermination de la position du soleil, thème mémoire de master, université de Msila 2021.

- [21] Charik.A, Détermination de l'angle optimal d'inclinaison de capteur solaire, Université de M'sila 2016.
- [22] René RAUD, "SOLEIL & VAPEUR", Chapitre I, université de Lyon.
- [23] "Soleil, Terre et rotations La géométrie et mathématiques du système", P 1 (Phm Obs. Lyon 2012/10/10) [https://cral-perso.univ-lyon1.fr/labo/fc/astromanu/Tournesol/maquette\\_tournesol\\_maths.pdf](https://cral-perso.univ-lyon1.fr/labo/fc/astromanu/Tournesol/maquette_tournesol_maths.pdf).
- [24] Article Architecture et Climat 2021, <https://energieplus-lesite.be/theories/climat8/enseillement-d8/#:~:text=un%20diagramme%20solaire,Le%20rayonnement%20solaire,%C3%A9viter%20les%20surchauffes%20en%20%C3%A9t%C3%A9>, Consulté le 25/03/2023 à 17h.
- [25] Benbouza.N, Etude du rayonnement solaire dans la région de Batna, thème mémoire master, UNIVERSITE DE BATNA 2008.
- [26] Solaire thermique et photovoltaïque : une brève histoire, Encyclopédie d'Energie, <https://www.encyclopedie-energie.org/solaire-thermique-et-photovoltaique-une-breve-histoire/>, consulté le 28/07/2023.
- [27] Merad.F, mémoire de Master, Conception d'un programme de calcul du rayonnement solaire, cas particulier de la région L'université de de Mostaganem.
- [28] Hung Tran.C, Thèse doctorat, Améliorations d'une chaîne de conversion de l'énergie solaire en électricité autonome en vue d'application dans les pays en voie de développement, UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE 2019.
- [29] Joris Libal, Radovan Kopecek, "Bifacial Photovoltaics", P 269 UK (2018).
- [30] Idir.A et Kerkour.I, Etude des performances d'un capteur solaire thermique plan, Mémoire master, université de Bejaia 2019.
- [31] Confort et démotique Ressources multimédia enseignement de la technologie, TPE 1ère S lycée Ambroise Paré.<https://albert-camus-lumbres.enthdf.fr/wp-content/uploads/2021/12/08-Ressource-activite-3-Energie-solaire.pdf>, Consulté le 26/03/2023 à 18h.
- [32][https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/fileadmin/medias/pdf/agroalimentaire\\_agricole/13-Capteurs\\_photovolta%C3%AFques.pdf](https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/fileadmin/medias/pdf/agroalimentaire_agricole/13-Capteurs_photovolta%C3%AFques.pdf), Consulté le 27/03/2023 à 17h.
- [33] Dr Nabil BESSANANE, Cours de Solaire Thermique, 1ère Année Master – ERM, Département de génie Mécanique Université de Batna 2 2019-2020.
- [34] Bruno FLECHE, "Énergies renouvelables : Solaire Thermique LE SOLAIRE THERMIQUE : approche générale", Lycée International Victor Hugo BP 317 31770 COLOMIERS. <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/techniques/782/782-bf-thermique.pdf>
- [35] MT. BAISSI, K. TOUAFEK , I. TABET , A. KHELIFA, CONCEPTION D'UN CAPTEUR SOLAIRE HYBRIDE PHOTOVOLTAÏQUE THERMIQUE (SYSTEME-THERMOSIPHON), université de Biskra 2016.
- [36] Senthilarasu Sundaram, David Benson, and Tapas Kumar Mallick, "Solar Photovoltaic Technology Production", UK (2016).
- [37] Mekliche.S, mémoire master, Etude et Simulation des paramètres électriques d'une cellule solaire photovoltaïque à base de Silicium, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU 2017.
- [38] Anne Labouret, Michel Viloz, "Installations photovoltaïques Conception et dimensionnement d'installations raccordées au réseau", 5<sup>e</sup> édition P 54 (2012) paris.
- [39] Joseph Burdick, Phillip Schmidt, "install your own solar panel", (2017).

- [40] [http://sti2d.patgue.com/SitePV/Ressource\\_PV/Cellule\\_solaire\\_module\\_solaire.pdf](http://sti2d.patgue.com/SitePV/Ressource_PV/Cellule_solaire_module_solaire.pdf), Consulté le 28/03/2023 à 17h.
- [41] ANNE LABOURET, PASCAL CUMUNEL, JEAN-PAUL BRAUN, BENJAMIN FARAGGI, “*Cellules solaires Les bases de l’énergie photovoltaïque*”, 5<sup>e</sup> édition P 33-34 paris.
- [42] LINCOT.D et al. – *L’Électricité, fille du Soleil*, Dossier pour la science, n° 69, 2010. <https://books.openedition.org/editions-cnrs/11061?lang=en>.
- [43] S.Benaabas, H. Heriche, Z. Rouabah, N. Chelali, “*Enhancing the efficiency of CIGS thin film solar cells by inserting novel back surface field (SnS) layer*”.
- [44] Sean white, “*Solar Photovoltaic Basics*”, 2<sup>e</sup> edition.
- [45] Hisour art culture histoire France, site web <https://www.hisour.com/fr/third-generation-photovoltaic-cell-39628/> Consulté le 29/03/2023 à 18h.
- [46] Moulay Ahmed.S, Cellules solaires pérovskites imprimées et optimisation des couches pérovskites pour les cellules tandems, ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE MONTRÉAL, LE 07 NOVEMBRE 2019.
- [47] BOUGHNIM Nahed, TRIPOUL David, AUDIBERT Jonathan, Licence physique semestre 6, Cellule photovoltaïque de Graetzel, Université de Nice Sophia-Antipolis.
- [48] M. EL-GAHOUCI, Thèse de doctorat, Cellules solaires multi-jonctions dupliquées pour le photovoltaïque à très haute concentration, Sherbrooke (Québec) Canada 2021.
- [49] Oulhadj.I et Meskine.M, Réalisation d’un régulateur de charge pour un système photovoltaïque, mémoire magister université de adrar 2014.
- [50] Capteurs solaires thermiques plans, Cours: Captation (Année 2015), Université Alioune DIOP de Bambey, (<http://www.foad.uadb.edu.sn/mod/book/tool/print/index.php?id=2429>) consulté le 01 /07/2023.
- [51] <https://energieplus-lesite.be/techniques/photovoltaïque3/types-de-cellules/>, consulté le 29 /03/2023 à 17h.
- [52] NADJI NEDJEMEDDINE, mémoire master, Étude des performances d'un capteur solaire plan à conversion thermique, ANNABA-UNIVERSITY 2017-2018.
- [53] <https://www.lepanneausolaire.net/les-absorbeurs-materiaux-modeles.php>, Consulté le 03/04/2023 à 15h.
- [54] <https://www.lepanneausolaire.net/les-differents-types-capteurs.php>, Consulté le 01/07/2023 à 15h.
- [55] Mr. Zinedine.M S et Mr. Bouchena.H, mémoire master, Etude théorique d’un capteur solaire plan à air, université de adrar 2020-2021.
- [56] Bernard Grandjean, cours TRANSFERT DE CHALEUR, Volume 1 2013 UK, <https://docplayer.fr/33680898-Transfert-de-chaueur.html>.
- [57] <https://www.legarrec.com/entreprise/transfert-thermique-definition/#:~:text=Le%20transfert%20de%20chaleur%20par,al%C3%A9atoires%20C3%A0%20l%C3%A9chelle%20microscopique>, Consulté le 1/07/2023 à 19h.
- [58] Transferts thermiques, transparents de cours, MP, Lycée Montesquieu (Le Mans), Olivier Granier. [https://ressources.unisciel.fr/sillages/physique/thermo\\_2a\\_pc/res/pheno\\_transport.pdf](https://ressources.unisciel.fr/sillages/physique/thermo_2a_pc/res/pheno_transport.pdf)
- [59] <https://www.civisol.fr/info/8-les-panneaux-solaires-photovoltaïques>, Consulté le 28/05/2023 à 10h.
- [60] BECHKI Sara, Etude Numérique D’un Capteur Solaire Hybride PV/T, Université Kasdi Merbah Ouargla 2020.
- [61] <https://www.alufoil.cn/fr/news/stucco-embossed-aluminium-sheet-is-widely-used-in-refrigerator-freezer.html>, Consulté le 30/05/2023 à 10h.

[62] FICHE TECHNIQUE 4/20, [https://enerpatsudoe.fr/wp-content/uploads/2019/02/7\\_pdfsam\\_fiche-vf-finalisce-1.pdf](https://enerpatsudoe.fr/wp-content/uploads/2019/02/7_pdfsam_fiche-vf-finalisce-1.pdf), Consulté le 30/05/2023 à 12h.

[63]<https://www.amazon.fr/Disolation-Daluminium-R%C3%A9sistance-Ing%C3%A9nierie-Disolation/dp/B09MLT483M?th=1>, Consulté le 28/05/2023 à 11h.

[64] A.A. Al Qarni, Essam M. Elsaid, Abdel-Haleem Abdel-Aty, Mohamed R. Eid, “*Heat transfer efficacy and flow progress of tripartite diffusion in magneto-radiative Reiner-Philippoff nanofluid in porous Darcy-Forchheimer substance with heat source*”, Saudi Arabia.

[65] <https://www.alucobondusa.com/products.html>, Consulté le 30/05/2023 à 12h.

[66] Nesakumar Dharmakkan et al, “*Case Studies in Thermal Engineering*”, (2023).

[67] <https://dotspro.com/alucobond-cladding/>, Consulté le 02/06/2023 à 17h.

**Résumé** Ce travail consiste à l'étude de l'effet des nano-fluides en carbone intégrés comme caloporteur dans un système hybride Photovoltaïque /Thermique (PV/T) pour la production d'électricité et d'eau chaude. Pour ce faire, et après avoir conçu le système hybride photovoltaïque / thermique (PV/T) , par l'utilisation du logiciel SolidWorks, nous l'avons réalisé avec l'intégration d'un refroidisseur et un circuit électrique d'affichage des valeurs de température à l'entrée et à la sortie des systèmes (PV/T) ainsi que la température ambiante et la tension des panneaux photovoltaïques. Les résultats obtenus confirment que l'efficacité du système PV/T est grandement influencée et augmentée par l'intégration des nano-fluides en carbone dans les échangeurs du système hybride PV/T.

**Mots clés** Nano fluides, Système hybride, Panneaux photovoltaïque, photovoltaïque / thermique.

**Abstract** This work consists of the study of the effect of carbon nano-fluids integrated as heat transfer in a hybrid Photovoltaic/Thermal (PV/T) system for the production of electricity and hot water. To do this, and after having designed the hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) system, using SolidWorks software, we realized it with the integration of a cooler and an electrical circuit for displaying the values of temperature at the entry and exit of the systems (PV/T) as well as the ambient temperature and the voltage of the photovoltaic panels. The results obtained confirm that the efficiency of the PV/T system is greatly influenced and increased by the integration of carbon nano-fluids in the exchangers of the PV/T hybrid system.

**Key words** Nanofluids, hybrid system, Solar panels, Photovoltaic / Thermal .

**المخلص** يتعلق هذا العمل ب دراسة تأثير السوائل الكربون النانوية المدمجة في نظام هجين كهروضوئي / حراري ( PV / T ) لإنتاج الكهرباء والمياه الساخنة. من أجل ذلك، وبعد تصميم النظام الهجين الكهروضوئي/الحراري (PV/T)، من خلال استخدام برنامج SolidWorks، قمنا بدمج مبرد ودائرة كهربائية لعرض القيمة درجة الحرارة الداخلية والخارجية للأنظمة (PV/T) بالإضافة إلى درجة الحرارة المحيطة وتوتر الألواح الكهروضوئية. تؤكد النتائج التي تم الحصول عليها أن فعالية النظام PV/T تتأثر بشكل كبير وتزداد من خلال دمج سوائل الكربون النانوية في محولات النظام الهجين PV/T.

**كلمات مفتاحية** موانع النانو، ألواح ضوئية، كهروضوئي/ حراري، نظام هجين.