

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
*Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique*

*Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou*

*Faculté du Génie de la Construction*

*Département de Génie Mécanique*



# Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Mécanique

Option : Energétique

Spécialité : Energies Renouvelables

## THEME

**Etude et réalisation d'un système de refroidissement innovant d'un capteur solaire photovoltaïque**



Proposé et dirigé par :

Mr. S. MAKHLOUF

Promotion 2016/2017

Réalisé par :

MAHDAD Kocella

CHEBIL Aghiles

## Remerciements

Nous tenons à exprimer nos profonds remerciements et témoigner notre profonde gratitude à Mr S.MAKHLOUF, Professeur à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour son soutien et l'attention qu'il nous a portée et pour nous avoir guidés tout au long de ce travail. Ses précieux conseils nous ont été d'une grande utilité.

Nous exprimons aussi notre profonde gratitude à Mr LAGHROUCHE, Professeur à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, ainsi que le doctorant Mr SADAOUI, pour ces précieux conseils et sa disponibilité.

Nous voulons également exprimer toute notre reconnaissance aux personnels du laboratoire de Génie Civil.

Nous remercions vivement les membres de jury d'avoir accepté de juger ce précieux travail.

Nos sincères remerciements pour tous nos enseignants du département de Génie Mécanique.

Enfin, nous remercions, tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire, et spécialement

Mr BOUHRAOUA, ingénieur du laboratoire de béton, les doctorantes de Génie Mécanique, la doctorante d'Architecture ainsi que tous nos amis et camarades.

## Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes parents auxquels je dois tout mon respect et que je ne remercierai jamais assez pour leur amour, soutien, encouragements et conseils

A mes frère Jugurtha et Sofiane

A ma sœur Dyhia, son marie Lakrim et leurs fils Amazigh

A toute la famille MAHDAD

A mon cher ami et binôme Aghiles et toute sa famille

A mes très chers amis du département de Génie Mécanique

**MAHDAD Koceila**

Je dédie ce modeste travail à mes parents auxquels je dois tout mon respect et que je ne remercierai jamais assez pour leur amour, soutien, encouragements et conseils

A mes frères et mes sœurs

Samir, Lydia, Sofiane, Amel et Cylia

A toute la famille CHEBIL

A mon cher ami et binôme Koceila et toute sa famille

A mes très chers amis du département de Génie Mécanique

**CHEBIL Aghiles**

# Sommaire

Sommaire	i
Liste des figures	iv
Liste des tableaux	vii
Nomenclature	viii
Introduction générale	1
<b>Chapitre I : Généralités sur le rayonnement solaire</b>	
I.1. Introduction	3
I.2. Description du soleil	3
I.3. Mouvement de la terre autour du soleil	3
I.4. La sphère céleste	4
I.5. Les coordonnées célestes	5
I.5.1. Les coordonnées géographiques	5
I.5.2. Les coordonnées horaires	6
I.5.3. Les coordonnées horizontales	8
I.6. Trajectoire apparente du soleil	9
I.7. Spectre solaire incident	10
I.8. Durée d'insolation	12
I.9. Différents types de rayonnement	12
I.10. Appareils de mesure des différents types de rayonnements	14
I.11. Rayonnement solaire en Algérie	14
I.12. conclusion	15
<b>Chapitre II : Généralités sur les capteurs solaires</b>	
II.1. Introduction	16
II.2. Les capteurs solaires thermiques	16
II.2.1. Les différents types de capteurs solaires thermiques	16
II.2.1.1. Les capteurs solaires plans non-vitrés (capteurs moquette)	16
II.2.1.2. Les capteurs solaires plans vitrés	18
II.2.1.3. Les capteurs solaires à tubes sous vide	21
II.3. Les capteurs solaires photovoltaïques	22
II.3.1. La cellule photovoltaïque	22
II.3.1.1. Les différents types de cellules photovoltaïques	22
II.3.1.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	24
II.3.1.3. Facteurs influents sur le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	26
II.3.2. Le module photovoltaïque	27
II.4. Les capteurs solaires hybrides photovoltaïques/ thermiques	29
II.4.1. Les différents types de capteurs solaires hybrides PV/T	29
II.4.1.1. Les capteurs solaires hybrides PV/T à air	29
II.4.1.2. Les capteurs solaires hybrides PV/T à eau	30
II.4.1.3. Les capteurs solaires hybrides PV/T bi-fluides (eau, air)	31
II.4.2. Bibliographie sur les capteurs solaires hybrides PV/T	31
II.5. Conclusion	37

<b>Chapitre III : Les matériaux à changement de phase</b>	
III.1. Introduction	<b>38</b>
III.2. Stockage d'énergie thermique	<b>38</b>
III.2.1. Stockage par chaleur sensible	<b>38</b>
III.2.2. Stockage par chaleur latente	<b>38</b>
III.2.3. Comparaison entre le stockage par chaleur sensible et le stockage par chaleur latente	<b>40</b>
III.2.4. Les avantages de stockage par chaleur latente	<b>42</b>
III.3. Critère de choix d'un MCP	<b>42</b>
III.4. Les problèmes liés au changement de phase	<b>43</b>
III.5. Classification des matériaux à changement de phase (MCP)	<b>44</b>
III.5.1. Les composés organiques	<b>45</b>
III.5.1.1. Les composés organiques paraffiniques	<b>45</b>
III.5.1.1.1. Les avantages et les inconvénients des paraffines	<b>46</b>
III.5.1.2. Les composés organiques non paraffiniques	<b>47</b>
III.5.2. Les composés inorganiques	<b>47</b>
III.5.2.1. Les sels hydratés	<b>48</b>
III.5.2.1.1. Les avantages et les inconvénients des hydrates salins	<b>48</b>
III.5.3. Les eutectiques	<b>49</b>
III.6. Application des MCP	<b>49</b>
III.7. Méthodes de conditionnement des MCP	<b>49</b>
III.8. conclusion	<b>51</b>
<b>Chapitre IV : Matériels et méthodes</b>	
IV.1. Introduction	<b>52</b>
IV.2. Elaboration du composite	<b>52</b>
IV.2.1. Matériaux utilisés pour la préparation du composite	<b>52</b>
IV.2.2. Elaboration du composite MCP/Graphite/Maïzena	<b>56</b>
IV.3. Fabrication du conteneur et de l'échangeur	<b>57</b>
IV.4. Remplissage du conteneur avec le composite	<b>60</b>
IV.5. Campagne de mesures des températures	<b>60</b>
IV.6. Les modifications subites par le prototype	<b>64</b>
IV.7. Conclusion	<b>65</b>
<b>Chapitre V : Résultats et discussion</b>	
V.1. Introduction	<b>66</b>
V.2. Sans utilisation du fluide caloporteur (on utilise seulement le MCP)	<b>66</b>
V.2.1. Toutes les températures mesurées	<b>70</b>
V.2.2. La température des cellules des panneaux PV	<b>71</b>
V.2.3. La température de la surface des panneaux PV	<b>72</b>
V.2.4. La température du MCP	<b>73</b>
V.3. En utilisant la MCP et le fluide caloporteur	<b>73</b>
V.3.1. Toutes les températures mesurées	<b>78</b>
V.3.2. La température des cellules des panneaux PV	<b>79</b>
V.3.3. La température de la surface des panneaux PV	<b>80</b>
V.3.4. La température de l'eau à la sortie de l'échangeur	<b>81</b>
V.3.5. La température du MCP	<b>82</b>

V.4. Conclusion	<b>82</b>
<b>Chapitre VI : Simulation numérique</b>	
VI.1. Introduction	<b>83</b>
VI.2. Logiciel utilisé	<b>83</b>
VI.3. Les résultats de la simulation	<b>84</b>
VI.3.1. Sans utilisation du fluide caloporteur (seulement le MCP)	<b>84</b>
VI.3.1.1. Le courant	<b>88</b>
VI.3.1.2. La tension	<b>88</b>
VI.3.1.3. La puissance	<b>89</b>
VI.3.1.4. Le rendement	<b>90</b>
VI.3.2. Avec l'utilisation du MCP et du fluide caloporteur	<b>95</b>
VI.3.2.1. Le courant	<b>99</b>
VI.3.2.2. La tension	<b>99</b>
VI.3.2.3. La puissance	<b>100</b>
VI.3.2.4. Le rendement	<b>101</b>
VI.4. Conclusion	<b>106</b>
Conclusion générale	<b>107</b>
Références bibliographiques	

# Liste des figures

<b>Chapitre I</b>		
<b>Figure I.1</b>	Le mouvement de la terre autour du soleil	<b>4</b>
<b>Figure I.2</b>	La sphère céleste	<b>4</b>
<b>Figure I.3</b>	Coordonnées géographiques terrestre	<b>6</b>
<b>Figure I.4</b>	Déclinaison solaire	<b>7</b>
<b>Figure I.5</b>	La déclinaison solaire en fonction du numéro du jour	<b>7</b>
<b>Figure I.6</b>	Les coordonnées horaires	<b>8</b>
<b>Figure I.7</b>	Coordonnées horizontales	<b>9</b>
<b>Figure I.8</b>	Angle incident	<b>9</b>
<b>Figure I.9</b>	Mouvement apparent du soleil	<b>10</b>
<b>Figure I.10</b>	Spectre solaire	<b>10</b>
<b>Figure I.11</b>	Description du coefficient de masse d'aire	<b>11</b>
<b>Figure I.12</b>	Répartition spectrale du rayonnement solaire	<b>12</b>
<b>Figure I.13</b>	Composant du rayonnement solaire	<b>13</b>
<b>Figure I.14</b>	Appareils de mesure du rayonnement solaire	<b>14</b>
<b>Figure I.15</b>	Irradiation solaire en Algérie	<b>15</b>
<b>Chapitre II</b>		
<b>Figure II.1</b>	Capteurs solaires plans non-vitrés (moquette)	<b>17</b>
<b>Figure II.2</b>	Installation de production d'eau chaude sanitaire	<b>18</b>
<b>Figure II.3</b>	Capteur solaire plan vitré	<b>18</b>
<b>Figure II.4</b>	Différents éléments d'un capteur plans vitré à circulation liquide	<b>19</b>
<b>Figure II.5</b>	Principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan	<b>20</b>
<b>Figure II.6</b>	Panneau solaire thermique plan vitré à air	<b>21</b>
<b>Figure II.7</b>	Capteur solaire à tube sous vide	<b>21</b>
<b>Figure II.8</b>	Cellules monocristallines	<b>23</b>
<b>Figure II.9</b>	Cellule poly-cristalline	<b>23</b>
<b>Figure II.10</b>	Cellule en silicium amorphe	<b>24</b>
<b>Figure II.11</b>	Schéma de la matière, cas sans et avec dopage	<b>24</b>
<b>Figure II.12</b>	Formation de la jonction P-N	<b>25</b>
<b>Figure II.13</b>	Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	<b>26</b>
<b>Figure II.14</b>	Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque	<b>26</b>
<b>Figure II.15</b>	Influence de la température sur les cellules photovoltaïque	<b>27</b>
<b>Figure II.16</b>	Processus de fabrication d'un module photovoltaïque à base de silicium cristallin	<b>28</b>
<b>Figure II.17</b>	Module photovoltaïque	<b>29</b>
<b>Figure II.18</b>	Schéma du capteur solaire hybride PV/T à air	<b>30</b>
<b>Figure II.19</b>	Caractérisation d'un panneau solaire hybride PV/T à eau	<b>30</b>
<b>Figure II.20</b>	Configuration du capteur hybride PV/T à air	<b>32</b>
<b>Figure II.21</b>	Banc d'essai du capteur solaire hybride PV/T à air	<b>33</b>
<b>Figure II.22</b>	Quelques exemples de modifications du capteur solaire hybride PV/T à air	<b>34</b>
<b>Figure II.23</b>	Coupe d'un capteur solaire hybride PV/T à eau	<b>35</b>

<b>Figure II.24</b>	Coupe transversale qui montre les différents composants du capteur solaire hybride PV/T à eau	<b>36</b>
<b>Figure II.25</b>	Capteur solaire hybride PV/T bi-fluides	<b>36</b>
<b>Chapitre III</b>		
<b>Figure III.1</b>	Evolution de la température d'un corps pur avec changement d'état	<b>39</b>
<b>Figure III.2</b>	L'enthalpie spécifique en fonction de la température	<b>40</b>
<b>Figure III.3</b>	Le phénomène de la surfusion	<b>44</b>
<b>Figure III.4</b>	Conditionnement des MCP dans un nodule	<b>50</b>
<b>Figure III.5</b>	Exemples de conditionnement du MCP	<b>50</b>
<b>Figure III.6</b>	Vue microscopique de la micro-encapsulation	<b>51</b>
<b>Chapitre IV</b>		
<b>Figure IV.1</b>	Les matériaux utilisés pour la préparation de composite	<b>52</b>
<b>Figure IV.2</b>	L'évolution de la température du MCP en fonction du temps	<b>53</b>
<b>Figure IV.3</b>	Structure cristalline du graphite	<b>54</b>
<b>Figure IV.4</b>	Vue microscopique du granulé de maïzena	<b>55</b>
<b>Figure IV.5</b>	Les différents composants du composite MCP/Graphite/Maïzena	<b>56</b>
<b>Figure IV.6</b>	Matériels utilisés pour la réalisation d'un échangeur	<b>57</b>
<b>Figure IV.7</b>	Les tubes de cuivre après leur nettoyage	<b>58</b>
<b>Figure IV.8</b>	Assemblage des coudes avec les petits tubes de cuivre	<b>58</b>
<b>Figure IV.9</b>	Soudure des tubes de cuivre avec les coudes pour obtenir un serpentin	<b>59</b>
<b>Figure IV.10</b>	Le conteneur utilisé	<b>59</b>
<b>Figure IV.11</b>	L'échangeur à l'intérieur d conteneur	<b>60</b>
<b>Figure IV.12</b>	Le conteneur remplie avec le composite	<b>60</b>
<b>Figure IV.13</b>	Les deux panneaux photovoltaïques utilisés	<b>61</b>
<b>Figure IV.14</b>	Capteur de température	<b>61</b>
<b>Figure IV.15</b>	Les capteurs de températures utilisés	<b>62</b>
<b>Figure IV.16</b>	Le composite après solidification	<b>65</b>
<b>Figure IV.17</b>	Le prototype après modifications	<b>65</b>
<b>Chapitre V</b>		
<b>Figure V.1</b>	Les deux panneaux photovoltaïques utilisés	<b>66</b>
<b>Figure V.2</b>	Les températures en fonction du temps	<b>70</b>
<b>Figure V.3</b>	Température des cellules en fonction du temps	<b>71</b>
<b>Figure V.4</b>	Température de la surface des deux panneaux PV en fonction du temps	<b>72</b>
<b>Figure V.5</b>	Température du MCP en fonction du temps	<b>73</b>
<b>Figure V.6</b>	Les températures en fonction du temps	<b>78</b>
<b>Figure V.7</b>	Température des cellules en fonction du temps	<b>79</b>
<b>Figure V.8</b>	Température de la surface des panneaux PV en fonction du temps	<b>80</b>
<b>Figure V.9</b>	L'évolution de la température de l'eau à la sortie de l'échangeur en fonction du temps	<b>81</b>
<b>Figure V.10</b>	Température du MCP en fonction du temps	<b>82</b>

## Chapitre VI

<b>Figure VI.1</b>	Le logiciel PSIM	<b>84</b>
<b>Figure VI.2</b>	Le courant en fonction du rayonnement (cas sans fluide caloporteur)	<b>88</b>
<b>Figure VI.3</b>	La tension en fonction du rayonnement (cas sans fluide caloporteur)	<b>89</b>
<b>Figure VI.4</b>	La puissance en fonction du rayonnement (cas sans fluide caloporteur)	<b>90</b>
<b>Figure VI.5</b>	Le rendement en fonction du rayonnement (cas sans fluide caloporteur)	<b>94</b>
<b>Figure VI.6</b>	Le courant en fonction du rayonnement (cas avec le MCP et le fluide caloporteur)	<b>99</b>
<b>Figure VI.7</b>	La tension en fonction du rayonnement (cas avec le MCP et le fluide caloporteur)	<b>100</b>
<b>Figure VI.8</b>	La puissance en fonction du rayonnement (cas avec le MCP et le fluide caloporteur)	<b>101</b>
<b>Figure VI.9</b>	Le rendement en fonction du rayonnement (cas avec le MCP et le fluide caloporteur)	<b>106</b>

# Liste des tableaux

<b>Chapitre I</b>		
<b>Tableau I.1</b>	Potentiel de l'énergie solaire en Algérie	<b>14</b>
<b>Chapitre III</b>		
<b>Tableau III.1</b>	Les caractéristiques du MCP	<b>40</b>
<b>Tableau III.2</b>	Propriétés thermo-physiques des paraffines	<b>45</b>
<b>Tableau III.3</b>	Exemples de propriétés physiques de paraffines	<b>46</b>
<b>Tableau III.4</b>	Propriétés thermo physiques des acides gras	<b>47</b>
<b>Tableau III.5</b>	Différents hydrates salins	<b>48</b>
<b>Tableau III.6</b>	Liste de quelques eutectiques	<b>49</b>
<b>Chapitre IV</b>		
<b>Tableau IV.1</b>	Les différents acides gras contenus dans la graisse de coprah	<b>54</b>
<b>Tableau IV.2</b>	Propriétés physique et chimiques du graphite	<b>54</b>
<b>Tableau IV.3</b>	Caractéristique du capteur de température	<b>61</b>
<b>Chapitre V</b>		
<b>Tableau V.1</b>	Résultats obtenus en utilisant seulement le MCP le 13/06/2017	<b>67</b>
<b>Tableau V.2</b>	Résultats obtenus en utilisant seulement le MCP le 05/10/2017	<b>68</b>
<b>Tableau V.3</b>	Résultats obtenus en utilisant le MCP et le fluide caloporteur le 05/10/2017	<b>74</b>
<b>Tableau V.4</b>	Résultats obtenus en utilisant le MCP et le fluide caloporteur le 05/10/2017	<b>76</b>
<b>Chapitre VI</b>		
<b>Tableau VI.1</b>	Résultats de la simulation en utilisant seulement le MCP le 13/07/2017	<b>84</b>
<b>Tableau VI.2</b>	Résultats de la simulation en utilisant seulement le MCP le 05/10/2017	<b>86</b>
<b>Tableau VI.3</b>	Les rendements en fonction du rayonnement (cas avec seulement le MCP)	<b>94</b>
<b>Tableau VI.4</b>	Résultats de la simulation en utilisant le MCP et le fluide caloporteur le 13/07/2017	<b>95</b>
<b>Tableau VI.5</b>	Résultats de la simulation en utilisant le MCP et le fluide caloporteur le 05/10/2017	<b>97</b>
<b>Tableau VI.6</b>	Les rendements en fonction du rayonnement (cas avec le MCP et le fluide caloporteur)	<b>105</b>

# Nomenclature

Caractère	Signification	Unité
<b>m</b>	Masse	<b>Kg</b>
<b>Z, H</b>	L'altitude	<b>M</b>
<b>J</b>	Numéro du jour de l'année	-
<b><math>\chi</math></b>	L'azimut	(°)
<b>S<sub>0</sub></b>	La durée du jour	<b>H</b>
<b>N</b>	Dopage type N	-
<b>P</b>	Dopage type P	-
<b>T</b>	Température	<b>°K ou °C</b>
<b>C</b>	Carbone	-
<b>Q</b>	Quantité de chaleur	<b>J</b>
<b>C<sub>p</sub></b>	Chaleur spécifique	<b>J/ (kg. K)</b>
<b>h</b>	Enthalpie massique	<b>J/kg</b>
<b>H</b>	Enthalpie	<b>J</b>
<b>L</b>	Chaleur latente de changement de phase	<b>J/kg</b>
<b>P<sub>max</sub></b>	Point de puissance maximale	<b>W</b>
<b>V<sub>max</sub></b>	Tension au point de puissance maximale	<b>V</b>
<b>I<sub>max</sub></b>	Courant au point de puissance maximale	<b>A</b>
<b>P<sub>f</sub></b>	Puissance fournie	<b>W</b>
<b>P<sub>r</sub></b>	Puissance reçue	<b>W</b>
<b><math>\Phi</math></b>	Longitude	(°)
<b><math>\theta</math></b>	Latitude	(°)
<b><math>\delta</math></b>	Déclinaison solaire	(°)
<b><math>\Omega</math></b>	Angle horaire	(°)
<b><math>\theta_z</math></b>	Angle zénithal	(°)
<b><math>\theta</math></b>	Angle que fait le soleil avec son zénith	(°)
<b><math>\omega_0</math></b>	Angle horaire au coucher du soleil	(°)
<b><math>\rho</math></b>	Masse volumique	<b>Kg/m<sup>3</sup></b>
<b>v</b>	Volume	<b>m<sup>3</sup></b>
<b>S</b>	Surface	<b>m<sup>2</sup></b>
<b><math>\eta</math></b>	Rendement PV	<b>%</b>

## Indices

<b>f</b>	Fusion
<b>V</b>	Vaporisation
<b>S</b>	Solide
<b>l</b>	Liquide
<b>f</b>	Fournie
<b>i</b>	Initiale

## Abréviations

<b>PV/T</b>	Photovoltaïque/ thermique
<b>PV</b>	Photovoltaïque
<b>ZCE</b>	Zone de charge d'espace
<b>MCP</b>	Matériau à changement de phase
<b>AM<sub>x</sub></b>	Air masse

# **Introduction générale**

# Introduction générale

---

L'énergie est la base de toute activité humaine. De nos jours, une grande partie de la demande mondiale en énergie est assurée à partir des ressources fossiles. Cependant, les réserves de combustibles fossiles sont limitées. En effet, on assiste à une croissance sans cesse de la demande énergétique mondiale d'une part, et d'autre part à l'épuisement inévitable des ressources fossiles, à plus ou moins long terme. Ce type de consommation d'énergie n'est pas neutre sur l'impact environnemental. Pour les hydrocarbures et le charbon par exemple, d'importantes émissions de gaz à effet de serre sont générées quotidiennement, jouant ainsi un rôle primordial au niveau du dérèglement climatique, de l'augmentation de la pollution et des émissions de gaz à effet de serre.

Ce constat incite au développement de nouvelles sources d'énergie qui sont renouvelables, non-polluantes (propre) et inépuisables assurant ainsi une durabilité et une protection de l'environnement qui est devenue un point très important.

De plus, les énergies renouvelables utilisent des sources inépuisables d'énergies d'origine naturelle : rayonnement solaire, vents, cycles de l'eau et du carbone dans la biosphère, flux de chaleur interne de la terre, effet du soleil sur les océans.

Parmi les énergies renouvelables qui connaissent jour après jour des développements considérables, l'énergie solaire qui est considérée depuis longtemps comme à l'origine de la majorité des énergies. En effet le rayonnement solaire constitue la ressource d'énergie la plus abondante sur terre.

Ainsi l'utilisation des cellules photovoltaïques comme convertisseurs d'énergie solaire a fait apparaître le besoin d'étudier ces systèmes afin de les optimiser, et par conséquent de développer l'exploitation de cette nouvelle source d'énergie renouvelable, propre et qui n'émet pas de gaz à effet de serre. Pour toutes ces dernières raisons, la branche solaire photovoltaïque mérite vraiment d'être mise à contribution.

Des expériences ont montré que les cellules photovoltaïques dépendent de plusieurs paramètres internes liés au dispositif lui-même. La technologie d'élaboration du dispositif photovoltaïque est extrêmement liée à l'entourage du fonctionnement : éclairage et température, qui sont deux paramètres importants dans le comportement des cellules solaires. Ils influent énormément sur la caractéristique I-V de la cellule solaire, d'où l'importance de l'étude de l'influence de l'éclairage et de la température pour optimiser les performances des systèmes photovoltaïques puisqu'elles sont exposées au rayonnement solaire.

Ainsi notre projet consiste à refroidir un panneau photovoltaïque en utilisant un matériau à changement de phase, considéré à juste titre de la famille des matériaux dits intelligents qui reposent sur un principe physique simple : ils se liquéfient en absorbant de la chaleur à partir d'une certaine température caractéristique pour chaque type de matériau et restituent cette énergie lorsque la température de leur environnement est inférieure à celle-ci. Ils sont utilisés dans plusieurs domaines tels que : le stockage de l'énergie solaire, le refroidissement des boîtes de transport de produits sensibles (médicaments), les systèmes de mémoire permanente en informatique, les systèmes de climatisation (liquide frigorigène) ainsi que dans le domaine de la construction du bâtiment. On a aussi utilisé un échangeur de chaleur dans lequel circule

# Introduction générale

---

un fluide caloporteur (de l'eau) pour récupérer la chaleur restituée par le matériau à changement de phase durant sa cristallisation.

Notre étude consiste, en premier lieu, à élaborer un composite à base d'un MCP/ Graphite/ Maïzena qu'on verse dans un conteneur en acier inoxydable, fabriqué à cet effet à l'intérieur duquel est fixé un échangeur de chaleur afin de l'utiliser dans notre expérience qui a pour but de refroidir un panneau solaire photovoltaïque.

Le mémoire est scindé en six chapitres :

- On commence par une introduction générale.
- Le premier chapitre est consacré aux rappels sur l'énergie solaire, et les différents paramètres qui influent sur l'intensité du flux solaire reçu au niveau du sol.
- Le second chapitre est consacré aux généralités sur les capteurs solaires (thermiques, photovoltaïques et hybrides PV/T).
- Le troisième chapitre est consacré aux rappels sur les notions du stockage thermique et les matériaux à changement de phase.
- Le quatrième chapitre est consacré aux différents matériaux et aux différentes méthodes expérimentales utilisées.
- Le cinquième chapitre fera l'objet de l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus.
- Le dernier chapitre consiste à faire une simulation numérique des résultats obtenus.
- Le travail s'achèvera par une conclusion générale reprenant l'essentiel des résultats obtenus.

# **Chapitre I**

## **Généralités sur le rayonnement solaire**

# Généralités sur le rayonnement solaire

---

## I.1. Introduction

Les besoins énergétiques ne cessent de croître dans le monde. Malgré son énorme potentiel, l'énergie solaire ne correspond qu'à une partie négligeable de la production et de la consommation d'énergie en Algérie. Pourtant, l'exploitation du rayonnement solaire est compétitive à plusieurs niveaux par rapport aux autres sources d'énergies renouvelables. Il s'agit de la source d'énergie la plus répandue et la plus accessible sur terre [1].

L'exploitation de cette énergie et l'optimisation de sa collecte par les systèmes photovoltaïques ou thermiques nécessite une connaissance exacte de la distribution de l'irradiation solaire, qui est fonction de plusieurs paramètres géographiques, météorologiques et astronomiques, sur le lieu d'implantation de ce système [2].

Ainsi, ce premier chapitre est consacré pour donner des rappels sur l'énergie solaire et les différents paramètres qui influent sur l'intensité du flux solaire reçu au niveau du sol.

## I.2. Description du soleil

Le soleil est un énorme réacteur thermonucléaire, où l'hydrogène fusionne en hélium. L'énergie qu'il envoie dans toutes les directions est à la fois énorme (environ 10 000 fois les besoins terrestres), mais malheureusement assez diluée, puisque la puissance maximale reçue à l'extérieur de l'atmosphère sur une surface d'un mètre carré perpendiculaire à la direction du rayonnement est au maximum d'environ 1350 W (cette valeur est légèrement supérieure en hiver car la distance Terre-Soleil est minimale à ce moment-là).

Pour récupérer une quantité d'énergie importante, il faut donc nécessairement augmenter la surface qui intercepte le flux solaire. Concentrer le rayonnement solaire n'augmente pas la puissance, mais seulement le niveau de température pouvant être atteint [3].

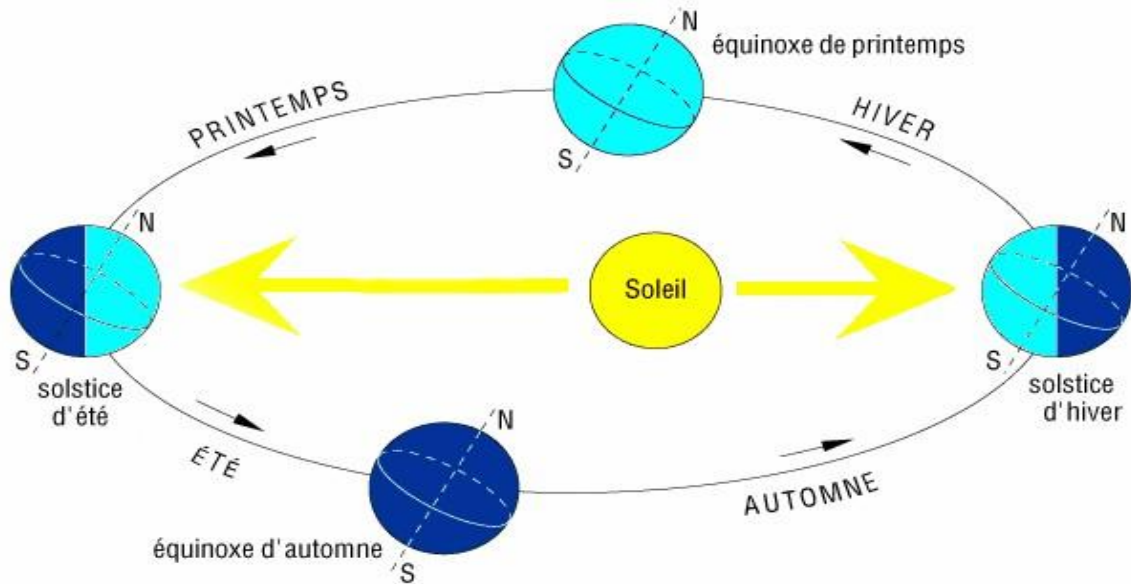
## I.3. Mouvement de la terre autour du soleil

La terre décrit autour du soleil une trajectoire légèrement elliptique dont le soleil occupe un foyer [4]. L'axe des pôles, autour duquel s'effectue le mouvement de rotation de la Terre, n'est pas perpendiculaire au plan de l'écliptique (figure I.1).

La terre tourne sur elle-même autour de l'axe des pôles et le plan équatorial, perpendiculaire à cet axe. Ainsi, la rotation et l'inclinaison de la Terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. Elle tourne autour du soleil en 365 jours 5h 48 mn 40s  $\approx 365,25$  jours.

La terre tourne avec une vitesse moyenne de 29,77 km/s (vitesse maximale en hiver 30,27 km/s et minimale en été 29,77 km/s). Ce mouvement s'effectue dans le sens trigonométrique et provoque le cycle des saisons [1].

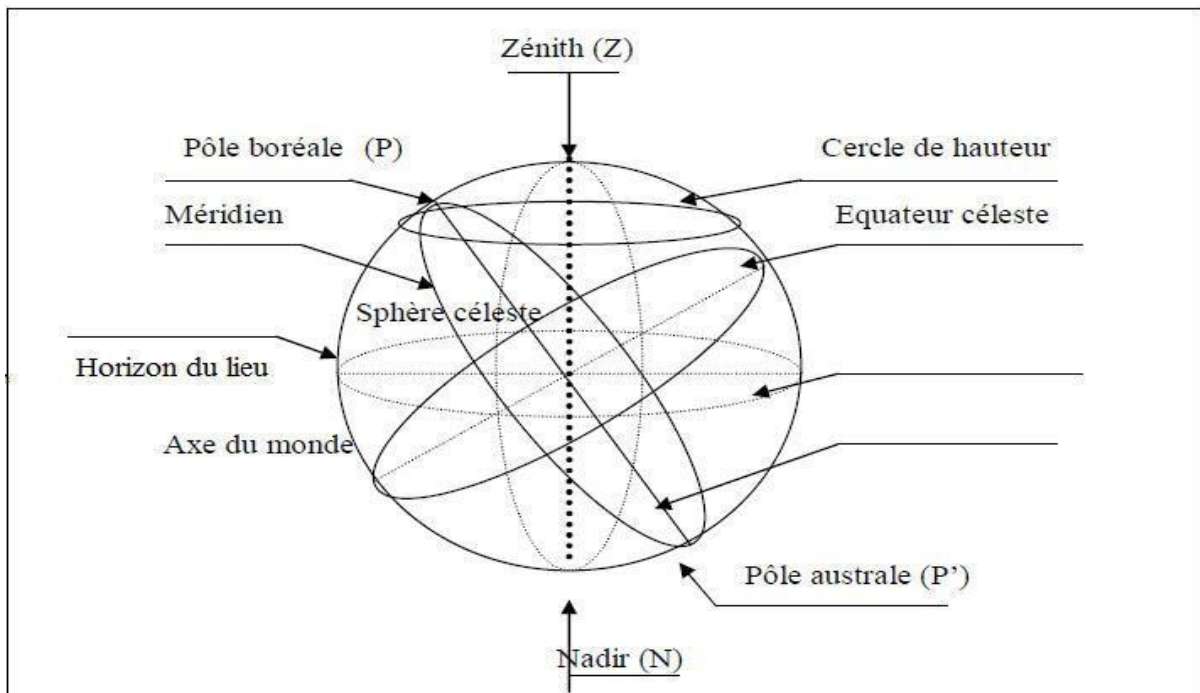
# Généralités sur le rayonnement solaire



*Figure I.1: Le mouvement de la terre autour du soleil [5].*

## I.4. La sphère céleste

La sphère céleste est une sphère imaginaire d'un diamètre immense, qui admet pour centre la terre, et pour rayon la distance (terre – soleil). On considère que tous les objets visibles dans le ciel se trouvent sur la surface de la sphère céleste. On peut résumer les différentes caractéristiques sur la sphère elle-même comme indiqué sur la figure (figure I.2) [6].



*Figure I.2 : La sphère céleste [6].*

# Généralités sur le rayonnement solaire

La direction des objets peut être quantifiée de façon précise à l'aide d'un système de coordonnées célestes.

## I.5. Les coordonnées célestes

### I.5.1. Les coordonnées géographiques

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre (figure I.3).

- **La longitude ( $\varphi$ )**

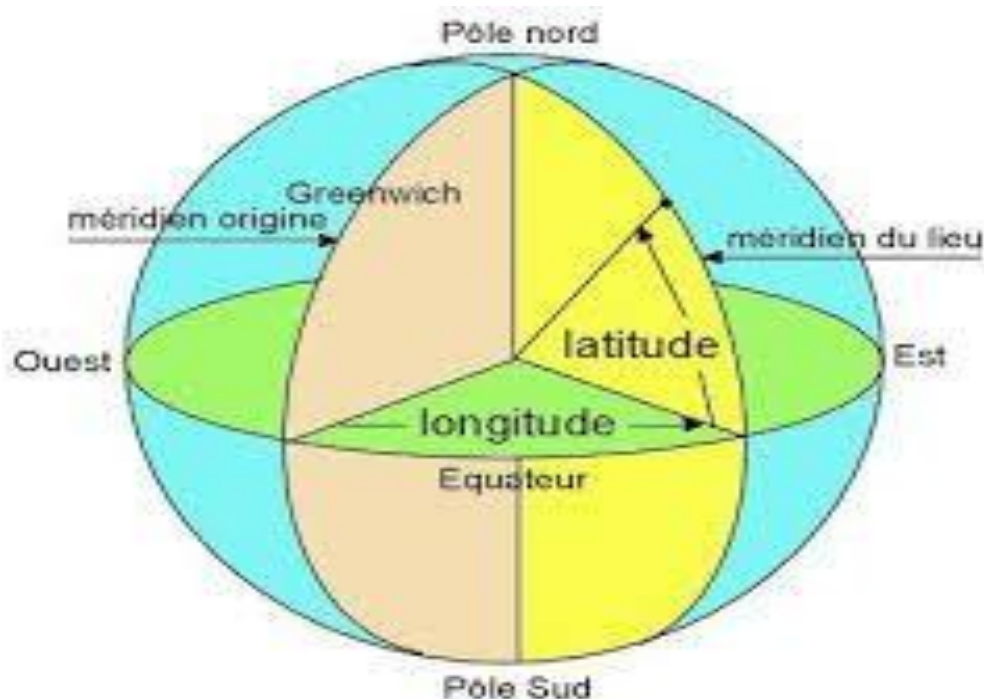
C'est l'angle formé par le méridien de **Greenwich** et le méridien du lieu considéré. Elle est comptée positivement vers l'Est et négativement vers l'Ouest.

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

C'est l'éloignement d'un point sur la surface de la terre par rapport à l'équateur, mesurée en degré (mesurée à partir du centre de la terre), permettent de repérer la distance angulaire d'un point quelconque à l'équateur. Elle varie de **0° à 90°** dans l'hémisphère Nord et de **0° à -90°** dans l'hémisphère Sud.

- **L'altitude (Z, H)**

C'est la distance verticale entre le point considéré et une surface de référence théorique (le niveau de la mer = 0), elle est exprimée en mètre.



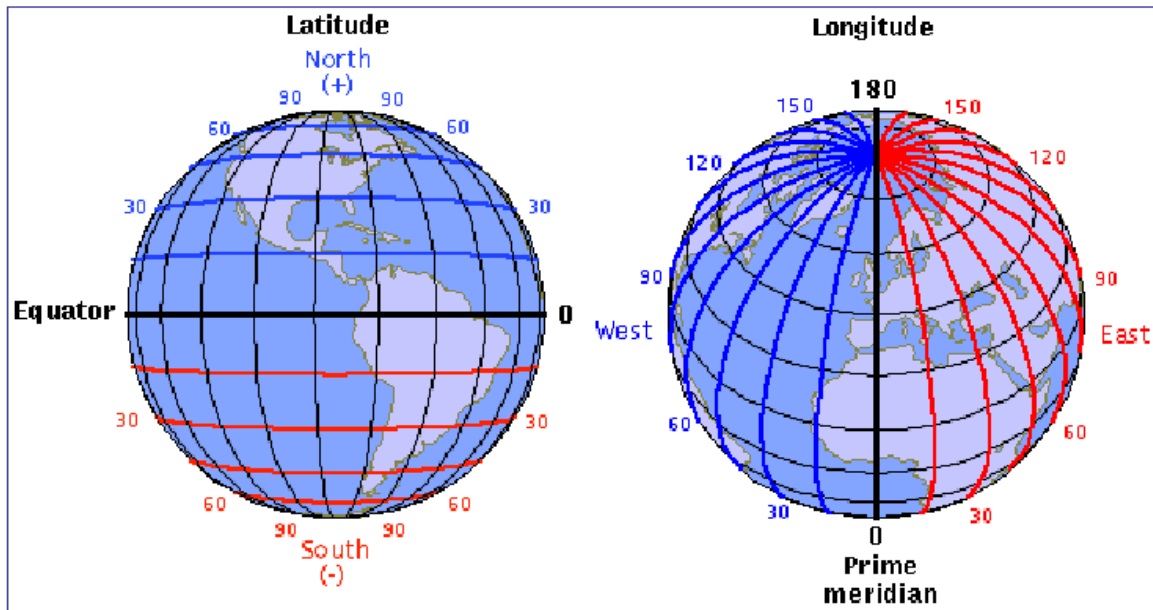


Figure. I.3 : Coordonnées géographiques terrestre [7].

## I.5.2. Les coordonnées horaires

Les coordonnées horaires sont liées à l'heure de l'observation et n'ont aucune relation avec la position d'un observateur sur la terre. Elles ont comme plan de référence, le plan de l'équateur [8].

- **Déclinaison solaire ( $\delta$ ):**

L'axe de rotation de la terre est incliné par rapport au plan de l'écliptique (plan dans lequel la terre se déplace autour du soleil).

La déclinaison est un angle qui permet de prendre en compte cette situation pour calculer la trajectoire apparente du soleil dans le ciel. Elle varie entre  $23,27^\circ$  au solstice d'été à  $-23,27^\circ$  au solstice d'hiver et nulle aux équinoxes, de manière sinusoïdale.

$$\delta = 23.45 \sin \left[ \frac{360(284+J)}{365} \right] \text{ [degré] [9].} \quad (\text{I.1})$$

**J:** numéro du jour de l'année

Cette déclinaison est responsable des saisons, car dans l'hémisphère Nord, les rayons nous parviennent avec un angle plus élevé en été, et plus bas sur l'horizon en hiver (c'est le contraire dans l'hémisphère Sud). Elle explique aussi que les différences saisonnières soient plus marquées vers les hautes latitudes [10].

# Généralités sur le rayonnement solaire

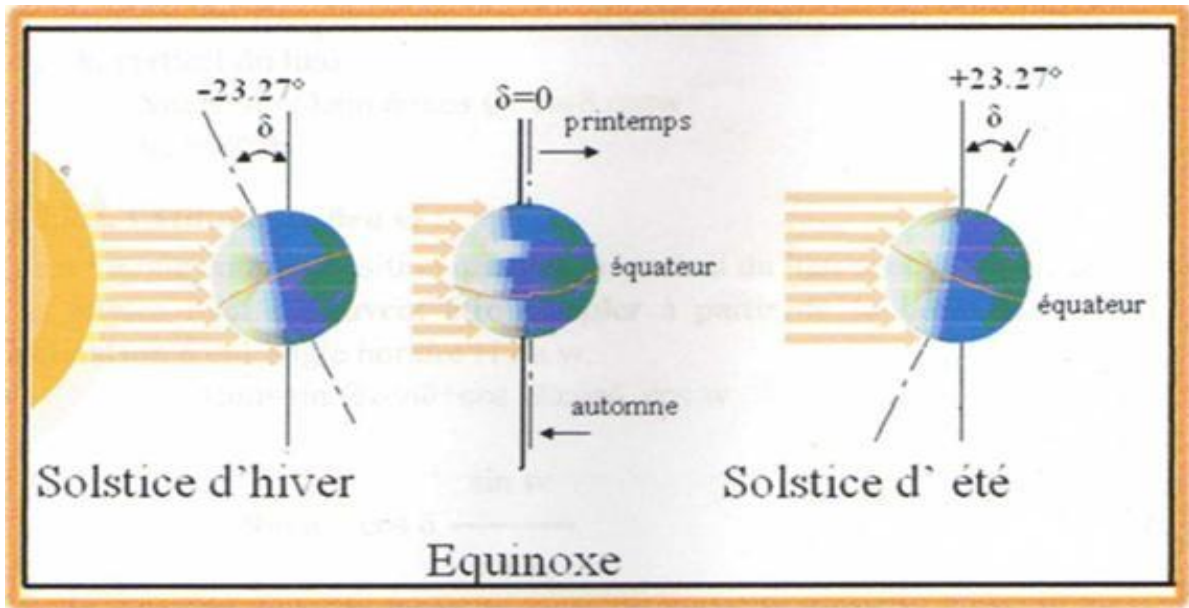


Figure I.4 : Déclinaison de soleil [11].

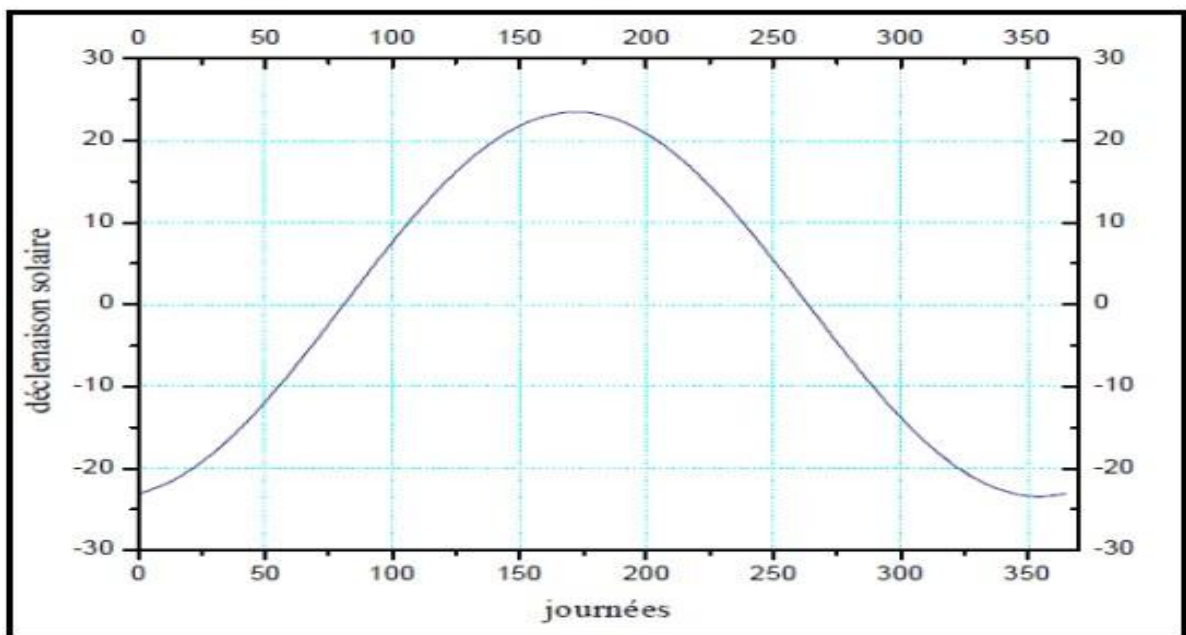


Figure I.5 : La déclinaison solaire en fonction du numéro du jour [12].

- **L'angle horaire ( $\omega$ )**

Il est déterminé par la rotation régulière de la terre autour de son axe. Il est compté positivement dans le sens rétrograde de  $0^\circ$  à  $360^\circ$  (figure I.6).

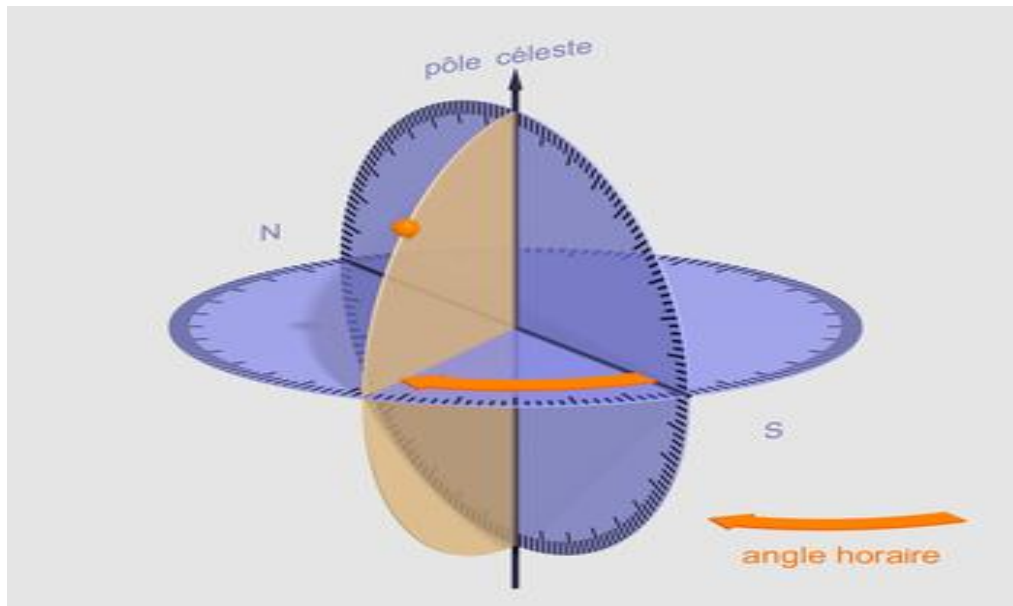


Figure I.6 : Les coordonnées horaires [13].

## I.5.3. Les coordonnées horizontales

Les coordonnées horizontales dépendent du lieu d'observation. Elles ont comme plan de référence le plan horizontal, perpendiculaire à la verticale du lieu. Un objet est repéré dans ce système de coordonnées par ces composantes :

- **L'azimut ( $\chi$ ) :**

Ou l'angle que fait la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal avec la direction sud. Il est compté de  $0^\circ$  à  $360^\circ$  d'Ouest en Est, ou de  $0^\circ$  à  $180^\circ$  à partir du sud vers l'ouest. La relation qui donne l'azimut est donnée par la relation ci-dessous :

$$\cos \chi = \sin \gamma \sin \theta - \sin \delta / \cos \gamma \cos \theta \quad (\text{I.2})$$

- **L'angle de la hauteur solaire ( $\gamma$ ) :**

Ou l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal du lieu. Il est compté de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  vers le **zénith** et de  $0^\circ$  à  $-90^\circ$  vers le **Nadir**. L'angle de la hauteur solaire est donné par la relation ci-dessous :

$$\sin \gamma = \sin \theta \sin \delta + \cos \delta \cos \omega \quad (\text{I.3})$$

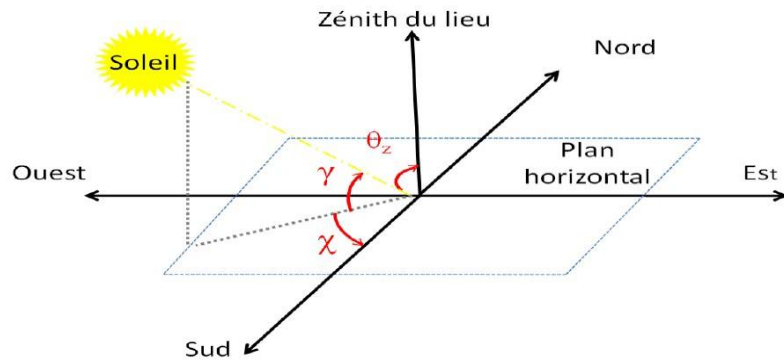
- **Angle zénithal  $\theta_z$  :**

C'est l'angle entre le Zénith local et la ligne joignant l'observateur et le soleil. Il varie de  $0$  à  $90^\circ$ . Cet angle est donné par la relation ci-dessous :

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \theta + \cos \varphi \cos \theta \cos \omega \quad (\text{I.4})$$

# Généralités sur le rayonnement solaire

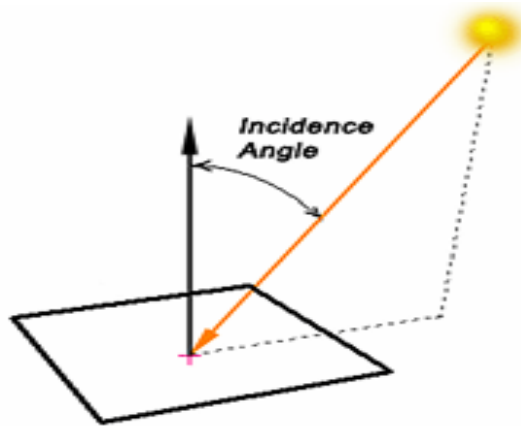
---



*Figure I.7 : Coordonnées horizontales [1].*

- **L'angle d'incidence:**

Cela correspond à l'angle formé par la normale du plan et les rayons du soleil. Cet angle a une grande importance. L'angle d'incidence optimal correspond à un angle de  $90^\circ$ .



*Figure I.8 : Angle incident [2].*

## I.6. Trajectoire apparente du soleil

Pour un observateur situé sur la surface de la terre, le soleil décrit une trajectoire apparente qui dépend de la latitude et la longitude du lieu où il se trouve.

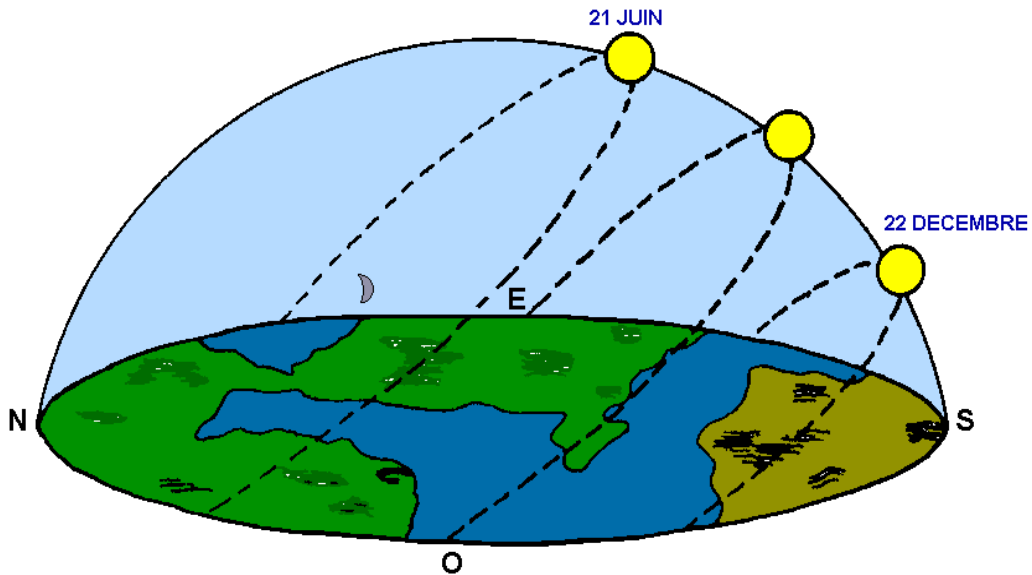


Figure I.9 : Mouvement apparent du Soleil [14].

## I.7. Spectre solaire incident

Le rayonnement solaire est sous la forme d'ondes électromagnétiques constituées de particules qui transportent l'énergie ; ces particules sont les photons. Chaque photon transporte un seul quantum d'énergie qui correspond à une longueur d'onde. Les flux de photons voyagent dans l'espace à la célérité de la lumière, et atteignent la terre à différentes longueurs d'ondes. A partir de ces longueurs d'ondes, on peut distinguer les différents types de rayons qui forment le spectre solaire (figure I.10), depuis les rayons X jusqu'aux ondes radio.

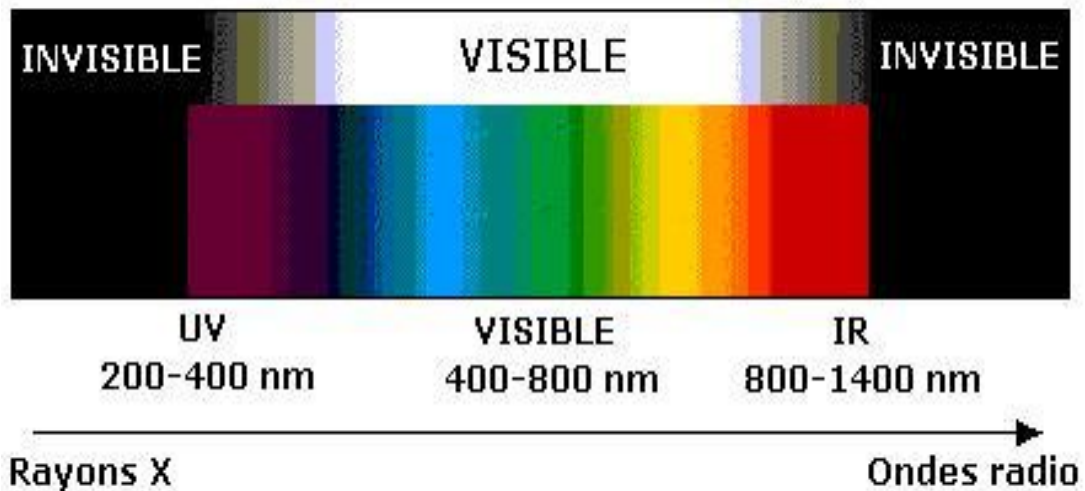


Figure I.10 : Spectre solaire [15].

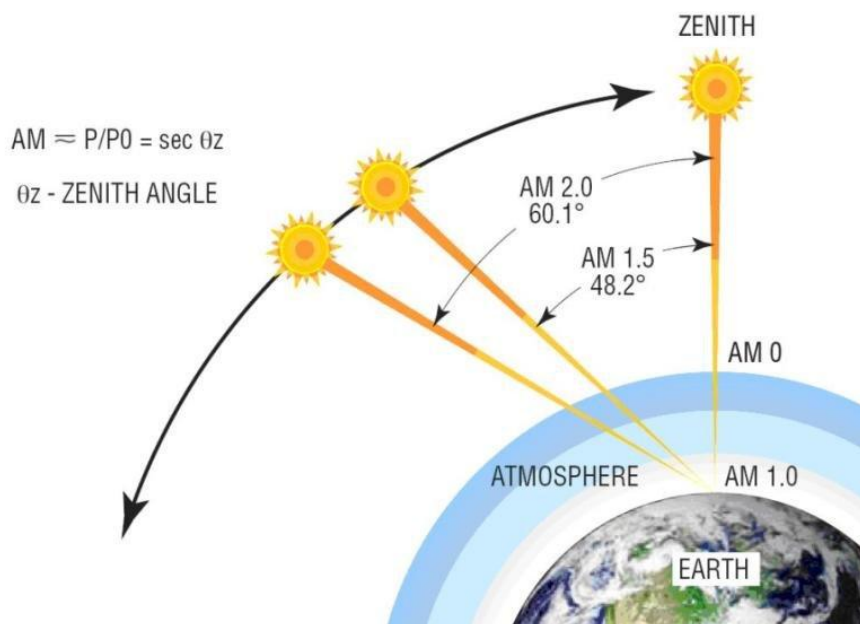
# Généralités sur le rayonnement solaire

L'intensité du rayonnement émis par le soleil, sous incidence normale par rapport à la surface de la terre, est d'environ  $1,36 \text{ kW/m}^2$  au-dessus de la couche atmosphérique. Cette intensité est appelée la constante solaire. Passant à travers l'atmosphère terrestre, le rayonnement solaire est atténué par des diffusions à partir des molécules d'air et des particules de poussière, ainsi que par des absorptions par les molécules présentes dans l'air, en particulier l'ozone, l'oxygène, le dioxyde de carbone et la vapeur d'eau. Tous ces phénomènes réduisent la constante solaire à  $1 \text{ kW/m}^2$  à la surface de la terre. Pour caractériser cet affaiblissement dans le domaine de l'énergie solaire, on utilise le coefficient de « masse d'air » AMx (Air Masse), où x est défini par :

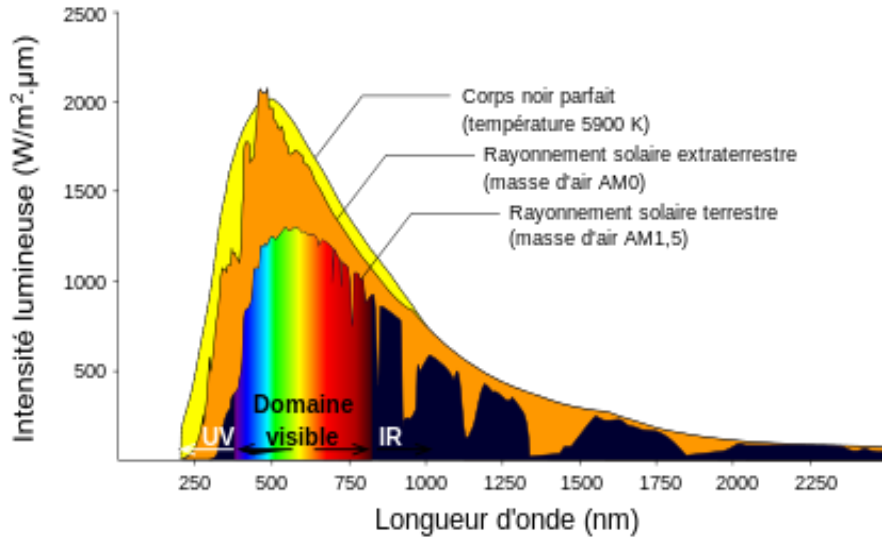
$$x = \frac{1}{\sin\theta} \quad (\text{I.5})$$

$\theta$  : l'angle que fait le soleil avec son zénith.

La désignation AM<sub>0</sub> correspond à l'éclairement solaire à incidence normale au-dessus de l'atmosphère. AM<sub>1</sub> correspond à cet éclairement lorsque la lumière arrive à la surface de la terre avec un angle incident de  $90^\circ$  (le soleil est au zénith). AM<sub>1.5</sub> correspond à cet éclairement lorsque la lumière atteint la surface de la terre avec un angle incident de  $48,2^\circ$  (figure I.11).



**Figure I.11** : Description du coefficient de masse d'air [16].



## I.8. Durée d'insolation

La durée d'insolation correspond à la durée pendant laquelle le rayonnement solaire direct, reçu sur un plan normal, dépasse un seuil fixé par la convention à  $120 \text{ W.m}^{-2}$ .

En absence permanente de nuages, la durée d'insolation est pratiquement égale à la durée du jour, qui s'appelle aussi la durée astronomique ou théorique du jour, elle est définie par :

$$S_0 = \frac{2}{15} \omega_0 \quad (\text{I.6})$$

$\omega_0$  : est égale à l'angle horaire au coucher du soleil ( $^\circ$ ).

$S_0$  : la durée du jour (h).

## I.9. Différents types de rayonnements

En traversant l'atmosphère terrestre, le rayonnement solaire est absorbé ou diffusé. On distingue plusieurs composantes :

- **Rayonnement direct**

C'est le rayonnement solaire atteignant directement la surface terrestre depuis le soleil. Il dépend de l'épaisseur de l'atmosphère que la radiation solaire doit traverser et de l'inclinaison des rayons par rapport au sol.

- **Rayonnement diffus**

Le rayonnement diffus se manifeste lorsque le rayonnement solaire direct se disperse dans les nuages et les particules atmosphériques. Le rayonnement diffus résulte de la diffraction de la lumière par les nuages et les molécules diverses en suspension dans l'atmosphère, et de sa réfraction par le sol. Il s'agit donc d'un rayonnement qui ne suit pas une direction définie par le soleil en direction du point d'observation à la surface de la terre.

# Généralités sur le rayonnement solaire

- **Rayonnement réfléchi (Albédo)**

Est par définition le pourcentage d'énergie solaire réfléchi vers l'espace par la terre et l'atmosphère par rapport à la quantité d'énergie reçue par celle-ci.

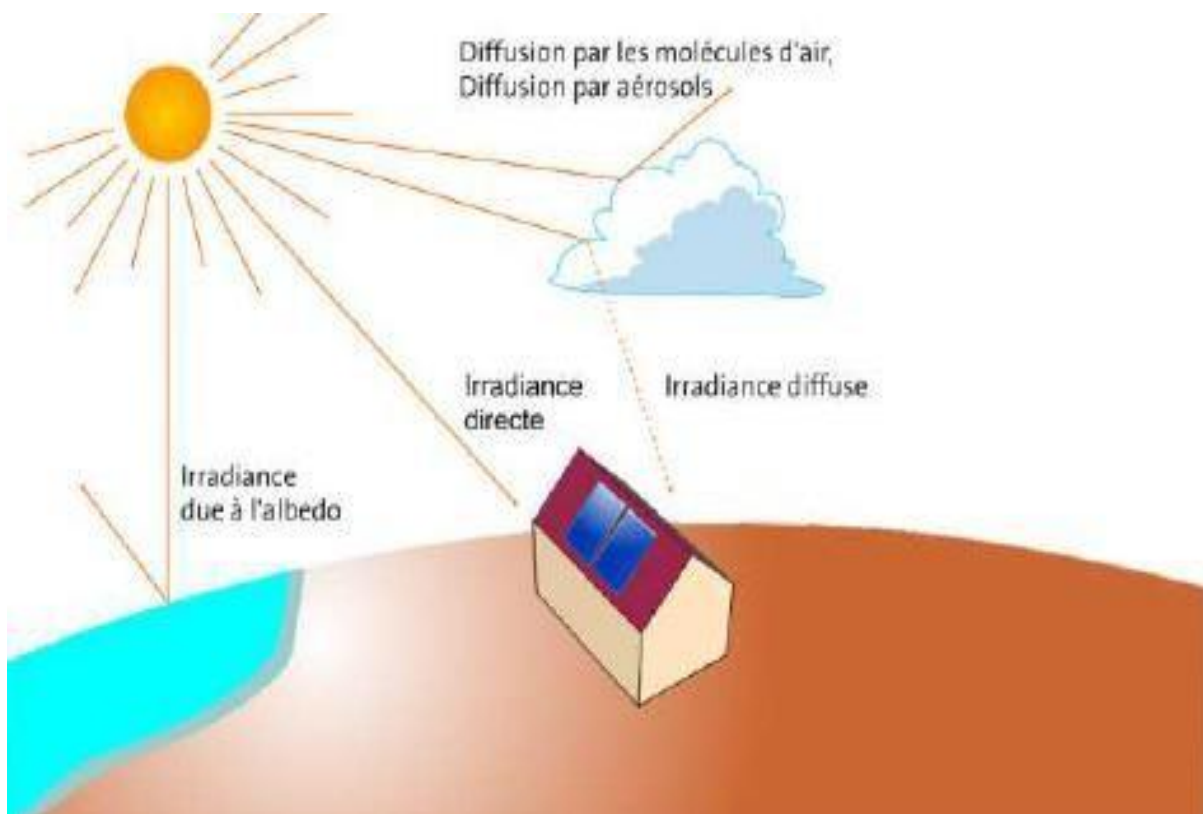
Cependant tous les corps n'ont pas le même pouvoir réflecteur. En effet, les corps noirs sont capables d'absorber toutes les ondes incidentes à leur surface, par contre, la neige, les nuages, les sols dépourvus de végétation sont les meilleurs réflecteurs.

- **Rayonnement global**

Le rayonnement global est l'énergie rayonnante totale du soleil, qui atteint une surface horizontale à la surface de la terre.

Le rayonnement global s'obtient en ajoutant trois types de rayonnement : le rayonnement direct, le rayonnement diffus et le rayonnement réfléchi (albédo).

**Rayonnement global = rayonnement direct + rayonnement diffus + albédo**



*Figure I.13 : Composant du rayonnement solaire [2].*

## I.10. Appareils de mesure des différents types de rayonnements



Figure I.14 : Appareils de mesure du rayonnement solaire [17].

## I.11. Rayonnement solaire en Algérie

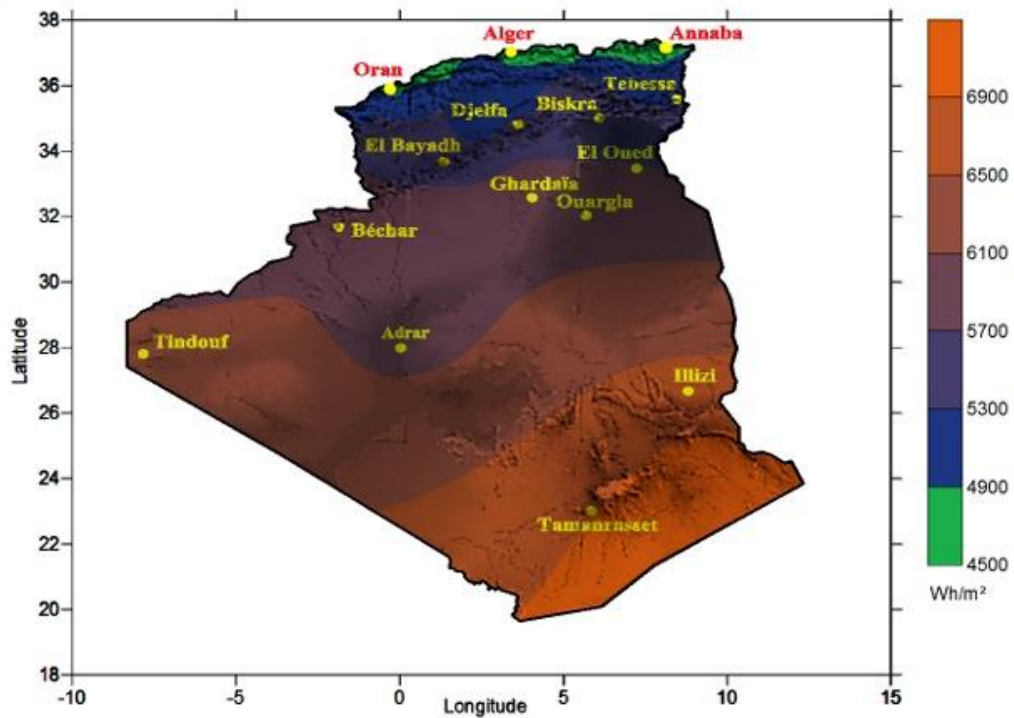
De part sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme surtout dans le Sud du pays, la durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2 000 heures annuellement et peut atteindre les 3 900 heures [2].

Tableau I.1 : Potentiel de l'énergie solaire en Algérie [18].

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficies (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

# Généralités sur le rayonnement solaire

Moyenne annuelle de l'irradiation Globale reçue sur une surface horizontale, Période 1992-2002



*Figure. I.15 : Irradiation solaire en Algérie [19].*

## I.12. Conclusion

L'énergie solaire est disponible sur l'ensemble du globe terrestre à différentes intensités.

Elle est entièrement renouvelable et inépuisable. Cependant cette énergie reste dépendante des conditions météorologiques qui rendent son exploitation difficile et son apport est variable au gré des jours et des saisons.

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions importantes sur le gisement solaire comme le mouvement de la terre autour du soleil, les coordonnées célestes et horaires. Ensuite, nous avons présenté les différents types de rayonnements (direct, diffus, réfléchi et global).

# **Chapitre II**

## **Généralités sur les capteurs solaires**

## II.1. Introduction

Les capteurs solaires permettent de récupérer l'énergie inépuisable du soleil sans émissions de gaz à effet de serre durant leur utilisation.

Ce sont des dispositifs séduisants qui présentent de nombreux avantages. L'inconvénient est qu'ils soient dépendants du caractère fluctuant du rayonnement solaire et restituent une énergie transformée que l'on ne sait pas bien stocker.

Il existe trois types de capteurs solaires :

- Les capteurs solaires photovoltaïques qui produisent de l'électricité.
- Les capteurs solaires thermodynamiques qui produisent de l'électricité
- Les capteurs solaires thermiques qui produisent de la chaleur.

Il existe aujourd'hui des capteurs hybrides (photovoltaïques et thermiques) délivrant de l'électricité et de la chaleur pour la production d'eau chaude.

## II.2. Les capteurs solaires thermiques

Le capteur solaire thermique est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie solaire transmise par rayonnement et la communiquer à un fluide caloporteur (gaz ou liquide) sous forme de chaleur. Cette énergie calorifique peut ensuite être utilisée pour le chauffage des bâtiments, pour la production d'eau chaude sanitaire ou encore dans divers procédés industriels.

### II.2.1. Les différents types de capteurs solaires thermiques

Il existe différents types de capteurs solaires thermiques selon le type d'application considérée, la nature de l'élément caloporteur utilisé et le niveau de température qu'ils permettent d'atteindre. Le type d'application peut aller du chauffage d'une piscine avec un capteur léger, à une centrale solaire thermodynamique produisant de l'électricité. Le fluide caloporteur peut être de l'air, de l'eau, un mélange antigél, un fluide à changement de phase, une huile qui ne se dégrade pas à haute température. La majeure partie des applications est celle du chauffage de l'eau sanitaire et celui du chauffage des locaux, avec des fluides caloporteurs liquides.

#### II.2.1.1. Les capteurs solaires plans non-vitrés (capteurs moquette)

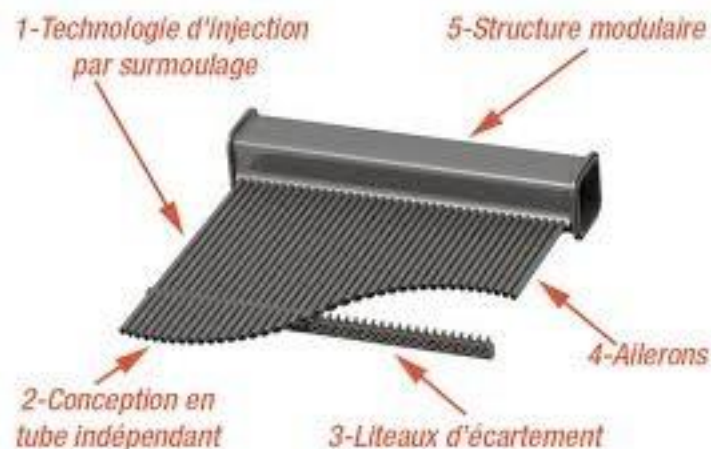
La moquette solaire est un capteur rudimentaire qui a un très bon rendement pour la plage de températures correspondant au réchauffage de l'eau d'une piscine. Elle apporte quelques degrés de plus à la température de l'eau et permet d'augmenter la période d'utilisation de la piscine. Très utilisée pour les piscines municipales.

Les capteurs non-vitrés sont généralement constitués d'une simple plaque de métal ou de matière plastique (absorbeur) sur laquelle sont collés plusieurs tubes porteurs de fluide caloporteur [20].

# Généralités sur les capteurs solaires

L'eau de la piscine est pompée jusqu'aux capteurs, se chauffe puis retourne à cette dernière avec une température plus importante. En règle générale, la surface des capteurs doit être de 25 à 40 % plus grande que la piscine.

Dans des conditions normales, avec une température ambiante de 15 °C, les capteurs peuvent augmenter la température de l'eau d'une dizaine de degrés.



**Figure II.1 :** Capteurs solaires plans non-vitrés (moquette) [21].

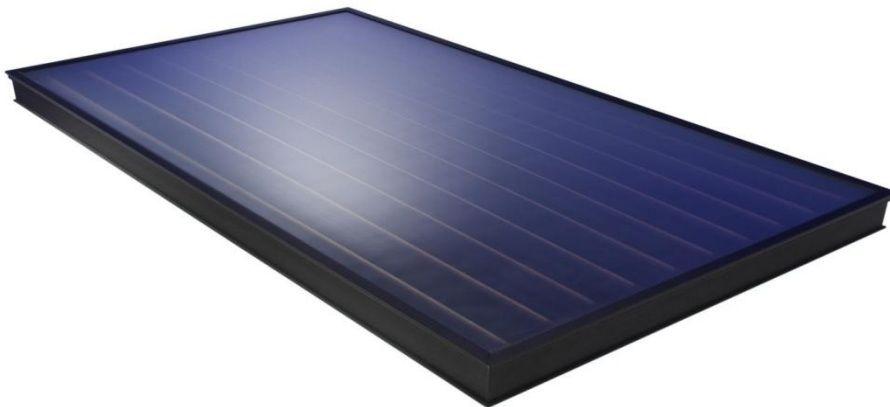
Les capteurs sans vitrage peuvent également être utilisés pour des installations de production d'eau chaude sanitaire. C'est en particulier le cas dans les régions chaudes et fortement ensoleillées. La parfaite intégration architecturale qu'autorise ce type de produit permet la mise en œuvre de surfaces plus importantes, pour compenser la différence d'efficacité avec des capteurs vitrés [22].



*Figure II.2 : Installation de production d'eau chaude sanitaire [22].*

## II.2.1.2. Les capteurs solaires plans vitrés

Les capteurs plans de types vitrés sont très répandus et ils existent sous forme de capteurs à circulation de liquide et sous forme de capteurs à air. Ces capteurs conviennent mieux à des applications à température modérée où la température désirée se situe entre 30 et 70°C, et/ou à des applications qui nécessitent de la chaleur au cours des mois d'hiver. Les capteurs à circulation de liquide sont plus communément utilisés pour le chauffage de l'eau chaude des résidences et des commerces, pour le chauffage des bâtiments, ainsi que celui des piscines intérieures. Les capteurs à air sont utilisés pour le chauffage des bâtiments, de l'air de ventilation et pour le séchage des récoltes et du foin dans les fermes.



*Figure II.3 : Capteur solaire plan vitré [24].*

# Généralités sur les capteurs solaires

## a) Capteurs solaires plans vitrés à circulation de liquide

### ➤ Les composants du capteur

Le capteur plan vitré à circulation liquide est généralement constitué d'un absorbeur, une couverture transparente (vitrage), une isolation thermique, un fluide caloporteur et un boîtier.

L'absorbeur est l'élément essentiel dans la conversion d'énergie, situé dans un coffrage (boîtier) isolé en face arrière et latérale. Il est souvent couvert d'un vitrage en face avant. Cet absorbeur peut être constitué d'une couche sélective noire qui augmente l'absorption de l'énergie solaire tout en limitant les pertes par rayonnement. Le vitrage quand à lui évite le refroidissement de l'absorbeur par le vent et crée un effet de serre qui augmente le rendement du capteur. L'isolation à l'arrière du capteur diminue les pertes de chaleur. Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température en traversant le capteur.



*Figure II.4 : Différents éléments d'un capteur plan vitré à circulation liquide [22].*

### ➤ Principe de fonctionnement

Une partie du rayonnement solaire qui arrive sur la vitre la traverse pour atteindre la plaque absorbante. Cette dernière s'échauffe et transfère la chaleur au fluide caloporteur qui circule dans les tubes. Comme tout corps qui s'échauffe, l'absorbeur émet un rayonnement (essentiellement dans l'infrarouge) qui est réfléchi par la vitre, c'est le principe de « l'effet de serre ». L'isolant a pour fonction de minimiser les déperditions thermiques avec l'extérieur. En effet, la grande partie de l'énergie absorbée doit être transmise au fluide, il faut donc minimiser le flux de chaleur avec le milieu extérieur (environnement).

# Généralités sur les capteurs solaires

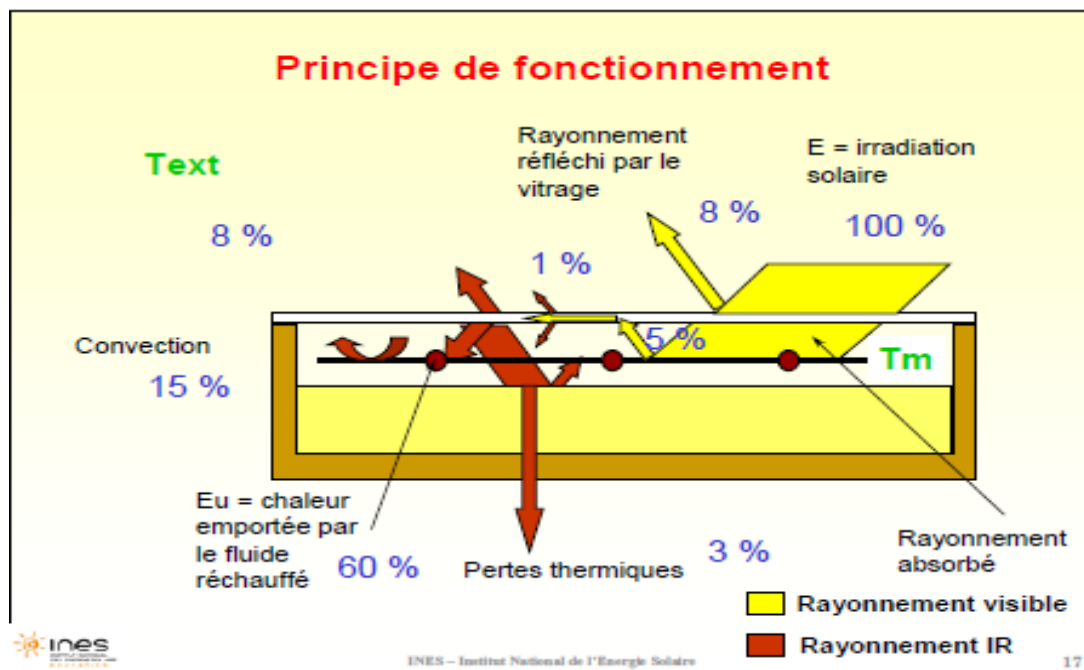


Figure II.5 : Principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan [3]

## b) Capteurs solaires plans vitrés à air

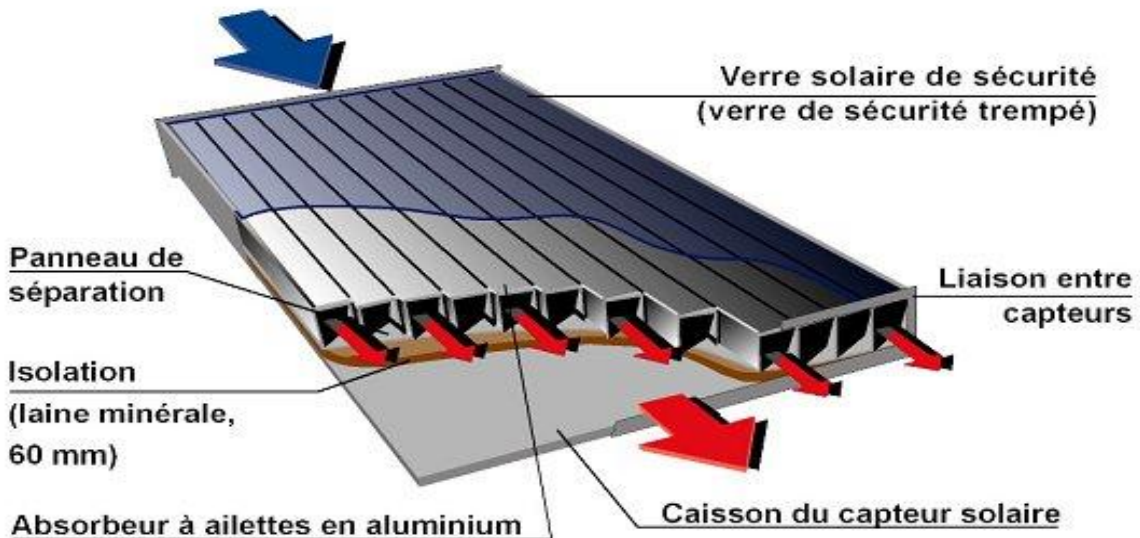
Dans ce type de capteur, un absorbeur plan transforme, de façon efficace, les rayons solaires en chaleur. Afin de réduire au minimum la perte de chaleur, la plaque est située entre un vitrage (vitre plane ou matériau transparent) et un panneau isolant. Le vitrage est choisi de telle sorte qu'une quantité maximale de rayons solaires le traverse et atteigne l'absorbeur.

L'énergie qui est recueillie des capteurs solaires à air peut être utilisée pour le chauffage de l'air de ventilation, le chauffage des locaux, et le séchage des récoltes. Dans certains pays, l'utilisation la plus répandue est le chauffage de l'air de ventilation.

Ces capteurs sont habituellement plus légers que les capteurs à circulation de liquide puisqu'ils n'ont pas de canalisations sous pression.

Les capteurs à air présentent l'avantage de ne pas avoir de problèmes de congélation ni d'ébullition.

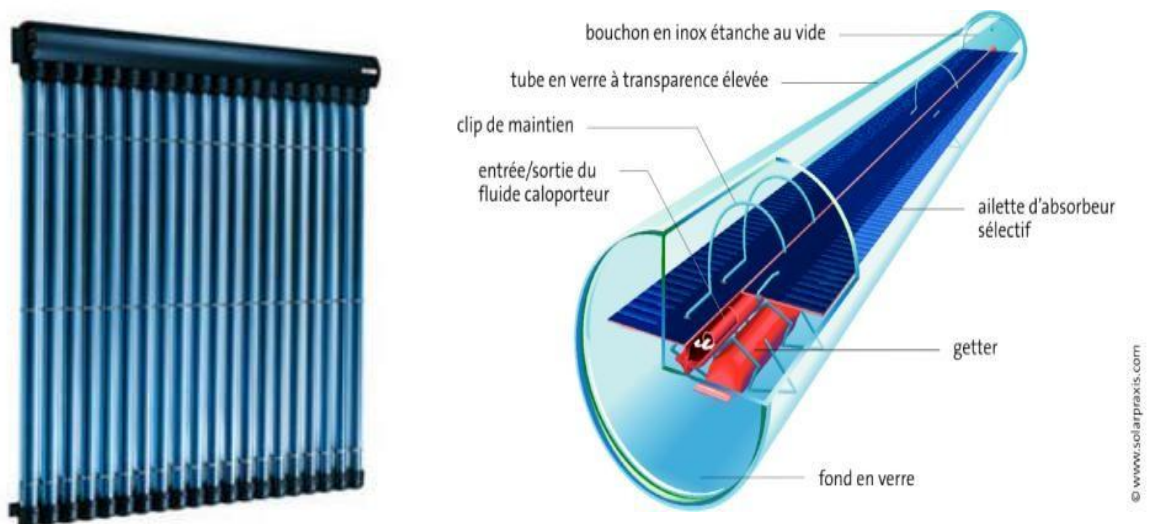
# Généralités sur les capteurs solaires



*Figure II.6 : Panneau solaire thermique plan vitré à air [25].*

## II.2.1.3. Les capteurs solaires à tubes sous vide

Le capteur sous vide est constitué d'une série de tubes de verre sous vide à l'intérieur desquels se trouve un absorbeur avec un circuit hydraulique (un échangeur), qui capte l'énergie solaire et la transfère au fluide caloporteur. Grâce aux propriétés isolantes du vide, les déperditions de chaleur sont faibles. Ainsi, on peut obtenir des gains de température de 100°C et plus. Ce type de capteur est particulièrement bien adapté aux applications nécessitant des hautes températures.



*Figure II.7 : Capteur solaire à tubes sous vide [25].*

# Généralités sur les capteurs solaires

---

## ➤ Principe de fonctionnement

Le fluide caloporteur circule à l'intérieur d'un double tube sous vide avec le même principe que le capteur plan vitré, l'isolation étant simplement assuré par le vide, qui permet de réduire significativement les déperditions thermiques.

## II.3. Les capteurs solaires photovoltaïques

Le mot «photovoltaïque» vient du grec « phôtos» signifiant lumière et «Volta» vient du nom du physicien italien qui, en 1800, découvrit la pile électrique. Mais c'est en 1839 que le français Antoine Edmond Becquerel qui fut le premier à mettre en évidence cette conversion particulière d'énergie [26].

Un panneau solaire fonctionne par effet photovoltaïque, qui est un phénomène physique qui consiste à établir une force électromotrice liée à l'absorption d'énergie lumineuse dans un solide, c'est le seul moyen connu actuellement pour convertir directement la lumière en électricité.

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module photovoltaïque). Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque. Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique - l'effet photovoltaïque - ou la technologie associée.

### II.3.1. La cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque ou encore photopile est le premier maillon de la chaîne de conversion solaire photovoltaïque. C'est une plaquette de silicium (semi-conducteur), capable de convertir directement la lumière du soleil en électricité. Cet effet est appelé l'effet photovoltaïque. Le courant obtenu est un courant continu et la valeur de la tension obtenue est de l'ordre de 0.5 V.

#### II.3.1.1. Les différents types de cellules photovoltaïques

##### a) Les cellules en silicium monocristallin

Elles ont le meilleur rendement (de 12 à 18 % voire jusqu'à 24.7 % en laboratoire). Cependant, elles coûtent trop cher, dû à leur fabrication complexe.

# Généralités sur les capteurs solaires

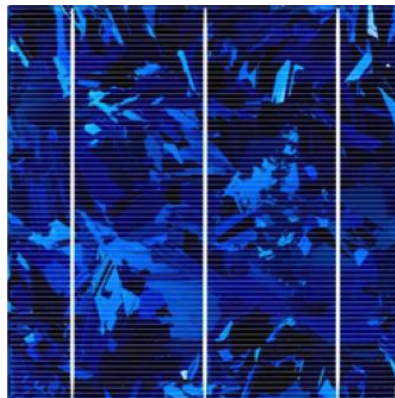
---



*Figure II.8 : Cellules monocristallines [27].*

## **b) Les cellules en silicium poly-cristallin**

Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important. Cependant leur rendement est plus faible : de 11 % à 15 % jusqu'à 19.8 % en laboratoire).



*Figure II.9 : Cellule poly-cristalline [27].*

## **c) Les cellules en silicium amorphe**

Elles ont un faible rendement (5 % à 8 % jusqu'à 13 % en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation, telles que des calculatrices solaires ou encore des montres. L'avantage de ce dernier type est le fonctionnement avec un éclairage faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment).

# Généralités sur les capteurs solaires

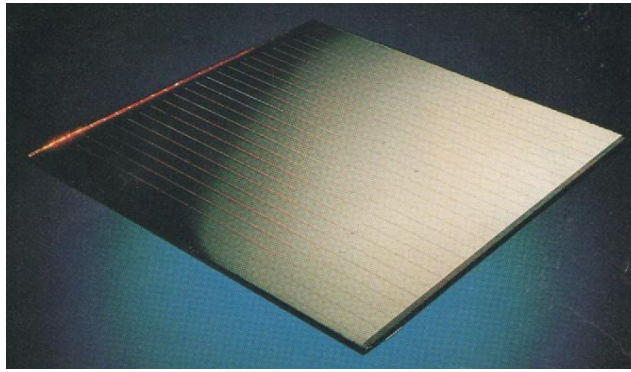


Figure II.10 : Cellule en silicium amorphe [27].

## II.3.1.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Dans un semi-conducteur exposé à la lumière, un photon d'énergie suffisante arrache un électron à la matrice, créant au passage un « trou ». Normalement, l'électron trouve rapidement un trou pour se recombiner, et l'énergie apportée par le photon est ainsi dissipée. Le principe d'une cellule photovoltaïque est de forcer les électrons et les trous à se diriger chacun vers une face opposée du matériau au lieu de se recombiner en son sein : ainsi, il apparaîtra une différence de potentiel et donc une tension entre les deux faces, comme dans une pile. L'une des solutions, couramment utilisée, pour extraire sélectivement les électrons et les trous utilise un champ électrique au moyen d'une jonction PN, entre deux couches dopées respectivement P et N [27].

La couche supérieure de la cellule est composée d'un semi-conducteur dopé N (généralement dopé avec du phosphore). Dans cette couche, il existe une quantité d'électrons libres supérieure à celle du matériau intrinsèque (non dopé), d'où l'appellation de dopage N, comme négatif (charge de l'électron). Le matériau reste électriquement neutre : c'est le réseau cristallin qui supporte globalement une charge négative. La couche inférieure de la cellule est composée d'un semi-conducteur dopé P (généralement dopé avec du bore). Cette couche possèdera donc en moyenne une quantité d'électrons libres inférieure à celle du matériau intrinsèque (non dopé), les électrons sont liés au réseau cristallin qui, en conséquence, est chargé positivement. La conduction électrique est assurée par des trous, positifs (P).

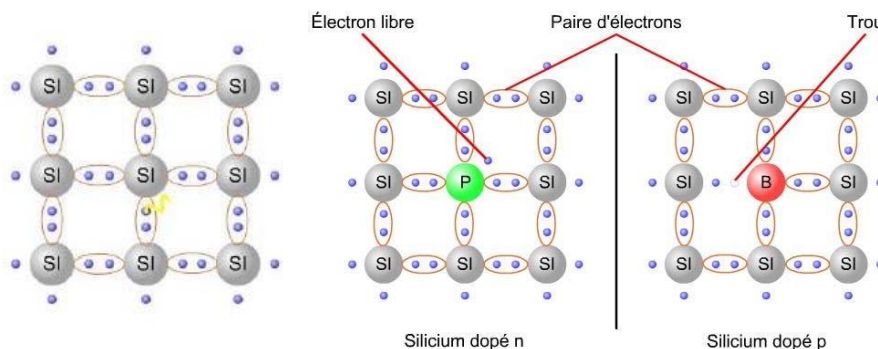
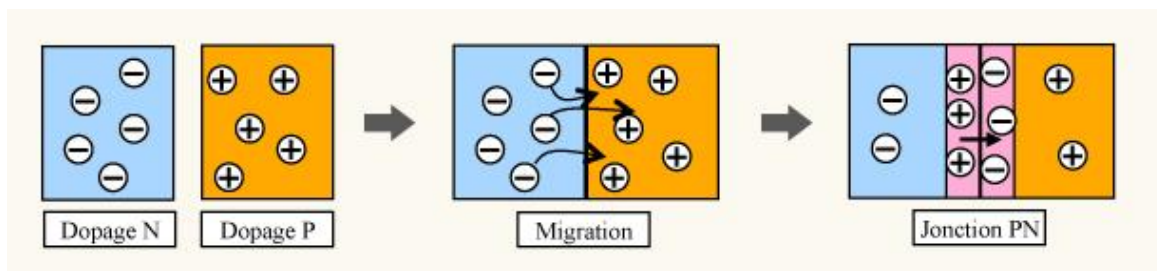


Figure II.11 : Schéma de la matière, cas sans et avec dopage [10].

## Généralités sur les capteurs solaires

Au moment de la création de la jonction P-N, les électrons libres de la région N diffusent dans la couche P et se recombinent avec les trous de la région P. Il existera ainsi, pendant toute la vie de la jonction, une charge positive de la région N au bord de la jonction (parce que les électrons en sont partis) et une charge négative dans la région P au bord de la jonction (parce que les trous en ont disparu) ; l'ensemble forme la Zone de Charge d'Espace (ZCE) et il existe un champ électrique entre les deux, de N vers P. Ce champ électrique fait de la ZCE une diode, qui ne permet le passage du courant que dans un sens : les électrons peuvent passer de la région P vers la région N, mais pas en sens inverse ; inversement les trous ne passent que de N vers P.



*Figure II.12 : Formation de la jonction P-N [27]*

En fonctionnement, un photon arrache un électron à la matrice, créant un électron libre et un trou. Ces porteurs de charges diffusent jusqu'à la zone de charge d'espace, là sous l'effet du champ électrique ils partent chacun à l'opposé : les électrons s'accumulent dans la région N (qui devient le pôle négatif), tandis que les trous s'accumulent dans la couche dopée P (qui devient le pôle positif). Ce phénomène est plus efficace dans la ZCE, les porteurs de charges (électrons ou trous) étant séparés immédiatement par le champ électrique, ou à proximité immédiate de la ZCE : lorsqu'un photon y crée une paire électron-trou, ils se séparent et ont peu de chance de rencontrer leur opposé, alors que si la création a lieu plus loin de la jonction, l'électron nouveau conserve une grande chance de se recombiner avant d'atteindre la zone N. Mais la ZCE est très mince, aussi il n'est pas utile de donner une grande épaisseur à la cellule.

D'un point de vue électrique, une cellule photovoltaïque est l'équivalent d'un générateur de courant auquel on a adjoint une diode. Il faut ajouter des contacts électriques (qui laissent passer la lumière en face éclairée : en pratique, on utilise un contact par une grille), une couche antireflet pour assurer une bonne transmission des photons vers l'absorbeur. Pour que la cellule fonctionne, et produise le maximum de courant, on ajuste le gap du semi-conducteur au niveau d'énergie des photons. On peut éventuellement empiler les jonctions, de façon à exploiter au mieux le spectre d'énergie des photons, ce qui donne les cellules multi-jonctions [27].

# Généralités sur les capteurs solaires

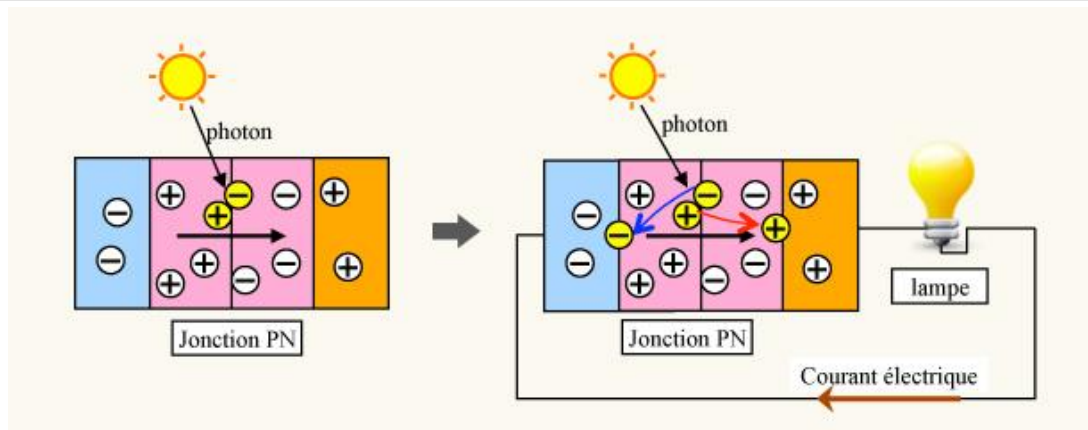


Figure II.13: Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [27]

## II.3.1.3. Facteurs influents sur le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

### a) Influence de l'ensoleillement

L'apport d'énergie permettant la séparation électrons-trous étant assuré par l'énergie lumineuse, il est donc normal que l'augmentation de l'ensoleillement entraîne automatiquement l'augmentation des paires électrons-trous. Le courant débité est proportionnel à l'ensoleillement [28].

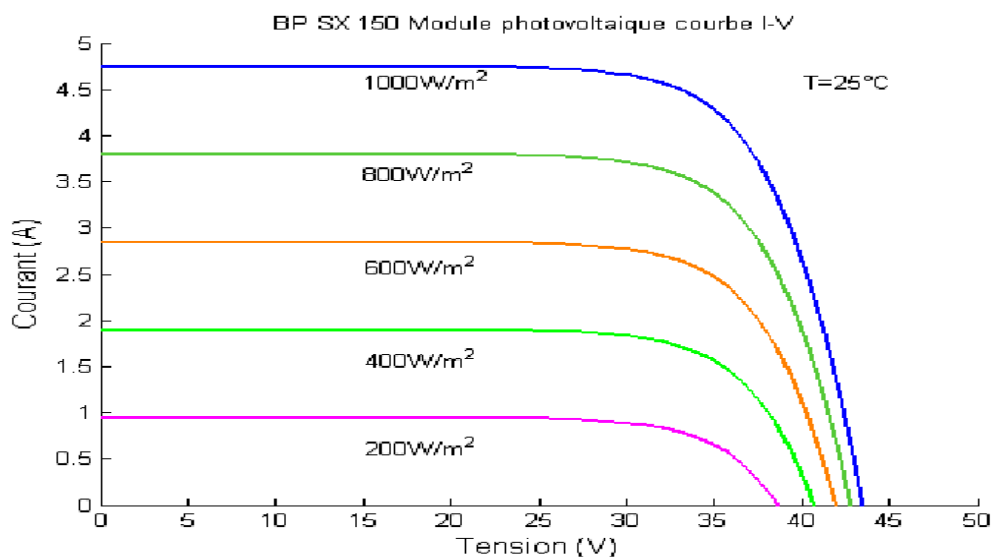


Figure II.14 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque [10].

# Généralités sur les capteurs solaires

## b) Influence de la température

La température a une influence notable sur le rendement d'une cellule photovoltaïque, nous remarquons que le courant de court circuit varie peu avec la température tandis que la tension à vide est beaucoup plus influencée. La température a donc une influence non négligeable sur le rendement d'une cellule photovoltaïque (perte de puissance de l'ordre de 9-15% pour une augmentation de 30 °C) [28].

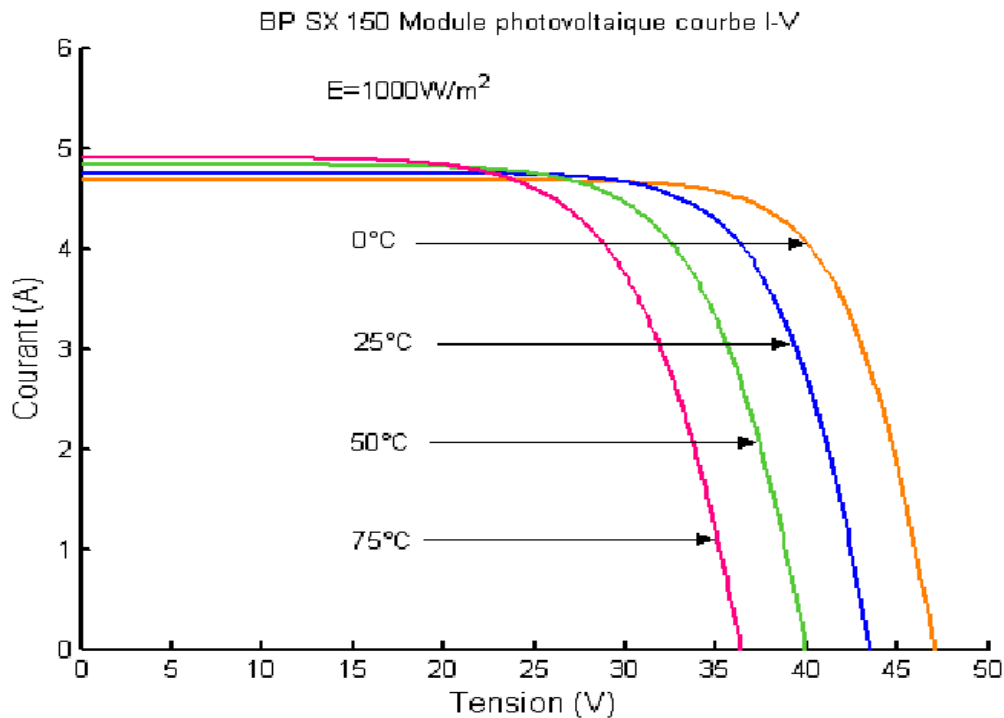


Figure II.15: Influence de la température sur les cellules photovoltaïques [10].

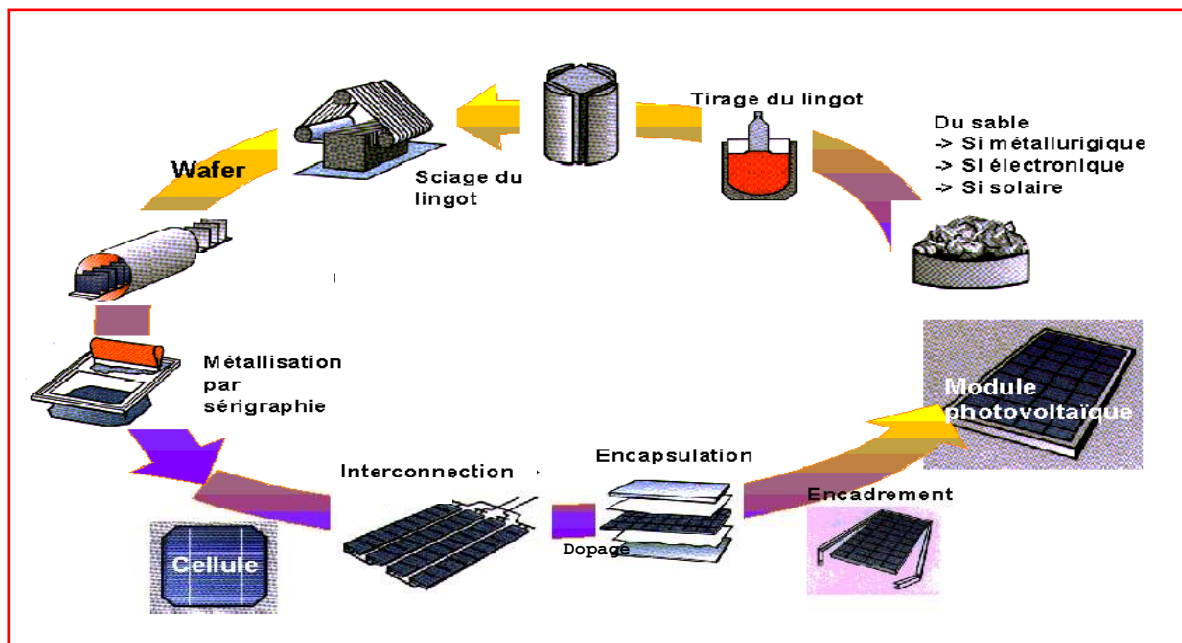
### II.3.2. Le module photovoltaïque

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques disponibles à un niveau industriel. Le silicium est fabriqué à partir du sable quartz (dioxyde de silicium). Celui-ci est chauffé dans un four électrique à une température de 1700 °C. Divers traitements du sable permettent de purifier le silicium. Le produit obtenu est un silicium dit métallurgique, pur à 98 % seulement. Ce silicium est ensuite purifié chimiquement et aboutit au silicium de qualité électronique qui se présente sous forme liquide, puis coulé sous forme de lingot suivant le processus pour la cristallisation du silicium, et découpé sous forme de fines plaquettes (wafers). Par la suite, ce silicium pur va être enrichi en éléments dopants (Phosphore, Bore) lors de l'étape de dopage, afin de pouvoir le transformer en semi-conducteur de type P ou N. La diffusion d'éléments dopants (bore, phosphore) modifie l'équilibre électronique de ces plaquettes (wafers), ce qui les transforme en cellules sensibles à la lumière.

## Généralités sur les capteurs solaires

Les cellules à partir de plaquettes de silicium cristallisé (c-Si) se divisent en deux catégories distinctes, celles à partir du silicium monocristallin (mc-Si) et celles à partir du silicium polycristallin (pc-Si). Le silicium monocristallin est plus cher que le silicium poly-cristallin mais permet d'obtenir un rendement plus élevé.

Les cellules monocristallines et poly-cristallines sont fragiles. Elles sont donc placées entre deux plaques de verre (encapsulation) afin de former un module. Le matériau de base est le silicium qui est très abondant, mais la qualité nécessaire pour réaliser les cellules doit être d'une très grande pureté et son coût intervient de façon importante dans le coût de revient total [29].



*Figure II.16: Processus de fabrication d'un module photovoltaïque à base de silicium cristallin [29].*

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module. Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (Ethylène-Vinyle- Acétate) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une feuille de Tedlar [30].

# Généralités sur les capteurs solaires



Figure II.17 : Module photovoltaïque [29].

## II.4. Les capteurs solaires hybrides photovoltaïques/ thermiques

Un système hybride photovoltaïque thermique (PV/T) combine deux systèmes solaires différents (thermique et photovoltaïque) en une seule unité. Durant la conversion photovoltaïque du capteur solaire une chaleur est générée ce qui augmentera la température de la cellule photovoltaïque et causera une chute de son rendement. Ce phénomène est dû à la partie du rayonnement solaire non absorbée par les cellules et qui sera à l'origine de son échauffement. Cet échauffement a été considéré comme néfaste pour le rendement des capteurs solaires photovoltaïques et plusieurs efforts ont été consentis pour évacuer cette chaleur. Il y a eu aussi l'idée d'exploiter ce phénomène par la combinaison du système photovoltaïque avec un système thermique pour former le capteur hybride PVT qui va générer en même temps de l'électricité et de la chaleur [31].

### II.4.1. Les différents types de capteurs solaires hybrides PV/T

#### II.4.1.1. Les capteurs solaires hybrides PV/T à air

La conception du produit de type air fournit une solution simple et économique. La température des cellules photovoltaïques peut être abaissée par extraction de la chaleur à l'aide de la circulation naturelle ou forcée du fluide caloporteur.

Cela évite la chute brutale du rendement électrique du module photovoltaïque quand la température du panneau s'élève, tout en assurant la récupération d'une certaine quantité d'énergie thermique qui peut être exploitée ailleurs.

# Généralités sur les capteurs solaires

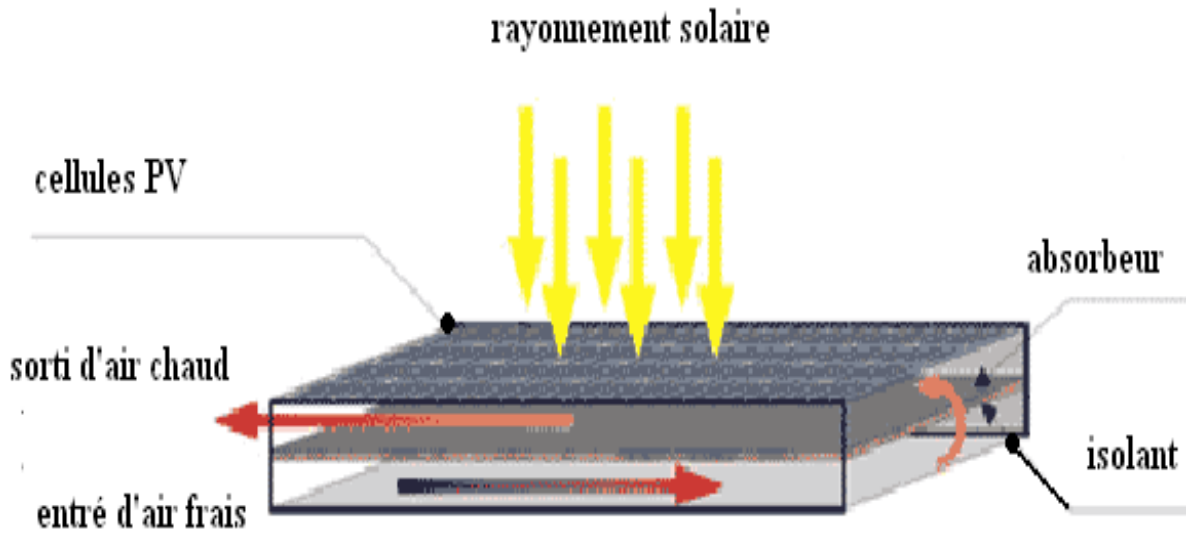


Figure II.18 : Schéma du capteur solaire hybride PV/T à air [32].

Ce capteur solaire est composé d'une couverture transparente, d'un absorbeur peint en noir et d'une partie arrière isolante. Les cellules PV sont collées sur des feuilles d'absorbeurs avec une résine spéciale permettant de récupérer l'énergie calorifique par le fluide caloporteur (air) circulant dans la couche inférieure [32].

## II.4.1.2. Les capteurs solaires hybrides PV/T à eau

Un système solaire hybride PVT à eau est une combinaison du capteur solaire photovoltaïque de production d'énergie électrique avec le capteur thermique de production d'énergie calorifique.

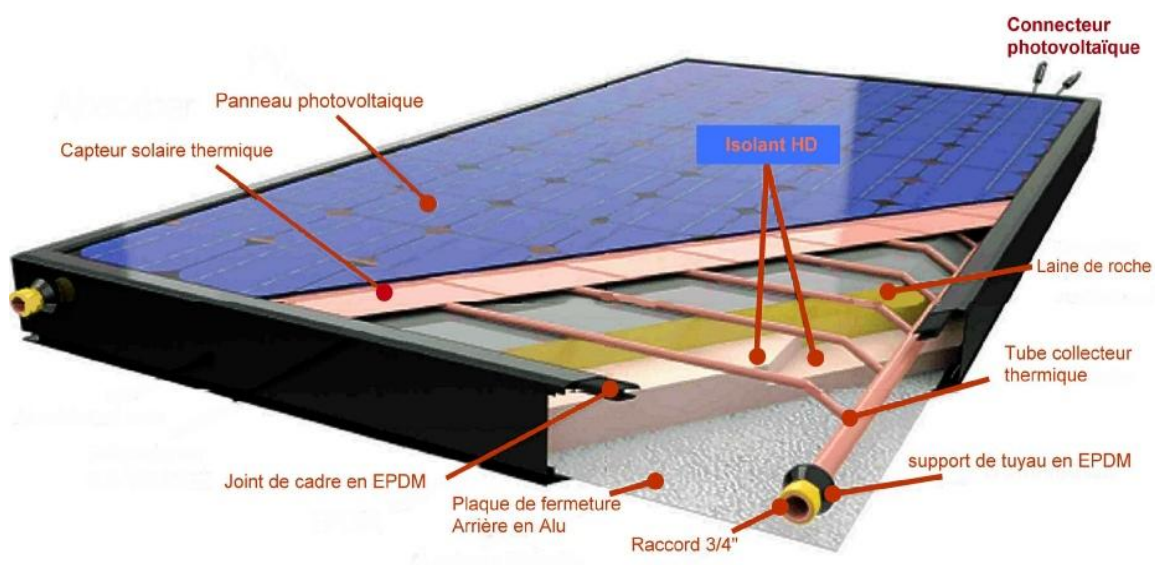


Figure II.22 : Caractéristiques d'un panneau solaire hybride PV/T à eau [16].

# Généralités sur les capteurs solaires

---

## II.4.1.3. Les capteurs solaires hybrides PV/T bi-fluides (eau, air)

Le capteur solaire hybride PV/T bi-fluide est un système qui utilise deux fluides qui combine le capteur solaire hybride PV/T à air et le capteur solaire hybride PV/T à eau.

## II.4.2. Bibliographie sur les capteurs solaires hybrides

En 2000, Hegazy [33] a effectué une enquête approfondie sur les performances thermiques et électriques de quatre capteurs solaires hybrides PVT à air, différenciés par le mode de refroidissement des panneaux PV: canal au dessus du panneau PV en mode 1, canal au dessous en mode 2, le capteur PV entre les canaux en un seul passage en mode 3, et enfin la conception à double passage selon le mode 4.

Chacun de ces prototypes est vitré, a une longueur de 9 m et une largeur de 1 m. L'épaisseur de la lame d'air a été choisie en fonction d'un critère d'optimisation proposé par Hegazy pour divers débits massiques, à savoir :

$$(e/l)_{\text{optimum}} = 2.5 \cdot 10^{-3} \quad (\text{II.1})$$

Où  $e$  est l'épaisseur de la lame d'air et  $l$  la longueur du canal traversé par le flux turbulent d'air.

## Généralités sur les capteurs solaires

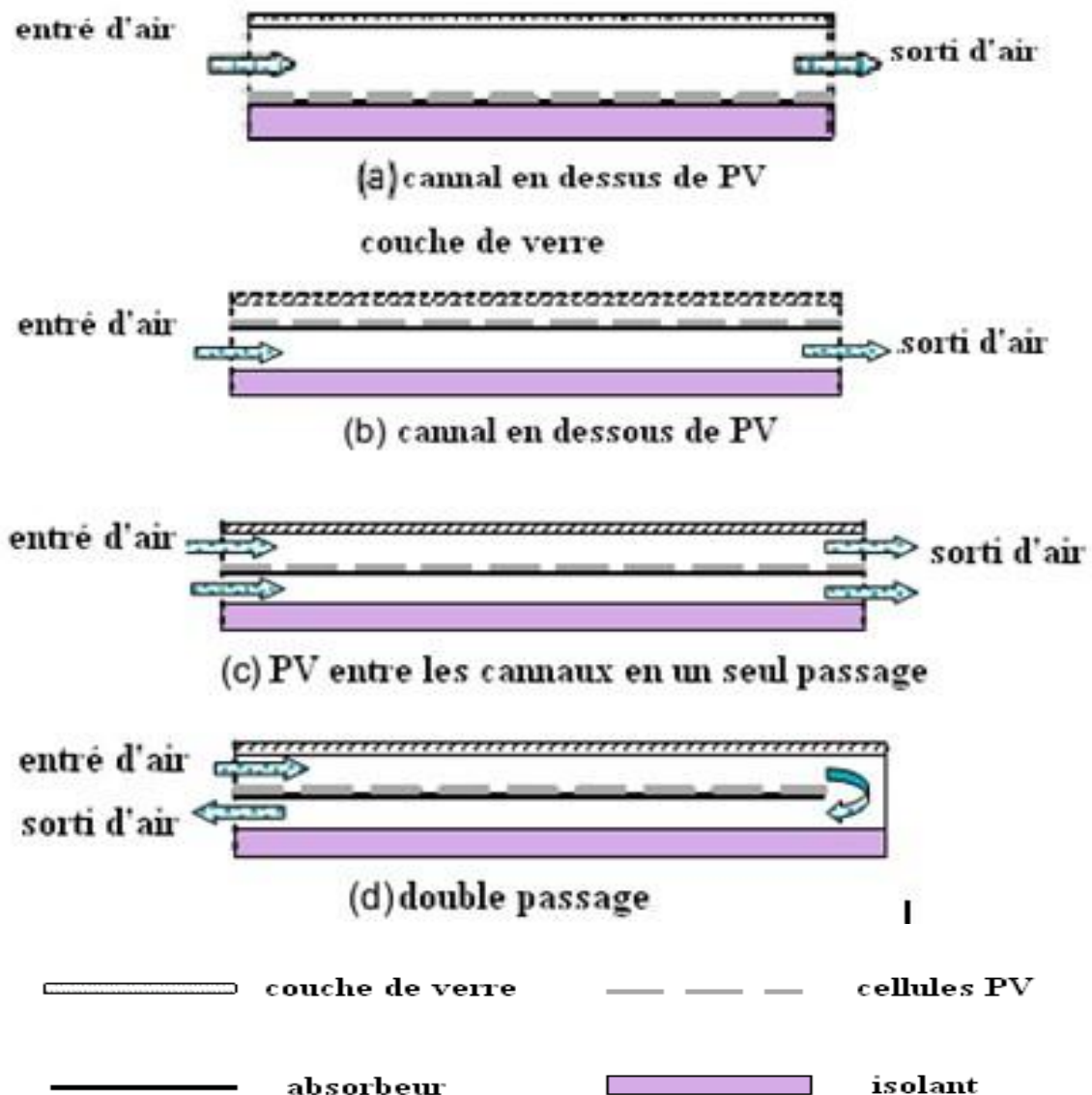


Figure II.19: Configuration du capteur hybride PV/T à air [34].

L'analyse numérique effectuée par Hegazy a montré que les performances du capteur solaire hybride PVT à air dépendent de la température maximale de l'air en sortie, des rendements thermiques et électriques et de l'énergie électrique nette disponible après soustraction de l'énergie nécessaire au fonctionnement du ventilateur et des autres appareils alimentés. La simulation réalisée pour une journée ensoleillée a montré que les efficacités des modèles 2 et 4 étaient assez voisines et meilleures que le modèle 1. Cependant, le modèle 3 s'est montré le plus performant car il utilise moins d'énergie pour la ventilation tout en produisant la même quantité d'énergie que les modèles 2 et 4. L'efficacité globale du modèle 3 est de 57,3%.

En 2006, Tiwari et al [35] présentent l'étude théorique et expérimentale en régime permanent d'un capteur PV/T à air ventilé naturellement ou mécaniquement. Ce capteur est constitué de deux modules PV de  $0.61 \text{ m}^2$  de surface chacun, connectés en série et montés sur une couche

## Généralités sur les capteurs solaires

isolante non-corrosive de Tedlar. Les cellules photovoltaïques sont collées entre elles par l'intermédiaire d'une couche d'EVA et protégées par une couche de verre. Une lame d'air isolée à l'aide d'une couche de bois permet la ventilation naturelle ou forcée des modules PV en sous-face. L'énergie électrique produite est stockée dans une batterie électrique. Après des tests effectués sur un banc d'essais en acier, inclinable, monté à New Delhi, en Inde (Figure I-3), les auteurs montrent que la récupération complémentaire d'énergie thermique permet l'amélioration du rendement global du système d'environ 18%.

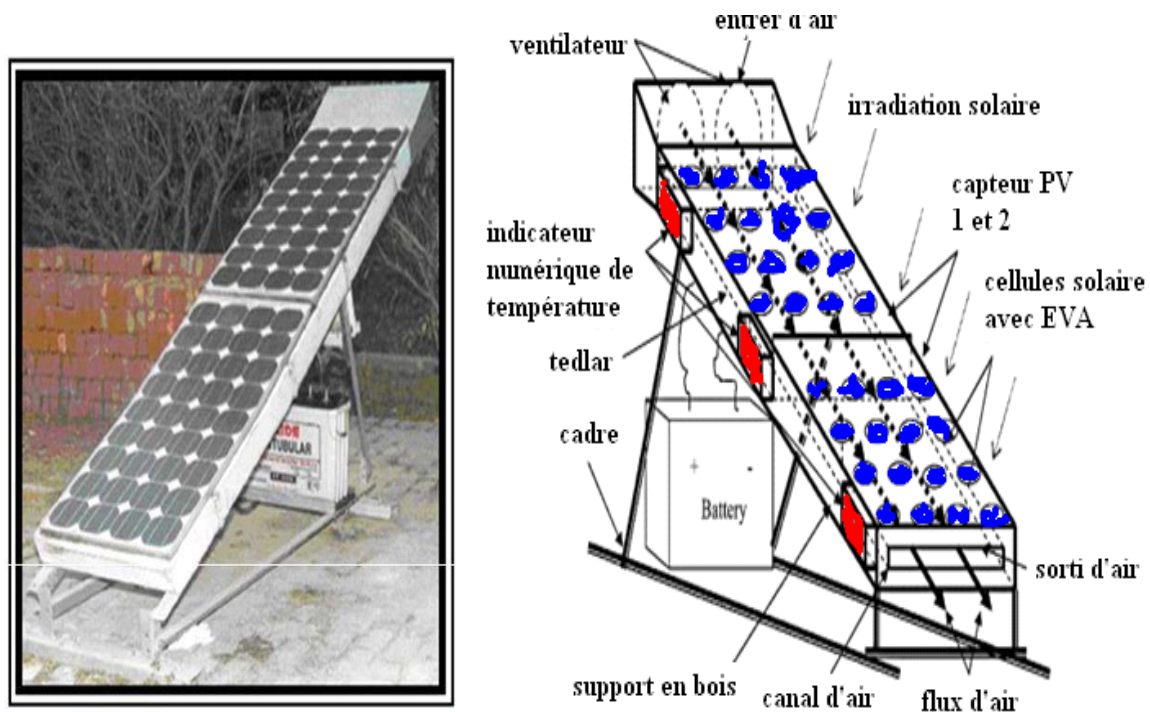


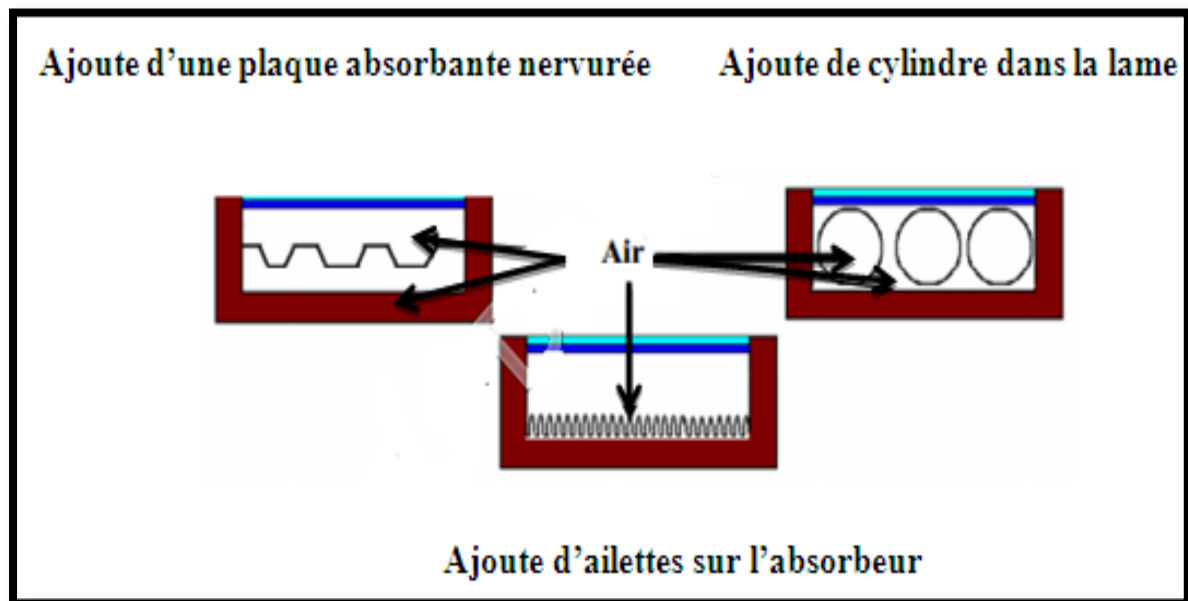
Figure II.20: Banc d'essai du capteur solaire hybride PV/T à air [35].

Trip Anagnostopoulos et al. [36] ont effectué des tests à l'Université de Patras (à  $38,2^\circ \text{N}$ ) en Grèce sur des capteurs solaires hybrides PVT à air et à eau intégrés à un bâtiment. Les auteurs ont montré l'intérêt de réduire la température des modules photovoltaïques PV, d'accroître la production d'air préchauffé et de réduire les pertes thermiques à travers l'isolant en sous-face du capteur PV.

Ils ont constaté que le coût de production du capteur hybride PVT à air est d'environ 5% plus élevé que celui des modules photovoltaïques.

Différentes configurations de capteur PVT ont été testées, moyennant quelques modifications à moindre coût. Ces études font apparaître qu'une faible épaisseur de la lame d'air améliore les transferts thermiques mais cause une chute du rendement thermique du système par suite de la réduction du débit d'air. Pour remédier à ce problème la solution proposée est d'accroître la surface d'échange entre l'air et les modules PV en intégrant des plaques planes ou nervurées, des tubes soudés à l'absorbeur ou des ailettes au sein de la lame d'air ont été envisagés.

## Généralités sur les capteurs solaires



*Figure II.21 : Quelques exemples de modifications du capteur solaire hybride PV/T à air [36].*

Ainsi, divers projets de recherche ont été menés sur l'intégration des capteurs solaires PV au bâti et sur les capteurs solaires PV/T hybrides à air. Certains ont abouti à une mise sur le marché. Ce domaine étant vaste, la liste de composants que nous avons présentée est réduite mais, elle permet de définir les principales caractéristiques des composants solaires PV/T à air.

En 2003, un capteur solaire PV/T hybride à eau est étudié en régime dynamique par Chow [37] qui réalise un modèle adapté aux simulations thermiques en régime transitoire. Il s'appuie pour cela, sur les travaux de Bergence et Lovvik qui présentent en 1995, la modélisation d'une configuration similaire de capteur solaire PV/T hybride à eau. Ce modèle thermique se base sur la méthode des volumes finis et permet le calcul des performances horaires, des gains thermiques et électriques, des rendements et du comportement thermique des diverses couches de ce capteur solaire. Le composant est constitué d'une couche de verre séparée d'un panneau PV par une lame d'air confinée. Le panneau PV est fixé à un absorbeur par l'intermédiaire d'une couche adhésive composée d'EVA (éthylène acétate de vinyle) et de Tedlar. Cet absorbeur se présente sous forme d'ailette soudée à des tubes de circulation d'eau parallèles, régulièrement espacés et connectés aux deux extrémités par des tubes de jonction. Cette disposition permet d'uniformiser le débit d'eau dans chacun des tubes. Les cotés et le fond du capteur solaire sont isolés.

## Généralités sur les capteurs solaires

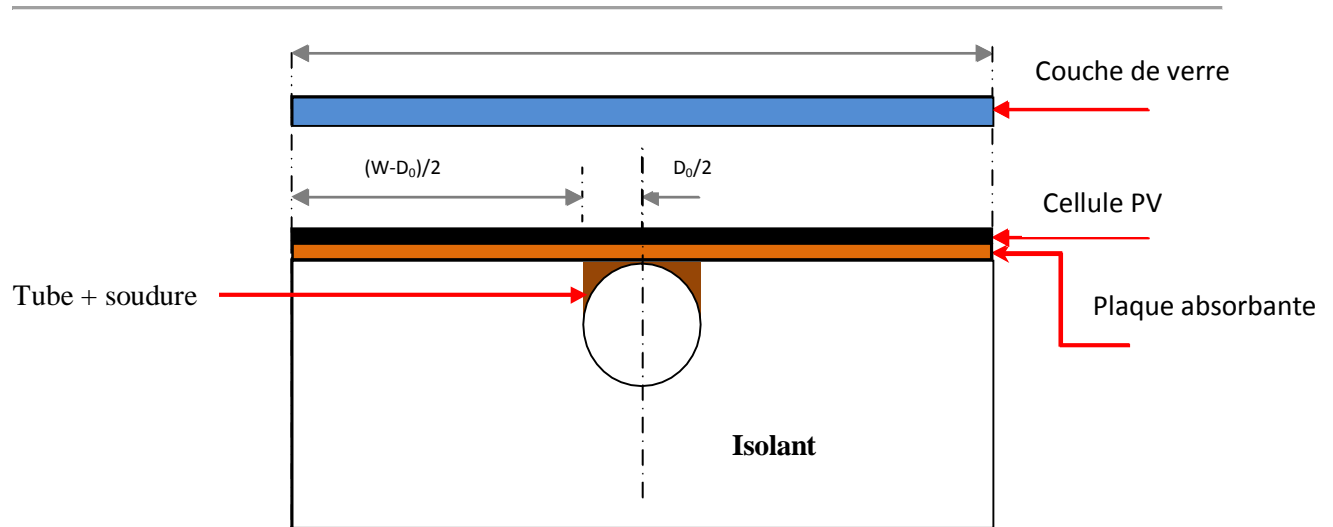


Figure II.23 : Coupe d'un capteur solaire hybride PV/T à eau [37].

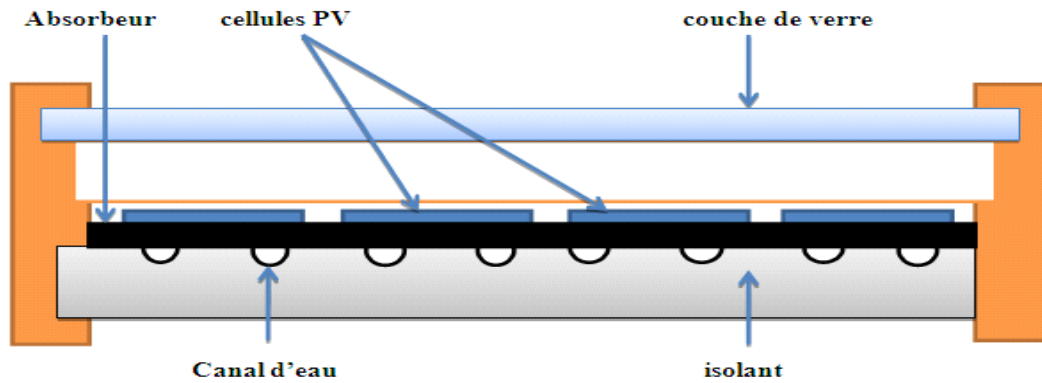
Des études paramétriques sont réalisées en faisant varier les coefficients de transfert par conduction entre l'absorbeur et le tube, et entre l'absorbeur et le panneau PV. Il montre ainsi que le capteur solaire comportant un contact idéal entre l'absorbeur et le tube et entre l'absorbeur et les panneaux PV donne le rendement global le plus élevé, soit 70 %. Dans le cas où ces coefficients de transfert thermique sont faibles, le rendement descend à 60 %. Les diverses simulations réalisées ont montré que le modèle basé sur la représentation de chaque couche par un seul nœud de température est convenable pour l'étude des capteurs solaires de configuration similaire.

En 1997, Fujisawa et Tani [37] ont conçu et construit un capteur solaire PV/T hybride à eau sur une cité universitaire à Tokyo (Japon).

Ils étudient ainsi un composant solaire hybride composé d'un capteur solaire vitré à liquide caloporteur et à absorbeur plan en aluminium non-sélectif, et de modules PV en silicium mono- cristallin (rendement électrique de 13 %). Ce capteur solaire a une longueur de 1.3 m et une largeur de 0.5 m. Cette analyse a consisté en l'évaluation des performances énergétiques du composant étudié. Ainsi, une étude expérimentale in situ a été menée sur ce capteur solaire vitré et sur un capteur solaire similaire mais sans vitrage en vue d'estimer et de comparer leurs performances énergétiques annuelles. Les résultats obtenus ont été confrontés à ceux d'un capteur solaire PV et d'un capteur solaire thermique. Il est noté que le capteur solaire hybride vitré produit autant d'énergie que le capteur solaire thermique. Le capteur solaire hybride non vitré produit le moins d'énergie thermique mais offre la plus grande quantité d'énergie électrique. Le capteur solaire PV a une surface de  $0.48 \text{ m}^2$  et le capteur solaire thermique plan a une surface de  $0.61 \text{ m}^2$ . Il est montré qu'en ce qui concerne le gain total d'énergie (thermique et électrique), le système le plus performant est le capteur solaire hybride vitré qui a une production totale de 615 kWh/an, suivi du capteur solaire thermique plan (575 kWh/an), du capteur solaire hybride non vitré (480 kWh/an) et enfin du capteur

## Généralités sur les capteurs solaires

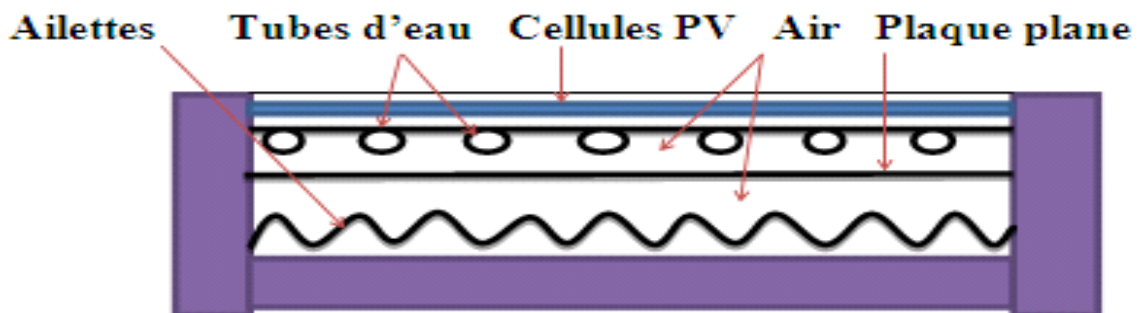
solaire PV (72.6 kWh/an). Ils ont aussi constaté que le capteur solaire PV/T hybride vitré, produit presque autant d'énergie thermique et électrique que le capteur solaire PV et le capteur solaire thermique plan réunis.



*Figure II.24 : Coupe transversale qui montre les différents composants du capteur solaire hybride PV/T à eau [37].*

En 2001, Trip Anagnostopoulos [39] effectue l'étude d'un capteur solaire hybride faisant appel à deux types de fluides caloporteurs disposés de manière superposée. Trois configurations ont été conçues et analysées expérimentalement afin d'évaluer le comportement de chacune des formes de production thermique (à air ou à eau).

Le système le plus performant est schématisé sur la Figure II.23. Il comporte un absorbeur soudé à des tubes en cuivre situé en face avant du composant, une plaque métallique plane et des ailettes disposées sur la paroi inférieure de la lame d'air.



*Figure II.25 : Capteur solaire hybride PV/T bi-fluides [39].*

# Généralités sur les capteurs solaires

## I.5. Conclusion

Dans ce chapitre, différents types de capteurs qui convertissent l'énergie solaire de différentes manières ont été décrits. Le capteur solaire, qui convertit le rayonnement solaire en chaleur, et le capteur photovoltaïque, qui convertit l'énergie solaire en énergie électrique, sont décrits de façon détaillée. Le capteur hybride, qui combine ces deux derniers en produisant de l'électricité et de la chaleur en même temps est également décrit de façon complète.

# **Chapitre III**

## **Les matériaux à changement de phase**

## III.1. Introduction

Les matériaux à changement de phase (MCP) ont pour particularité de pouvoir stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente. La chaleur étant absorbée ou restituée lors du passage de l'état solide à l'état liquide (et vice versa).

Les MCP reposent sur l'application d'un principe physique simple. Au-delà d'une certaine température caractéristique de chaque matériau. Ils se liquéfient en absorbant la chaleur de l'atmosphère ambiante et la restituent lorsque la température baisse.

Cette propriété du matériau est liée à son importante énergie de fusion par unité de volume, plus celle-ci sera grande et plus les propriétés de stockage et de restitution de la chaleur seront intéressantes.

## III.2. Stockage d'énergie thermique

L'énergie thermique peut être stockée comme un changement de l'énergie interne d'un matériau en tant que chaleur sensible, chaleur latente. On distingue deux formes de stockage.

### III.2.1. Stockage par chaleur sensible

Cela consiste à accumuler de l'énergie thermique dans un corps par accroissement de sa température sans changement d'état, la quantité d'énergie stockée est alors directement proportionnelle à la variation de température et à la quantité de matière concernée. Qualifiée par la chaleur massique  $C_p$  exprimé en **J/ (kg. K)**.

**Exemple :**  $c_{\text{eau}} = 4186 \text{ J/kg K}$ .

Ce qui veut dire qu'il faut 4186 joules pour élever 1 kg d'eau de 1°C.

Ainsi, à pression constante, si l'on réchauffe un corps (généralement liquide ou solide) de masse  $m$  et de capacité thermique  $C_p$  (T) de la température  $T_1$  à la température  $T_2$  on peut stocker une énergie donnée par sa variation d'enthalpie [36].

$$H_2 - H_1 = \int_{T_1}^{T_2} m c_p (T) dT \quad (\text{III.1})$$

En supposant  $C_p$  (T) constante, on obtient la relation suivante :

$$H_2 - H_1 = m c_p (T_2 - T_1) \quad (\text{III.2})$$

### III.2.2. Le stockage par chaleur latente

Ce type de stockage consiste à exploiter la quantité d'énergie engagée lors du changement d'état d'un corps, celui-ci se produit à température constante. La chaleur latente est notée par  $L_V$  (v pour la vaporisation) et  $L_f$  (f pour la fusion).

**Exemple :**  $L_{f\text{eau}} = 330 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$

# Les matériaux à changement de phase

C'est-à-dire la fonte de 1 kg de glace à la température constante de 0 °C nécessitera une énergie de 330 kJ.

$$H_2 - H_1 = m L_f \quad (\text{III.3})$$

Supposant qu'un solide pur à la température  $T_1$ , de masse  $m$  ayant une température de fusion  $T_f$  telle que  $T_1 < T_f < T_2$ , l'énergie stockée serait donnée à pression constante, pour la variation d'enthalpie suivante [36] :

$$H_2 - H_1 = \int_{T_1}^{T_f} m c_{p_s}(T) dT + m L_f + \int_{T_f}^{T_2} m c_{p_l}(T) dT \quad (\text{III.4})$$

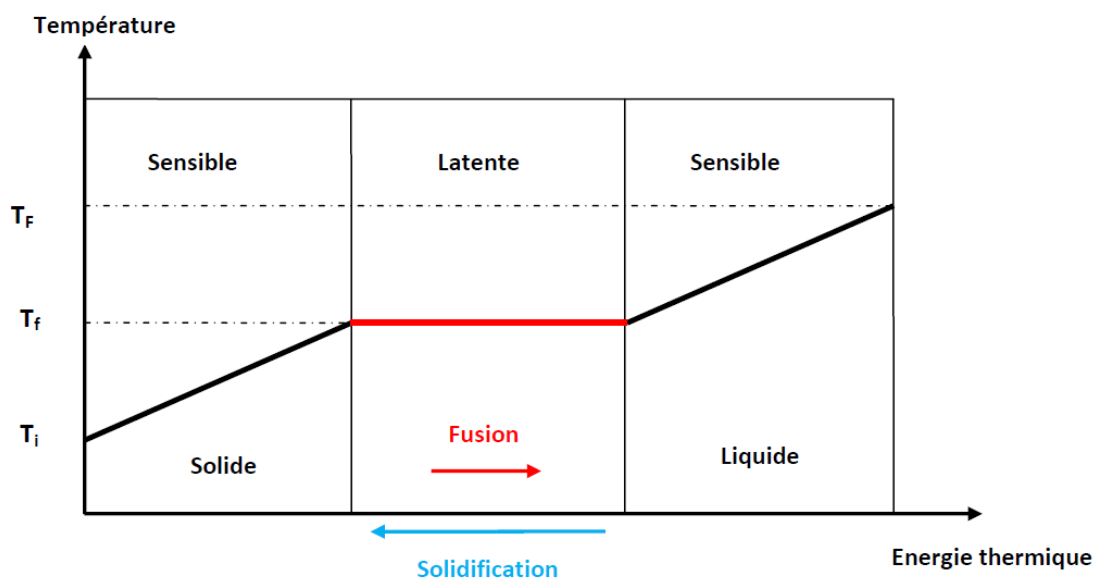
$c_{p_s}(T)$ : Chaleur spécifique du corps à l'état solide.

$c_{p_l}(T)$ : Chaleur spécifique du corps à l'état liquide.

$L_f$ : Chaleur latente de changement de phase.

En supposant  $c_{p_s}(T)$  et  $c_{p_l}(T)$  constantes, nous obtenons :

$$H_2 - H_1 = m c_{p_s} (T_f - T_1) + m L_f + m c_{p_l} (T_2 - T_f) \quad (\text{III.5})$$



**Figure III.1** : Evolution de la température d'un corps pur avec changement d'état [2].

Si l'on représente l'enthalpie spécifique en fonction de la température, on obtient donc la courbe (a) de la figure (III.2). On remarque la discontinuité due au changement d'état (pas de variation de température).

Dans le cas d'un mélange (alliage), la variation d'enthalpie ne représente plus de continuité (Courbe b, figure III.2), sauf dans le cas où l'on a formation d'un composé défini avec fusion (ou solidification) congruente.

# Les matériaux à changement de phase

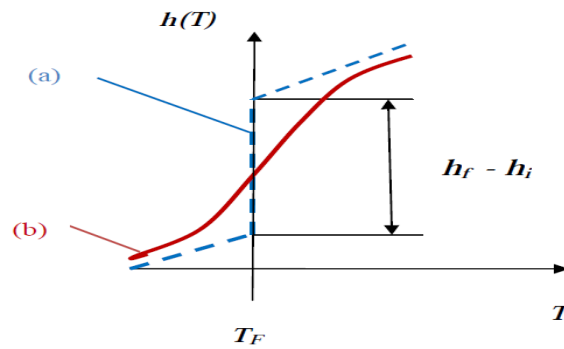


Figure III.2 : L'enthalpie spécifique en fonction de la température.

Courbe (a) pour un corps pur, courbe (b) pour un mélange.

## III.2.3. Comparaison entre le stockage par chaleur latente et le stockage par chaleur sensible

Il est important de noter que les quantités d'énergie mises en jeu dans le processus de changement de phase sont bien plus importantes que celles qui interviennent lors de transfert sensible. C'est grâce au stockage par chaleur latente qu'il est aujourd'hui possible de réduire considérablement le volume d'un élément de stockage d'énergie (compacité), ou encore d'augmenter très fortement la quantité d'énergie contenue dans un même volume de stockage (densité énergétique). On notera, d'autre part, qu'un MCP peut cumuler les 2 types de transfert thermique décrits précédemment [38].

Exemple :

Tableau III.1 : Les caractéristiques du MCP.

Nom	Acétate trihydrate de sodium (MCP)
$T_f$ (°C)	55-58 °C
$L_f$ ( $\frac{J}{kg}$ )	242,85 $10^3$
$C_{ps}$ ( $\frac{J}{kg.K}$ )	3,31 $10^3$ à 30°C
$C_{pl}$ ( $\frac{J}{kg.K}$ )	3,06 $10^3$ à 70°C
$\rho_l$ ( $\frac{kg}{m^3}$ )	1279 à 70°C
$\rho_s$ ( $\frac{kg}{m^3}$ )	1392 à 30 °C

# Les matériaux à changement de phase

---

## a) Densité énergétique

L'énergie  $E_{MCP\ 30-70^{\circ}C}$  accumulée par  $1\ m^3$  de ce MCP entre  $30\ ^{\circ}C$  et  $70\ ^{\circ}C$  vaut :

$$\begin{aligned} E_{MCP\ 30-70^{\circ}C} &= V \times \rho_{solide} \times C_{P\ MCP\ solide} \times \Delta T_{solide} + V \times \rho_{solide} \times L_f + V \times \rho_{liquide} \times C_{P\ MCP\ liquide} \times \Delta T_{liquide} \\ &= [1 \times 1392 \times C_{P\ MCP\ solide} \times (55-30)] + [(1 \times 1392 \times L_f)] + [1 \times 1279 \times C_{P\ MCP\ liquide} \times (70-58)] \\ &= 5,00\ 10^8\ \text{Joules} \\ &= 139\ \text{kWh} \end{aligned}$$

Sur le même intervalle de température, le même volume d'eau ( $1\ m^3$ ) accumulerait une quantité :

$$\begin{aligned} E_{eau\ 30-70^{\circ}C} &= C_{p_{eau}} \times V \times \rho_{eau} \times \Delta T_{eau} \\ &= 167,44 \times 10^6\ \text{Joules} \\ &= 46,4\ \text{kWh} \end{aligned}$$

**Résultat :**

$$\frac{E_{MCP\ 30-70^{\circ}C}}{E_{eau\ 30-70^{\circ}C}} = 3$$

Le MCP considéré a donc permis de stocker 3 fois plus d'énergie pour un même volume que l'eau. Il possède donc une plus grande densité énergétique .

## b) Compacité

De la même manière, pour stocker  $100\ \text{kWh}$  de  $55^{\circ}C$  à  $58^{\circ}C$ , nous avons besoin des volumes  $V_{eau}$  et  $V_{MCP}$ , suivants :

Pour l'eau on a :

$$\begin{aligned} V_{eau} &= \frac{P_{stockage}}{c_{p_{eau}} \times \rho_{eau} \times \Delta T} \\ &= \frac{100 \times 3600 \times 10^3}{4186 \times 1000 \times (58-55)} \\ &= 28,7\ m^3 \end{aligned}$$

Pour le MCP on a :

$$V_{MCP} = \frac{P_{STOCKAGE}}{L_f \text{ MCP} \times \rho_{MCP}}$$

$$V_{MCP} = \frac{100 \times 3600 \times 10^3}{242,85 \times 10^3 \times 1392} = 1,1 \text{ m}^3$$

**Résultats :**

$$\frac{V_{eau}}{V_{MCP}} \approx 26$$

Le volume du MCP utilisé pour stocker **100 kWh** entre **55 °C** et **58 °C** est donc plus de **26** fois plus petit que celui de l'eau. Il possède donc une plus grande compacité [42].

### III.2.2.4. Les avantages de stockage par chaleur latente

Par rapport au stockage par chaleur sensible, les principaux avantages du stockage par chaleur latente peuvent être résumés ainsi [41]:

- La chaleur latente est beaucoup plus importante que la chaleur sensible (pour un écart de température pas trop important).
- Les matériaux utilisés, dans la gamme des températures de confort en thermique du bâtiment (20 à 30 °C), peuvent stocker de 5 à 14 fois plus de chaleur que les matériaux de stockage à chaleur sensible.
- Quand la décharge d'énergie thermique a lieu, la température de la surface de MCP reste proche de la valeur de la température de changement d'état. On a donc un contrôle passif de la température de la surface. La quantité d'énergie de la décharge ne dépend donc que de la température de l'environnement.

### III.3. Critère de choix d'un MCP

Il est bien évident que le premier critère de choix d'un MCP concerne la température de transformation puisqu'elle doit être conforme au procédé. Parmi tous les produits ayant une température de fusion acceptable, il est plus judicieux de choisir celui qui représentera la plus grande chaleur latente.

Des critères sont donc définis pour faciliter le choix d'un MCP pour une application donnée.

#### a) Critères thermodynamiques

Le matériau à changement de phase doit avoir :

- Une température de fusion dans la gamme de température souhaitée.
- Une chaleur latente par unité de masse élevée (une petite quantité du matériau doit pouvoir emmagasiner une grande quantité de chaleur).

# Les matériaux à changement de phase

---

- Une chaleur spécifique élevée de sorte que le matériau puisse disposer d'une chaleur sensible significative.
- Une fusion congruente.
- Une petite augmentation de volume pendant la phase de transition.

## b) Critères cinétiques

- Le matériau à changement de phase ne doit pas montrer ou presque pas de phénomène de surfusion.
- Le matériau fondu doit se cristalliser à la température de solidification indiquée par la table thermodynamique.

## c) Critères chimiques

Le matériau à changement de phase doit montrer :

- Une stabilité chimique (absence de réaction chimique entre le MCP et le conteneur)
- Aucune décomposition chimique de sorte qu'un système de stockage par chaleur latente soit fiable.
- Aucune action corrosive sur les matériaux de construction ou sur leur conteneur.
- Le matériau doit être non inflammable et non explosif et ne doit pas être nocif.

## d) Critères économiques

Le matériau à changement de phase doit être :

- Disponible en grande quantité.
- A bon marché

## III.4. Les problèmes liés au changement de phase

### a) La surfusion

Quand on refroidit un liquide, on n'observe pas en général la solidification au moment où on atteint la température de fusion. Le matériau peut rester à l'état liquide jusqu'à plusieurs degrés au-dessous de la température de changement d'état. Lorsque la solidification se déclenche, elle dégage de la chaleur et si la masse de liquide est assez grande et les échanges de chaleur avec l'extérieur faible, le déclenchement de la solidification provoque une remontée de la température du matériau jusqu'à la température de changement d'état. Ce phénomène réduit l'efficacité thermique des unités de stockage par chaleur latente par rapport à ceux par chaleur sensible.

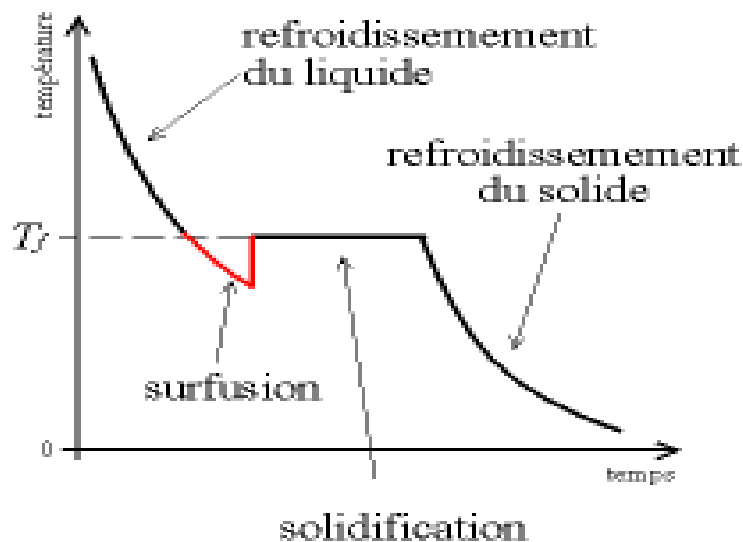


Figure III.3 : Le phénomène de la surfusion [2].

## b) La surchauffe

La surchauffe d'un corps, est le réchauffement de celui-ci après son changement d'état. Si ce réchauffement s'effectue pendant une courte durée, elle n'est considérée que comme une chaleur sensible supplémentaire stockée dans le système. Si elle s'effectue pendant une longue durée, le stockage par chaleur latente perd l'essentiel de ses avantages par rapport au stockage par chaleur sensible.

## c) La dilatation

Pendant un changement de phase solide liquide, le matériau change de densité et donc de volume. Ceci peut poser problème dans quelques applications en particulier quand on utilise un conteneur fermé, qui doit supporter l'augmentation de pression.

## III.5. Classification des matériaux à changement de phase (MCP)

Les matériaux à changement de phase sont classés en trois grandes familles :

- **Les composés organiques** : paraffines, corps non-paraffiniques
- **Les composés inorganiques** : hydrates salins, sels, métaux, alliages
- **Les eutectiques** : ils peuvent être organiques ou inorganiques.

Les composés organiques et les composés inorganiques présentent des propriétés thermiques et chimiques très différentes, qui affectent significativement la conception d'un système de stockage thermique pour une application donnée. Ils sont détaillés comme suit :

## III.5.1. Les composés organiques

Un composé organique est un composé dont l'un des éléments chimiques constitutifs est le carbone. Ce composé peut être d'origine naturelle ou produit par synthèse. Les plus utilisés sont essentiellement à base de paraffine, des acides gras et des alcools.

### III.5.1.1. Les composés organiques paraffiniques

Ils sont essentiellement constitués d'hydrocarbures saturés, à chaîne linéaire ou parfois ramifiée avec un groupement méthyle substitué en bout de chaîne, pour des applications de stockage thermique. Ils sont de la famille des alcanes de formule chimique  $C_nH_{2n+2}$ . Les paraffines sont les plus utilisées à cause de leur capacité de stockage plus importante.

Les paraffines intéressantes pour le stockage thermique sont celles qui sont sous forme solide aux températures usuelles et sont qualifiées de «cire paraffinique ». Leur point de fusion augmente avec le nombre croissant d'atome de carbone.

*Tableau III.2 : Propriétés thermo-physiques des paraffines [41].*

Nombre d'atome de Carbone	Point de fusion (°C)	Chaleur latente de fusion (kJ/kg)
14	5.5	228
15	10	205
16	16.7	237.1
17	21.7	213
18	28	244
19	32	222
20	36.7	246
21	40.2	200
22	44	249
23	47.5	232
24	50.6	255
25	49.4	238
26	56.3	256
27	58.8	236
28	61.6	253
29	63.4	240
30	65.4	251
31	68	242
32	69.5	170
33	73.9	168
34	75.9	169

# Les matériaux à changement de phase

## III.5.1.1.1. Les avantages et inconvénients des paraffines

### ➤ Les avantages

- La surfusion est négligeable.
- Elles sont stables chimiquement mais il faut les protéger de l'air pour éviter l'oxydation.
- Il n'y a pas de ségrégation de phase.

### ➤ Les inconvénients

- Faible conductivité thermique.
- Sont modérément inflammables.

*Tableau III.3 : Exemples de propriétés physiques de paraffines. [41]*

	Paraffines			
	Tétradécane	Hexadécane	Octadécane	Eicosane
<b>Formule</b>	$C_{14}H_{30}$	$C_{16}H_{34}$	$C_{18}H_{38}$	$C_{20}H_{42}$
<b>Température de fusion (°C)</b>	5.5	16.7	28	36.7
<b>Conductivité thermique (W/m.°C)</b>	0.15	0.15	0.15	0.15
<b>Enthalpie de fusion (kJ/kg)</b>	226	237	244	247
<b>Capacité thermique massique (kJ/kg . °C)</b>	2.07	2.11	2.16	2.21
<b>Masse volumique solide (kg/m<sup>3</sup>)</b>	825	835	814	856
<b>Masse volumique liquide (kg/m<sup>3</sup>)</b>	771	776	774	778
<b>Retard de la solidification (°C)</b>	Aucune	Négligeable	Négligeable	Aucune
<b>Pression de vapeur (Pa)</b>	133 à 75 °C	133 à 105 °C	133 à 75 °C	133 à 100 °C
<b>Tension superficielle (N/m)</b>	$27.4 * 10^{-3}$	3.4	$27.4 * 10^{-3}$	-
<b>Viscosité dynamique (kg/m.s)</b>	2.1	-	3.4	-

# Les matériaux à changement de phase

## III.5.1.2. Les composés organiques non paraffiniques

Les composés organiques non paraffiniques sont divisés en deux groupes : les acides gras et les autres matières organiques.

La formule générale des acides gras est  $CH_3(CH_2)_{2n}COOH$ , certaines caractéristiques de ces matériaux ont :

- Relativement une enthalpie de changement de phase élevée.
- Absence du phénomène de sous-refroidissement.
- Une haute stabilité thermique.
- Inflammabilité.
- Une faible conductivité thermique.
- Instabilité à haute température.

*Tableau III.4 : Propriétés thermo-physiques des acides gras [41].*

Matériaux	Formule	Point de fusion (°C)	Chaleur latente de fusion (kJ/kg)
Acide acétique	$CH_3COOH$	16.7	174
Polyéthylène glycol 600	$H((OC_2H_2)_n-OH)$	20-25	146
Acide caprique	$CH_3(CH_2)_8-COOH$	36	152
Acide élaïdique	$C_8H_7C_9H_{16}-COOH$	47	218
Acide laurique	$CH_3(CH_2)_{10}-COOH$	49	178
Tri-stéarine	$(C_{17}H_{35}COOH)_3$	56	191
Acide muristique	$CH_3(CH_2)_{12}-COOH$	58	199
Acide palmitique	$CH_3(CH_2)_{14}-COOH$	55	163
Acide stéarique	$CH_3(CH_2)_{16}-COOH$	69.4	193
acétamide	$CH_3CONH_2$	8.1	241
Fumarate de méthyle	$(CHCO_2CNH_3)$	102	242
Acide pentadécanoïque	$CH_3(CH_2)_{13}-COOH$	52.5	178

## III.5.2. Les composés inorganiques

Les composés inorganique ont une température de fusion comprise entre -100 et +100°C. Les plus utilisés sont : les solutions aqueuses de sel, des sels hydratés, les mélanges de sels, des mélanges de métaux. Ils sont caractérisés par leur importante chaleur latente et une haute conductivité thermique. Les problèmes majeurs rencontrés lors de leur utilisation sont en

# Les matériaux à changement de phase

rapport avec la ségrégation de phase, la corrosion, et la surfusion nécessitant ainsi l'utilisation d'agent de nucléation afin d'éviter celle-ci [42].

## III.5.2.1. Les sels hydratés

Les sels hydratés peuvent être considérés comme des alliages de sels minéraux et d'eau formant un solide cristallin.

### III.5.2.1.1. Les avantages et les inconvénients des hydrates salins

➤ **Avantages**

- Température de fusion élevée,
- Enthalpie de fusion élevée,
- Conductivité thermique élevée.

➤ **Inconvénients**

- Surfusion.
- Ségrégation de phase : Lorsque la fusion n'est pas congruente, on observe une ségrégation de phase et pour prévenir ces problèmes, on utilise des agents épaississants (comme par exemple : la cellulose).
- Perte d'eau d'hydratation.
- Caractères corrosifs.

*Tableau III.5 : Différents hydrates salins [41].*

Hydrates Salins	Température de fusion (°C)	Chaleur latente de fusion (kJ/kg)
Sels de Glauber ( $Na_2SO_4 \cdot H_2O$ )	32.4	252
Chlorure de calcium, Hexa hydrate $CaCl_2 \cdot 6H_2O$	27-30	190
Acétate de sodium tri hydrate $NaCH_3COOH \cdot 3H_2O$	58	170 à 264
hydroxyde de barium octahydrate $Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$	78	301
Phosphate de sodium dodécahydrate $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$	77	213
Carbonate de sodium déca hydrate $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$	32-35	247
Nitrate de calcium hydrate $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	40-43	140

## III.5.3. Les eutectiques

Les eutectiques sont des mélanges de deux ou plusieurs corps, ont une fusion nettement similaire à une substance pure et leurs chaleurs latentes volumétriques sont légèrement supérieures à celle des composés organiques purs. Ils sont utilisés pour le refroidissement et dans les systèmes passifs de stockage de l'énergie solaire.

Les eutectiques peuvent être obtenus en mélangeant des corps :

- Organique -organique
- Inorganique -inorganique
- Organique- inorganique

*Tableau III.6 : Liste des quelques eutectiques [41].*

Eutectique inorganique	Point de fusion (°C)	Chaleur latente de fusion (KJ/Kg)
49.3% $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ +50.7% $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	58	132.3
61.3% $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ +38.5% $NH_4NO_3$	51	131.1
$CaCl_2 \cdot 6H_2O$ + $CaBr_2 \cdot H_2O$	14	140
58.3%( $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ )+41.7% $MgCl_2 \cdot 6H_2O$	58	106
Eutectique Organique		
Acide caprique-laurique	18	120
Acide palmitique –laurique	33	145
Acide stéarique-laurique	34	150

## III.6. Application des MCP

Les MCP sont utilisés pour le stockage de l'énergie thermique, aussi dans l'industrie agroalimentaire, pharmaceutique et médicale pour limiter au maximum les variations de température que subissent les aliments, les médicaments ou les composants sensibles, par exemple le cas du transport du sang. Ils se présentent principalement sous la forme de petits «sacs en plastique» contenant le matériau choisi, disposé au plus près du produit à conserver.

## III.7. Méthodes de conditionnement des MCP

Le conditionnement des MCP doit obéir à certaines exigences :

- Le matériau du conteneur de conditionnement doit être compatible avec le MCP et ne doit subir ni ramollissement ou toute autre dégradation.

# Les matériaux à changement de phase

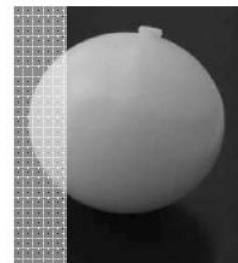
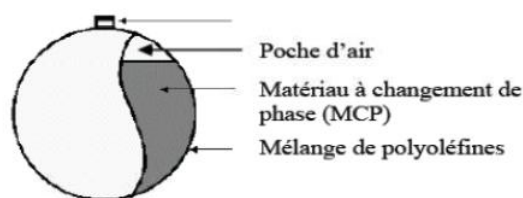
- Le conteneur de conditionnement doit assurer une parfaite étanchéité quand le MCP change d'état.
- Le conteneur doit pouvoir résister à la dilation et au changement de volume du MCP durant son changement de phase.

Il existe deux techniques de conditionnement des MCP :

## a) La macro-encapsulation :

Les conteneurs peuvent être constitués de sacs, bouteilles en plastique de différentes formes géométriques.

Ils existent des procédés industriels qui utilisent le conditionnement dans des sphères de matière plastique ou nodule [41].



*Figures III.4 : Conditionnement des MCP dans un nodule [41].*



(a)

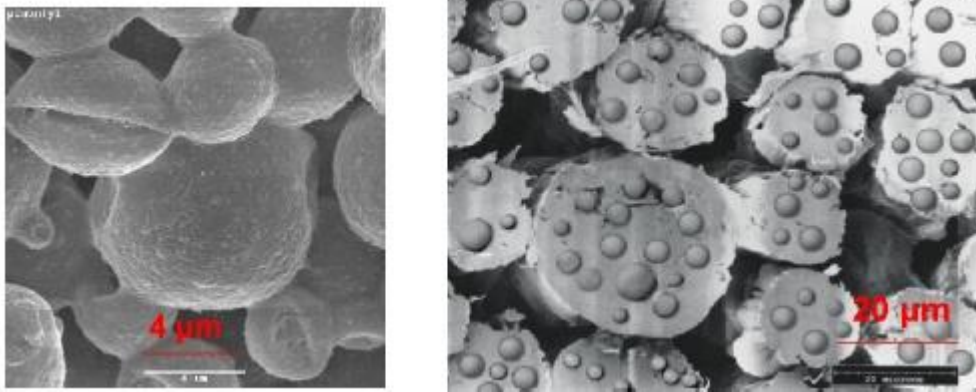


(b)

*Figure III.5 : Exemples de conditionnement du MCP [41].*

## b) La micro-encapsulation

La micro-encapsulation est un procédé physique ou chimique qui permet d'emprisonner des petites gouttes de MCP dans une coquille solide de 1 à 1000  $\mu\text{m}$  de diamètre [41].



*Figure III.6 : Vue microscopique de la micro-encapsulation [41].*

## III.8. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de rappeler le principe de stockage d'énergie thermique par chaleur sensible et par chaleur latente. Les différents types de matériaux à changement de phase ainsi que leurs conditionnements.

Nous avons aussi présenté les différentes propriétés de ces matériaux ainsi que leur classification et leurs utilisations.

# **Chapitre IV**

**Matériels et méthodes utilisés  
pour l'élaboration du système  
de refroidissement**

# Matériels et méthodes utilisés pour l'élaboration du système de refroidissement

---

## IV.1. Introduction

Notre projet consiste à élaborer des matériaux composites (MCP, matrice minérale en poudre), un circuit pour la circulation d'un fluide caloporteur (échangeur en cuivre) et un conteneur en acier inoxydable pour contenir ces différents éléments pour réaliser le prototype expérimental qui est la modification d'un panneau solaire photovoltaïque en un panneau solaire hybride photovoltaïque / thermique dans le but de refroidir un capteur solaire photovoltaïque afin d'augmenter son rendement .

## IV.2. Elaboration du composite

### IV.2.1. Matériaux utilisés pour la préparation du composite

Le premier critère de choix à retenir pour un MCP est la température de transition solide/liquide puisqu'elle doit être conforme au procédé. Parmi tous les produits ayant une température de fusion acceptable, il est plus judicieux de choisir celui qui présentera la plus grande chaleur latente.

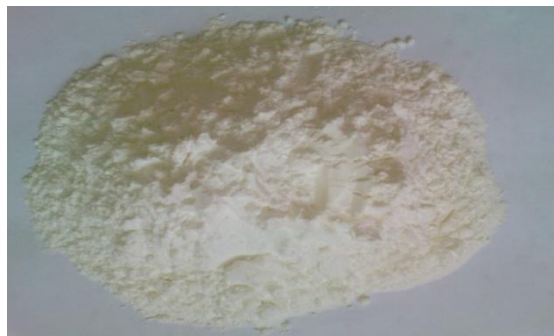
Le matériau à changement de phase utilisé dans cette étude est la graisse de coprah raffinée, ainsi que le graphite en poudre pour améliorer la conductivité thermique du composite et de la maïzena dans le but d'épaissir le mélange qui permet d'éviter les fuites et la ségrégation de phases.



a) MCP (graisse de coprah)



b) Graphite



c) Maïzena.

*Figure IV.1 : Les matériaux utilisés pour la préparation du composite.*

# Matériels et méthodes utilisés pour l'élaboration du système de refroidissement

## a) Le matériau à changement de phase (MCP)

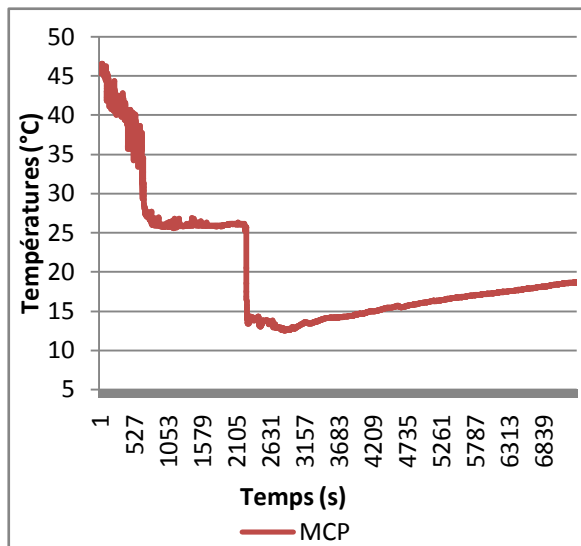
L'huile de coprah est extraite de la chaire séchée de la noix de coco qui est blanchie à travers des filtres à carbone, raffinée pour éliminer les bactéries et moisissures qui se sont formées lors du séchage (dans des lieux humides et chauds) et enfin désodorisée. Comme cette huile est souvent hydrogénée, sa teneur en acide gras la rend moins favorable pour l'organisme et le processus de raffinage lui fait perdre ces nutriments. Elle est utilisée par l'industrie agro-alimentaire pour les pâtisseries industrielles, confiseries et fritures.

### • Quelques propriétés de la graisse de coprah

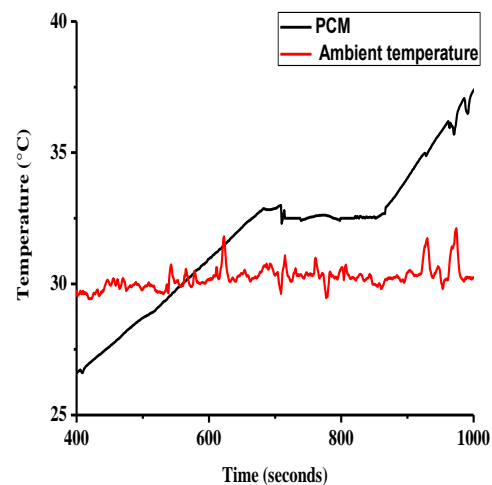
- **Couleur** : blanche.
- **Odeur** : aucune.
- **Texture** : solide (conservée au frigo), semi-solide (à température ambiante, jusqu'à 20 à 25 degrés), liquide (conservée dans un milieu au-delà de 25 degrés).
- **Goût** : aucun.
- **Point de fusion** : 23- 25°C (d'après les données fournies par l'entreprise).
- **Densité** : 924.27 kg/m<sup>3</sup>.

D'après l'expérience que nous avons faite sur la température de fusion du MCP, avec l'assistance de deux doctorants, nous avons constaté que :

- Le point de fusion: 32- 34°C.
- Point de solidification: 25- 26°C.



Solidification.



Fusion.

**Figure IV.2** : L'évolution de la température du MCP en fonction du temps.

L'huile de coco est principalement composée d'acides gras saturés (94 %), avec un bon pourcentage (plus de 62 %) d'acides gras à chaîne moyenne. Le tableau IV.1 montre les types d'acides gras contenus en elle.

# Matériels et méthodes utilisés pour l'élaboration du système de refroidissement

*Tableau IV.1 : Les différents acides gras contenus dans la graisse de coprah.*

Nom des acides gras	Pourcentage (%)	Type de gras
Acide Laurique	De 45 à 52	Gras saturé
Acide Myristique	De 16 à 21	Gras saturé
Acide Caprylique	De 5 à 10	Gras saturé
Acide Caprique	De 4 à 8	Gras saturé
Acide Caproïque	De 0.5 à 1	Gras saturé
Acide palmitique	De 7 à 10	Gras saturé
Acide oléique	De 5 à 8	Gras non-saturé
Acide palmitoléique	Des traces	Gras saturé
Acide inoléique	De 1 à 3	Gras non-saturé
Acide linoléique	Jusqu'à 0.2	Gras non-saturé
Acide stéarique	De 2 à 4	Gras saturé

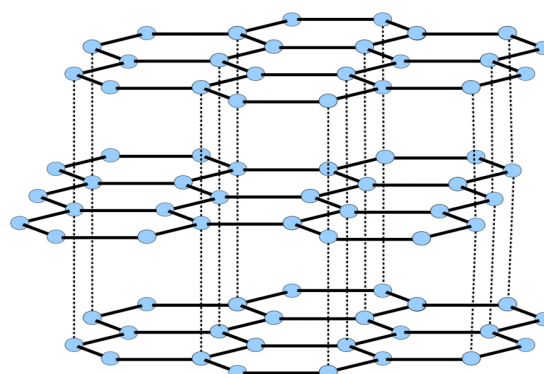
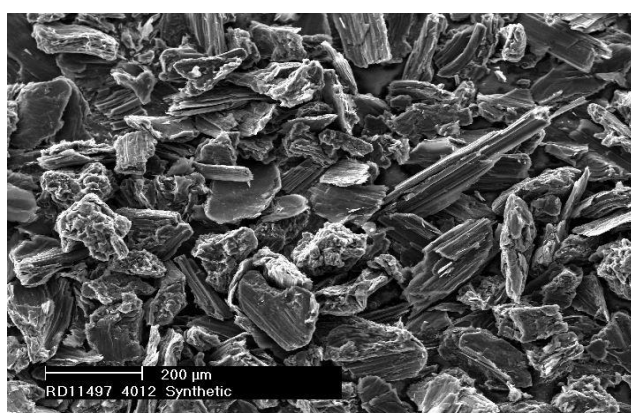
## b) Le graphite

Le graphite est un minéral de carbone (C) élémentaire, de structure cristalline hexagonale. Sa couleur varie du noir à gris-noir. C'est un minéral tendre, flexible, d'éclat métallique et d'aspect grassex et luisant caractérisé par :

- Une densité faible qui varie de 2.1 à 2.3.
- Un point de fusion très élevé (3500°C).

*Tableau IV.2 : Propriétés physiques et chimiques du graphite.*

Propriétés chimiques	Propriétés physiques
formule brute C Masse molaire : <b>338,65 g/mol</b> Masse volumique : <b>2250kg / m<sup>3</sup></b>	T° fusion: <b>3 652 °C</b> Conductivité thermique jusqu'à : <b>500 W/mK</b> Capacité thermique massique : <b>720 J/kg K</b>



*Figure IV.3 : Structure cristalline du graphite.*

# Matériels et méthodes utilisés pour l'élaboration du système de refroidissement

---

## c) La maïzena

La maïzena est une marque d'amidon de maïs déposée depuis 1891 (1862 selon le site officiel), propriété du groupe Unilever.

C'est une poudre blanche très fine extraite de l'amidon du maïs et possède des propriétés gélifiantes utilisées pour épaissir les aliments, on s'en sert dans notre expérience d'élaboration de composites.

- **principalement pour épaissir** : (Il faut toujours la diluer dans un liquide froid et ensuite la chauffer (à ébullition)).
- **mais aussi pour la pâtisserie**: où elle apporte de la légèreté. On ne peut pas la substituer à la farine dans les mêmes proportions.

L'amidon de maïs est un polysaccharide de formule chimique  $(C_6H_{10}O_5)_n$ . Il est composé de molécules de glucose.

Le grain d'amidon se présente sous forme de granules semi-cristallins.

On peut expliquer le changement de réaction du mélange que nous étudions en se penchant au niveau moléculaire.

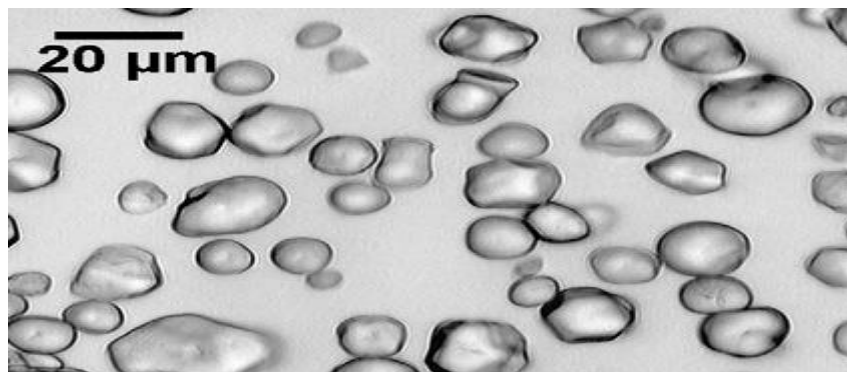
En effet les molécules de l'amidon de maïs ont des formes assez irrégulières et rugueuses. Quand on rajoute de l'eau à l'amidon, les molécules aqueuses forment un manteau fragile autour des molécules d'amidon. Dans cette enveloppe, elles forment une sorte de boules qui peuvent glisser les unes sur les autres. Au niveau macroscopique, on se trouve face à une matière qui semble liquide. Mais lors d'un choc, ce liquide devient solide. Au niveau moléculaire, la membrane faite d'eau est détruite momentanément. Les molécules d'amidon retrouvent leurs formes irrégulières et s'accrochent les unes aux autres et empêchent leur glissement.

Quelques propriétés de la maïzena :

Formule brute :  $C_6H_{10}O_5$ .

Masse molaire : **162.06 g/mol.**

Masse volumique : **1.2 g / ml**



*Figure IV.4 : Vue microscopique du granulé de la maïzena.*

# Matériels et méthodes utilisés pour l'élaboration du système de refroidissement

## IV.2.2. Elaboration du composite MCP/ Graphite/ Maïzena

Préparation du composite, on commence par :

- La pesée des différents éléments constituant le composite :
  - **MCP:** 45.2% (7.33 kg).
  - **Graphite:** 17.28% (2.79 kg).
  - **Maïzena:** 37.6% (6.09 kg).
- On place les différents éléments dans différents récipients.



**MCP:** 7.33 kg (45.2%).



**Maïzena:** 6.09 kg (37.6%).



**Graphite:** 2.79 kg (17.28%).

*Figure IV.5 : Les différents composants du composite MCP/ Graphite/ Maïzena.*

- Le récipient contenant le MCP est ensuite placé dans un bain-marie pour le faire fondre entièrement, les différents éléments sont ajoutés au MCP fondu en mélangeant progressivement pour avoir un mélange homogène.

# Matériels et méthodes utilisés pour l'élaboration du système de refroidissement

## IV.3. Fabrication du conteneur et de l'échangeur

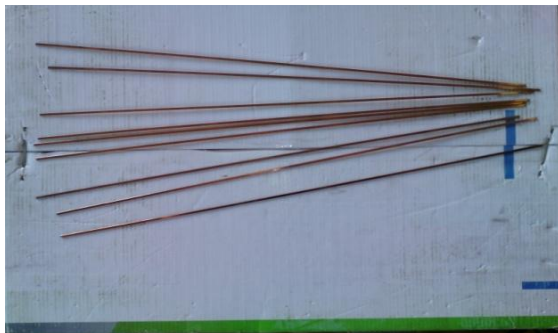
- L'échangeur

Le matériel et les matériaux utilisés :

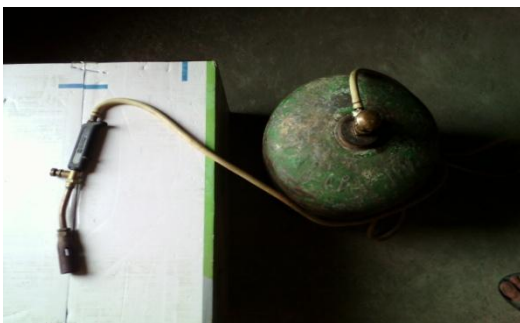
- Un tube de cuivre de diamètre intérieur et extérieur respectivement de 12 et 14 mm et d'une longueur de 9 m.
- Coudes en cuivre (28 coudes).
- Coupe cuivre.
- Des baguettes en bronze.
- Une bouteille de gaz butane.
- Un chalumeau.
- Du papier à verre.



a) Coupe cuivre.



b) Baguettes en bronze.



c) Bouteille de gaz butane et un chalumeau.



d) Coudes en cuivre.

*Figure IV.6 : Matériel utilisé pour la réalisation d'un échangeur.*

**Le processus de fabrication :**

- On coupe le cuivre en utilisant le coupe cuivre pour obtenir 12 tubes de 52 cm, 2 tubes de 45 cm et 13 tubes de 2.5 cm de longueur.
- Le nettoyage des extrémités des tubes avec du papier à verre pour avoir une bonne soudure.

# Matériels et méthodes utilisés pour l'élaboration du système de refroidissement



*Figure IV.7 : Les tubes de cuivre après leur nettoyage.*

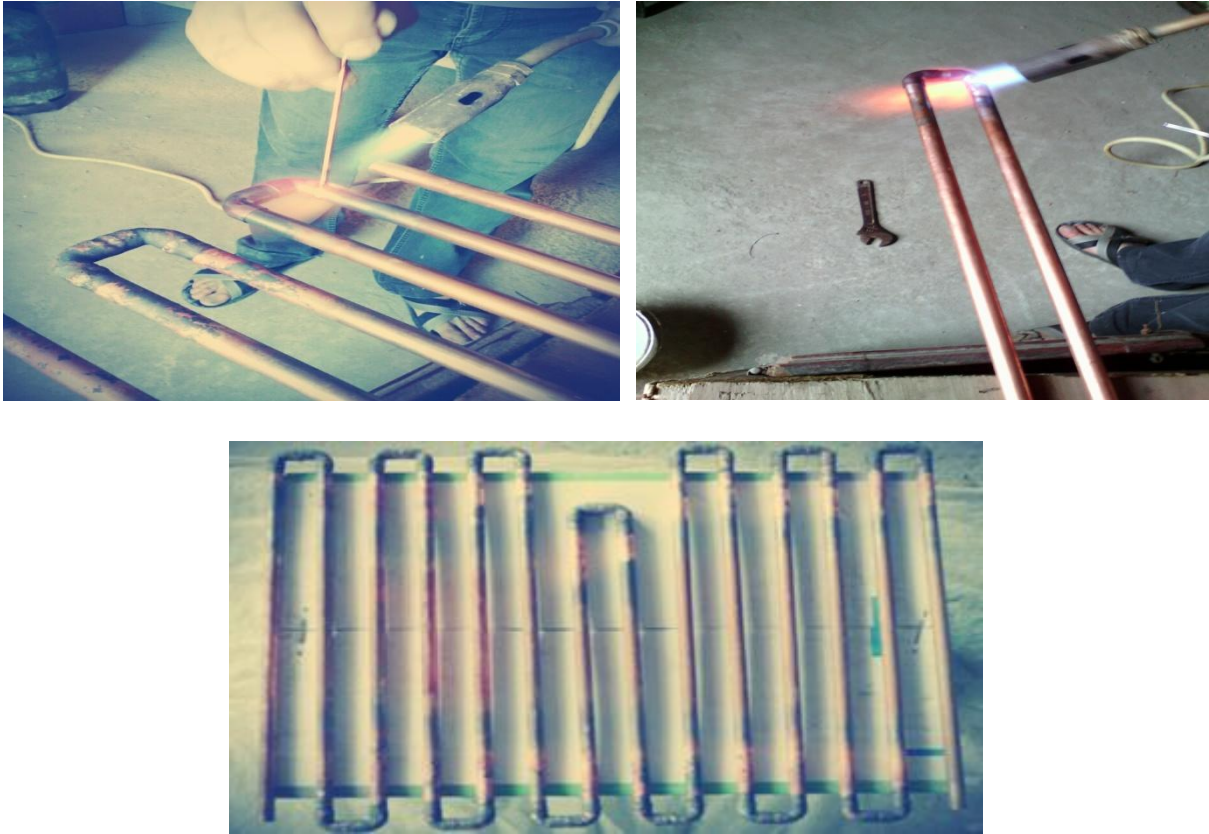
- Assemblage des coudes avec les tubes de 2.5 cm comme représenté sur la figure ci-dessous.



*Figure IV.8 : Assemblage des coudes avec les petits tubes.*

- Assemblage des coudes avec les grands tubes.
- Commencer la soudure en chauffant entre les tubes et les coudes en utilisant le chalumeau comme source de chaleur pour faire fondre les baguettes de bronze dans les joints jusqu'à obtention d'un serpentín de dimension souhaité.

# Matériels et méthodes utilisés pour l'élaboration du système de refroidissement



*Figure IV.9 : Soudure des tubes de cuivre avec les coudes pour obtenir un serpentin.*

- **Le conteneur**

**Le matériel et les matériaux utilisés**

- Une feuille d'acier inoxydable de 0.9 mm d'épaisseur.
- Poste à souder.

**Processus de fabrication**

- Découpage de la feuille ( $67 \times 64$ ).
- Découpage des extrémités de la feuille (3 cm)
- Découpage d'une autre feuille en guise de couvercle ( $61 \times 58$ ).
- Peindre le conteneur et l'échangeur en noir.



*Figure IV.10 : Le conteneur utilisé.*

# Matériels et méthodes utilisés pour l'élaboration du système de refroidissement

---

## IV.4. Remplissage du conteneur avec le composite

Après avoir laissé le conteneur séché on place l'échangeur à l'intérieur de celui-ci en prenant soin de le soulever d'environ 1 cm pour laisser passer le composite au dessous et au dessus du serpentín en utilisant des attaches fixés sur la base du conteneur.

Mettre un film d'aluminium sur toute la surface intérieure du conteneur pour avoir une meilleure étanchéité.



*Figure IV.11 : L'échangeur à l'intérieur du conteneur.*

Après avoir bien mélangé le MCP avec le graphite et la maïzena jusqu'à obtention d'un mélange homogène, on verse le composite à l'intérieur du conteneur et on le couvre avec une bâche en plastique pour protéger le mélange des fourmis après l'avoir bien étalé sur toute la surface intérieure du conteneur.



*Figure IV.12 : Le conteneur rempli avec le composite.*

## IV.4. Campagne de mesures des températures

- Notre objectif est de refroidir le panneau photovoltaïque et pour cela, on a utilisé deux panneaux identiques de 50 W chacun dont l'un d'eux servira de témoin.

# Matériels et méthodes utilisés pour l'élaboration du système de refroidissement

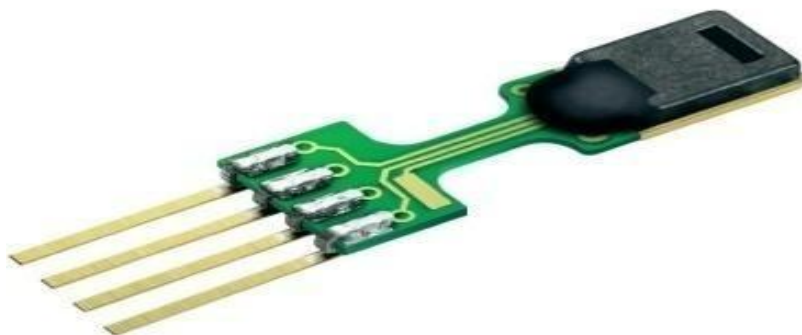


*Figure IV.13 : Les deux panneaux photovoltaïques utilisés.*

- Pour effectuer nos tests, on a utilisé des capteurs de température.

*Tableau IV.3 : Caractéristiques du capteur de température*

Humidité relative	
Température de fonctionnement	De -40 à +70 °C
Plage de mesure	0 – 100% HR (entre -20 et +60°)
Précision (à 25°C)	±2% (échelle 10-90%)
	±4% (échelle 0-100%)
Température	
Température de fonctionnement	De -40 à +70°C
Précision	±0.3°C à 25°C
	±0.4°C de +5° à +40°C
	±0.9°C de -40° à +70°C



*Figure IV.14 : Capteur de température.*

# Matériels et méthodes utilisés pour l'élaboration du système de refroidissement

---

Le SHT75 est un capteur numérique de température et d'humidité. Ce capteur intègre des éléments de capteur et de traitement de signal dans un format compact. Il offre une sortie numérique entièrement calibrée.



*Figure IV.15 : Les capteurs de températures utilisés.*

- Après avoir laissé notre mélange sécher, on l'a recouvert avec du papier aluminium et on a placé les capteurs de températures dans de différents endroits comme indiqué ci après :
- **Capteur (1)** : surface intérieure du MCP.
- **Capteur (2)** : surface extérieure du MCP.



**Capteur (3)**: Sur la surface arrière du panneau photovoltaïque avec le système de refroidissement (entre le panneau et le système de refroidissement).

# Matériels et méthodes utilisés pour l'élaboration du système de refroidissement

---



- **Capteur (4):** Sur la surface avant du panneau photovoltaïque avec le système de refroidissement.
- **Capteur (5):** Surface avant du panneau photovoltaïque témoin.



- **Capteur (4):** Surface arrière du panneau photovoltaïque témoin.



# Matériels et méthodes utilisés pour l'élaboration du système de refroidissement

- Après avoir fini de placer les capteurs de températures On place les deux panneaux sous les mêmes conditions de température et de rayonnement comme suit:



## IV5. Les modifications subites par le prototype

Après avoir terminé les tests et analysé les résultats, nous avons estimé que notre système de refroidissement n'est pas bien plaqué avec le panneau PV. Ce qui induit à la présence d'une lame d'air entre le dispositif réalisé et le capteur PV et qui joue le rôle d'un isolant. C'est ce qui nous a poussé à faire quelques modifications à notre prototype pour améliorer ses performances.

- **Les modifications réalisées**
  - Après avoir vidé le conteneur, on a percé deux trous sur ce dernier pour retourner l'échangeur et éliminer le couvercle en acier pour le remplacer par un couvercle en papier aluminium (épais) déformable.
  - On a fait fondre le composite retiré du conteneur et le verser ensuite à l'intérieur de ce dernier et le laisser se solidifier.

# Matériels et méthodes utilisés pour l'élaboration du système de refroidissement

---



*Figure IV.16 : Le composite après solidification.*

- Après la solidification du composite on lui a mis une couche de papier aluminium pour couvrir le tout et éviter les fuites.



*Figure IV.17 : Notre prototype après modifications.*

- Après avoir fini avec les modifications apportées au prototype, on a refait les tests de la même manière que les tests précédents en espérant avoir de meilleurs résultats.

## IV.6. Conclusion

Dans ce chapitre, on a montré et expliqué les matériaux et les matériels utilisés pour la fabrication d'un système de refroidissement pour un panneau solaire photovoltaïque dans le but d'éviter sa surchauffe et d'augmenter son rendement.

On a aussi expliqué et montré dans ce chapitre les différentes étapes de la réalisation de ce prototype et la campagne de mesures des températures.

# **Chapitre IV**

## **Résultats et discussion**

## V.1. Introduction

Comme nous l'avons cité précédemment, nous avons placé les deux panneaux de dimension (665×631×30) dans les mêmes conditions de rayonnement et de température.

Deux tests expérimentaux ont été effectués pour la mesure des différentes températures (avant et après modification du prototype réalisé). Chaque test est réalisé en deux cas :

- Sans utilisation du fluide caloporteur (sans eau).
- En utilisant un fluide caloporteur (avec de l'eau).



*Figure V.1 : Les deux panneaux photovoltaïques utilisés.*

## V.2. Sans utilisation du fluide caloporteur (on utilise seulement le MCP)

Ce test consiste à effectuer une série de mesures de températures sur les deux panneaux photovoltaïques. L'un d'eux est muni d'un composite MCP et l'autre servira de témoin (sans refroidissement).

- **Test du 13/07/2017**

A 12 h 48 mn, on a lancé l'enregistrement des températures. Ce jour-là il y avait beaucoup de chaleur et la température de l'air a atteint des températures caniculaires (très élevées avoisinant 50 °C).

Les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau ci-dessous :

# Résultats et discussion

*Tableau V.1 : Résultats obtenus en utilisant seulement le MCP le 13/06/2017.*

<b>Temps</b>	<b>T° de la surface Intérieure du MCP (°C)</b>	<b>T° de la surface extérieure du MCP (°C)</b>	<b>T° des cellules avec le MCP (°C)</b>	<b>T° des cellules sans le MCP (°C)</b>	<b>T° de la surface du panneau avec le MCP (°C)</b>	<b>T° de la surface du panneau sans le MCP (°C)</b>
<b>12:48:36</b>	34,85	36,79	52,36	57,85	58,49	61,66
<b>12:49:02</b>	35,01	36,83	52,62	57,88	59,03	62,46
<b>12:50:00</b>	35,29	36,95	53,32	59,77	59,69	63,51
<b>12:51:03</b>	35,61	37,13	54,28	60,81	60,28	64,27
<b>12:52:01</b>	35,92	37,23	54,81	61,13	60,77	64,83
<b>12:53:04</b>	36,26	37,43	55,21	61,26	61,23	65,15
<b>12:54:02</b>	36,56	37,59	55,89	61,81	61,90	65,77
<b>12:55:00</b>	36,86	37,70	55,60	59,64	61,40	65,02
<b>12:56:03</b>	37,21	37,83	54,50	57,11	61,10	64,82
<b>12:57:01</b>	37,51	38,07	55,29	60,54	61,77	65,24
<b>12:58:04</b>	37,84	38,23	55,47	59,83	61,76	64,86
<b>12:59:01</b>	38,10	38,26	55,40	59,90	61,92	64,74
<b>13:00:04</b>	38,40	38,31	56,01	60,41	62,42	64,58
<b>13:01:02</b>	38,65	38,42	56,38	61,29	62,89	64,89
<b>13:02:00</b>	38,82	38,52	56,75	61,26	62,86	64,56
<b>13:03:03</b>	38,90	38,48	56,34	59,80	63,26	65,04
<b>13:04:01</b>	38,90	38,55	57,31	60,94	64,04	65,5
<b>13:05:05</b>	38,79	38,43	56,93	58,84	63,66	65,46
<b>13:06:02</b>	38,65	38,42	56,31	57,16	63,07	64,00
<b>13:07:00</b>	38,58	38,52	57,28	60,16	64,06	65,32
<b>13:08:04</b>	38,57	38,61	57,96	61,04	64,06	64,94
<b>13:09:02</b>	38,52	38,85	58,84	61,98	64,86	65,92
<b>13:10:00</b>	38,55	39,03	58,72	60,72	64,36	65,68
<b>13:11:03</b>	36,64	39,24	57,98	57,64	63,52	65,27
<b>13:12:01</b>	38,83	39,42	59,56	62,27	64,50	66,40
<b>13:13:04</b>	39,10	39,62	60,19	62,79	64,39	66,50
<b>13:14:02</b>	39,34	39,78	59,07	59,64	63,63	65,82
<b>13:15:00</b>	39,65	39,93	59,46	60,53	63,70	65,46
<b>13:16:03</b>	39,99	40,11	58,98	59,78	62,88	64,73
<b>13:17:01</b>	40,28	40,18	58,54	58,00	62,98	64,96
<b>13:18:04</b>	40,62	40,30	58,86	59,50	62,94	64,93
<b>13:19:02</b>	40,94	40,44	60,41	61,29	63,94	66,32
<b>13:20:00</b>	41,24	40,55	60,51	61,51	64,42	66,69
<b>13:21:03</b>	41,55	40,80	61,40	62,09	64,95	66,79
<b>13:22:01</b>	41,83	41,03	61,92	62,82	64,94	66,54
<b>13:23:05</b>	42,12	41,18	60,32	59,38	64,07	65,90

## Résultats et discussion

13:24:03	42,38	41,34	60,06	59,58	63,83	65,24
13:25:01	42,62	41,49	59,51	57,90	63,42	64,92
13:26:04	42,88	41,68	60,44	60,48	64,04	65,16
13:27:02	43,13	41,90	60,72	60,84	64,25	65,29
13:28:00	43,37	42,04	59,41	58,85	63,27	64,43
13:29:04	43,65	42,25	61,05	61,20	64,73	64,92
13:30:02	43,86	42,47	61,27	60,62	64,48	64,62
13:31:05	44,12	42,74	61,82	61,96	64,82	64,99
13:32:03	44,34	42,87	60,30	59,30	63,89	64,27
13:33:01	44,59	43,07	60,88	59,94	64,09	64,34

- **Test du 05/10/2017**

Ce jour là, il y avait un ciel clair avec des températures de l'air avoisinant les 30°C à l'ombre.

La campagne de mesures a été lancée à 12h59mn, et l'enregistrement des températures a donné les résultats illustrés dans le tableau ci-dessous :

*Tableau V.2. Résultats obtenus en utilisant seulement le MCP le 05/10/2017.*

Temps	T° de la surface extérieure du MCP (°C)	T° de la surface intérieure du MCP (°C)	T° des cellules avec le MCP (°C)	T° des cellules sans le MCP (°C)	T° de la surface du panneau avec le MCP (°C)	T° de la surface du panneau sans le MCP (°C)
12:59:03	25,21	35,70	46,99	56,24	58,00	61,09
13:02:06	25,60	36,87	47,95	59,06	60,48	63,65
13:03:04	25,75	37,14	48,16	59,25	60,44	63,50
13:04:02	25,90	37,46	48,35	59,70	60,37	64,14
13:05:06	26,06	37,73	48,62	59,84	60,68	64,35
13:06:03	26,21	37,96	48,70	58,91	60,60	63,44
13:07:01	26,37	38,17	48,84	59,03	60,79	63,38
13:08:04	26,52	38,45	49,03	58,49	60,58	63,34
13:09:02	26,69	38,67	49,18	59,12	61,34	63,82
13:10:06	26,86	38,89	49,38	59,44	61,54	63,92
13:11:04	27,03	39,10	49,60	59,86	61,66	63,98
13:12:01	27,20	39,34	49,78	60,23	61,88	64,43
13:13:04	27,37	39,58	50,05	60,67	61,98	64,98
13:14:02	27,56	39,8	50,23	60,84	61,09	64,50
13:15:00	27,73	40,00	50,23	59,32	61,38	64,77
13:16:04	27,95	40,21	50,31	59,73	61,49	64,70
13:17:02	28,11	40,40	50,47	59,64	61,63	64,84
13:18:04	28,31	40,62	50,64	59,42	61,86	65,09

## Résultats et discussion

<b>13:19:02</b>	28,50	40,83	50,79	60,00	60,90	63,94
<b>13:20:00</b>	28,69	41,03	50,76	58,30	60,62	62,78
<b>13:21:04</b>	28,90	41,18	50,71	58,06	60,73	63,22
<b>13:22:02</b>	29,08	41,31	50,78	58,65	61,27	63,47
<b>13:23:00</b>	29,28	41,46	50,86	59,22	61,19	63,99
<b>13:24:03</b>	29,49	41,63	51,04	60,12	62,06	64,61
<b>13:26:05</b>	29,91	42,00	51,33	58,77	62,07	63,54
<b>13:27:02</b>	30,12	42,16	51,50	58,53	62,36	64,00
<b>13:28:00</b>	30,30	42,32	51,72	58,40	61,82	63,66
<b>13:29:03</b>	30,53	42,48	51,74	57,72	61,89	62,61
<b>13:30:01</b>	30,73	42,61	51,81	58,51	62,25	63,30
<b>13:31:05</b>	30,95	42,76	52,01	59,14	62,55	64,30
<b>13:32:03</b>	31,14	42,91	52,16	60,35	63,02	64,45
<b>13:33:00</b>	31,35	43,05	52,36	60,36	63,01	64,4
<b>13:34:03</b>	31,56	43,21	52,51	59,40	62,36	63,47
<b>13:35:01</b>	31,78	43,34	52,56	58,57	62,33	63,70
<b>13:36:05</b>	32,01	43,43	52,65	59,01	62,89	63,54
<b>13:37:03</b>	32,21	43,54	52,84	60,05	63,53	64,16
<b>13:38:01</b>	32,43	43,67	53,04	59,51	63,61	64,46
<b>13:39:04</b>	32,67	43,84	53,08	59,57	63,65	64,44
<b>13:40:02</b>	32,88	44,00	53,16	59,76	63,00	64,17
<b>13:41:06</b>	33,12	44,14	53,16	59,86	63,36	64,14
<b>13:42:04</b>	33,34	44,21	53,27	59,18	63,47	63,67
<b>13:43:01</b>	33,57	44,30	53,32	58,51	63,08	62,96
<b>13:44:04</b>	33,80	44,35	53,33	57,64	62,69	62,72
<b>13:45:02</b>	34,04	44,45	53,38	58,23	63,53	63,30
<b>13:46:00</b>	34,29	44,50	53,57	58,84	63,73	63,13
<b>13:47:04</b>	34,57	44,49	53,77	58,38	63,71	62,70
<b>13:48:02</b>	34,86	44,50	53,94	57,20	63,16	62,06
<b>13:49:00</b>	35,16	44,54	54,04	57,10	63,47	61,87
<b>13:50:02</b>	35,51	44,64	54,23	56,60	63,46	60,76
<b>13:51:00</b>	35,81	44,79	54,35	55,88	63,45	60,29
<b>13:52:04</b>	36,21	44,97	54,64	56,40	63,97	60,60
<b>13:53:02</b>	36,54	45,23	55,05	57,92	65,11	61,78
<b>13:54:00</b>	36,91	45,50	55,41	57,77	64,76	61,88
<b>13:55:03</b>	37,33	45,80	56,26	58,19	65,38	62,06
<b>13:56:01</b>	37,70	46,08	56,90	57,28	65,38	62,20
<b>13:57:05</b>	38,05	46,55	57,51	57,84	65,86	62,31
<b>13:58:03</b>	38,56	46,99	58,28	57,67	65,87	61,66
<b>13:59:01</b>	38,74	47,41	58,58	56,91	66,14	61,56
<b>14:00:04</b>	38,91	47,82	58,74	56,68	66,14	61,15

# Résultats et discussion

Les résultats montrés dans les tableaux V.1 et V.2 sont représentés sous forme graphique comme suit :

## V.2.1. Toutes les températures mesurées

- Les graphes ci-dessous représentent les différentes températures mesurées des deux tests en fonction du temps.

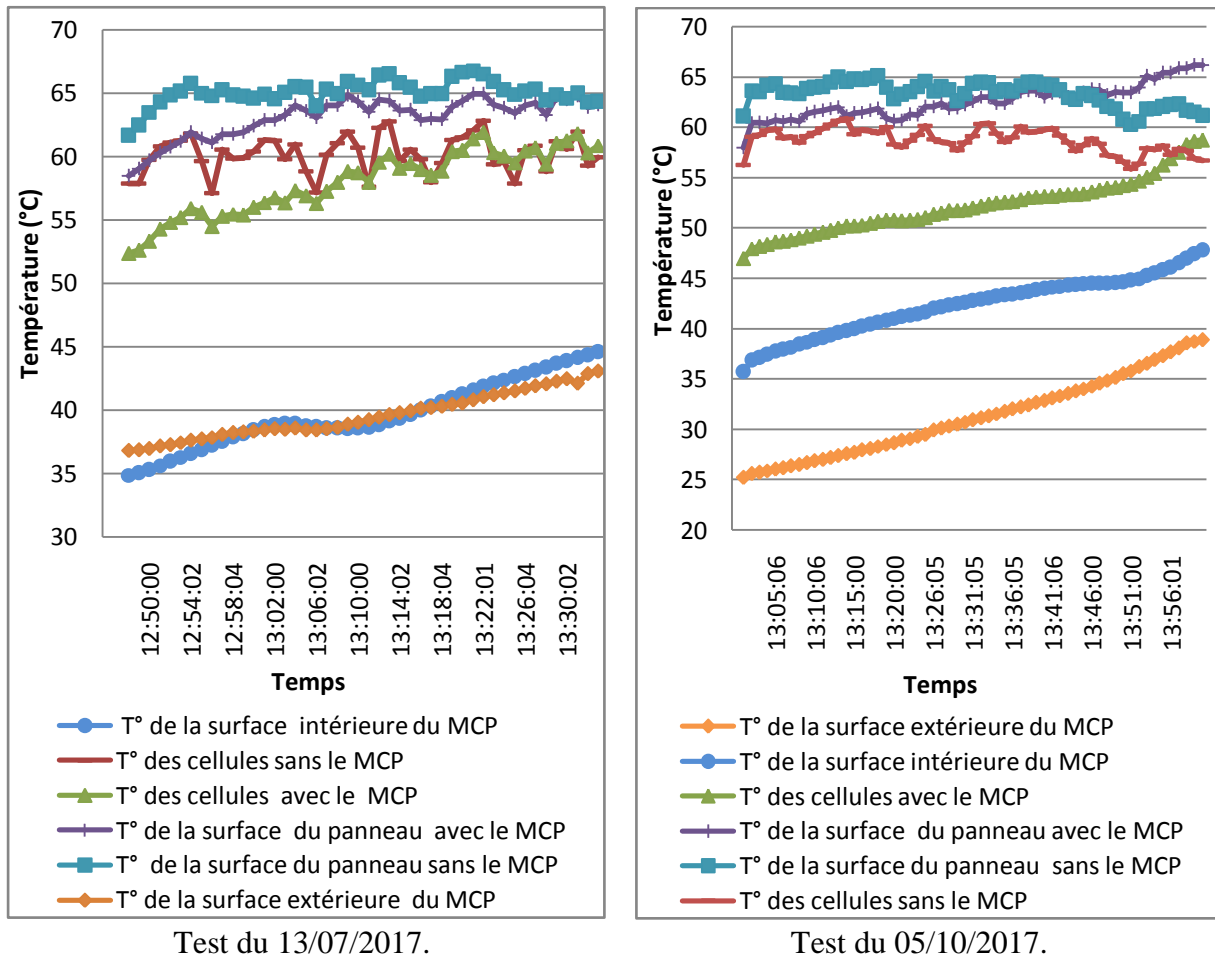
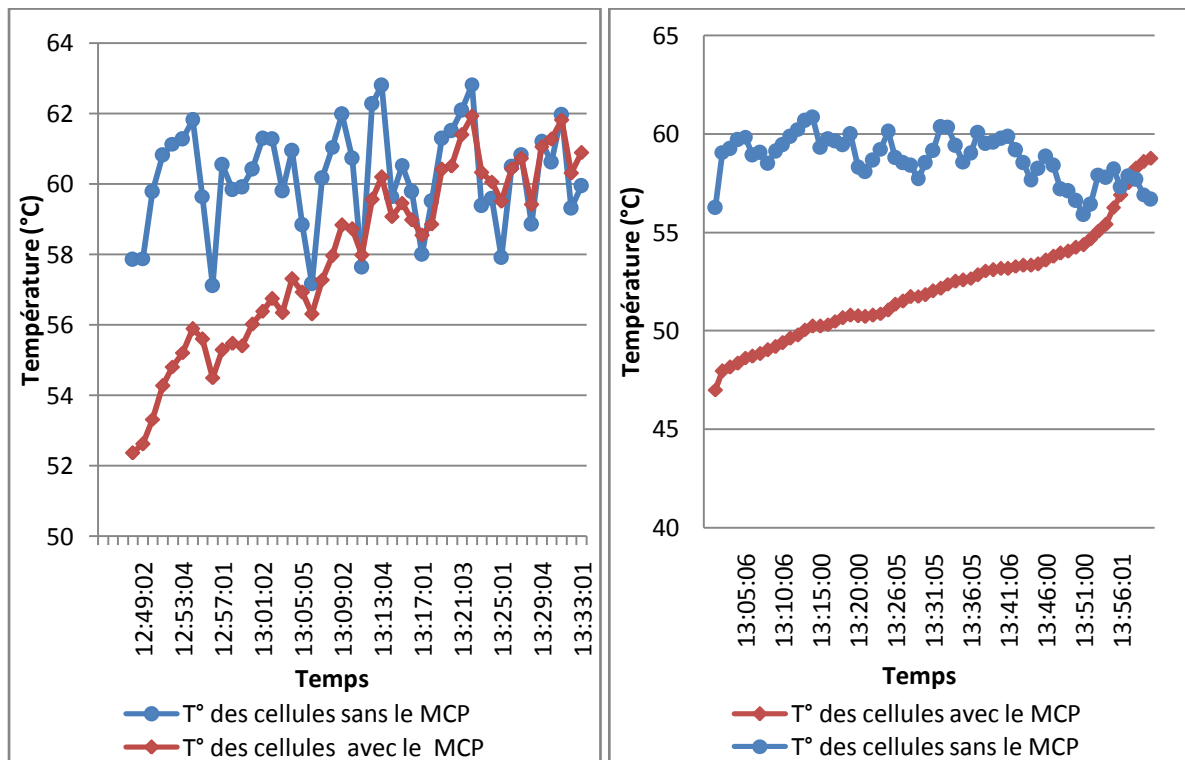


Figure V.2 : Les températures en fonction du temps.

## V.2.2. La température des cellules des panneaux PV

- Les graphes suivant représentent la variation de température des cellules en fonction du temps des deux tests (en utilisant seulement le MCP).



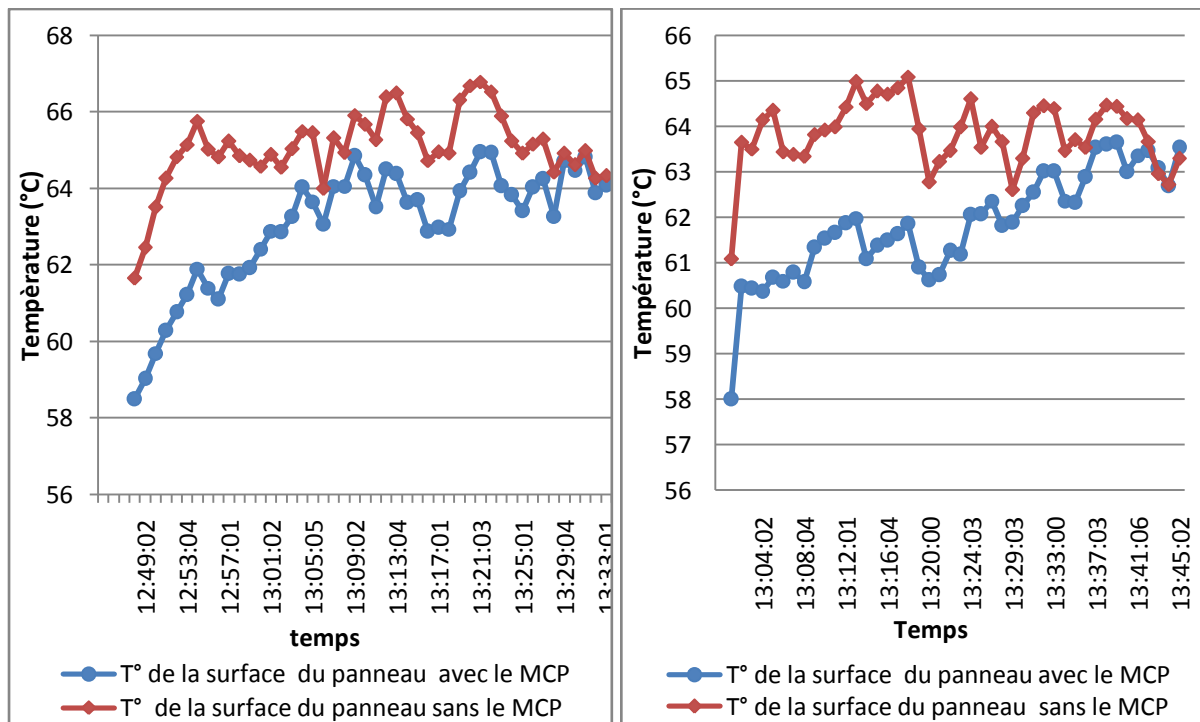
*Figure V.3 : Température des cellules en fonction du temps.*

Dans cette figure nous remarquons, au début, une différence de température importante entre les cellules du panneau avec le MCP et les cellules du panneau sans le MCP, cela indique que celui-ci a stocké une quantité d'énergie qu'il a absorbé des cellules PV et qui leur a permis de se refroidir.

Après un moment, nous assistons à une diminution de l'écart de température mesuré, puis à la fin de la mesure, nous constatons que la température des cellules du panneau témoin est légèrement inférieure à celles des cellules du panneau avec le MCP à cause de la fusion complète de ce dernier (la fin de la phase de transition solide-liquide), ce qui veut dire que le MCP ne stocke plus de l'énergie thermique par chaleur latente mais il la stocke seulement par chaleur sensible.

## V.2.3. La température de la surface des panneaux PV

- Les graphes suivant représentent la variation des températures de la surface des deux panneaux en fonction du temps.



Teste du 13/07/2017.

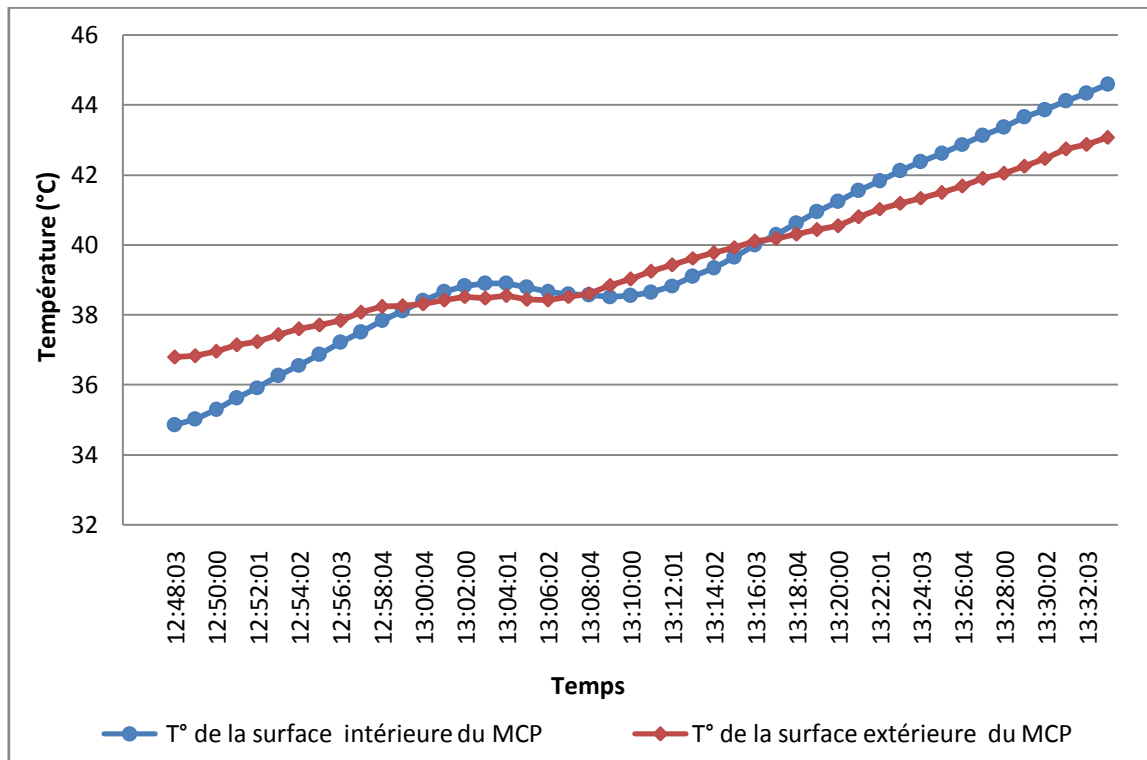
Teste du 05/10/2017.

**Figure V.4 :** Température de la surface des deux panneaux PV en fonction du temps.

Nous remarquons, au début du test, qu'il y a une différence de température entre la surface des deux panneaux, puis cet écart diminue en fonction du temps. A la fin du test, les températures se rapprochent de plus en plus de telle sorte que la température de la surface du panneau avec le MCP soit légèrement inférieure à celle de la surface du panneau sans MCP. Ce qui explique que le MCP influence aussi sur la surface du panneau PV (il refroidit la surface du panneau PV).

## V.2.4. La température du MCP

- Le graphe ci-dessous représente les températures de la surface intérieure et extérieure du MCP en fonction du temps.



*Figure V.5 : Température du MCP en fonction du temps.*

Sur cette figure, nous remarquons une augmentation progressive de la température du MCP (phase de stockage par chaleur sensible) jusqu'à atteindre une certaine température pour laquelle elle se stabilise (une température entre 38 et 39 °C) pendant un bout de temps. Ce qui veut dire que le MCP est en phase de transition solide-liquide (phase de stockage d'énergie thermique par chaleur latente). Après un moment, la température commence à augmenter en fonction du temps, ce qui explique la fusion totale du MCP (phase de stockage d'énergie thermique par chaleur sensible).

On peut calculer la quantité de chaleur stockée par le MCP avec la relation suivante :

$$Q = m \Delta h = m C_p \Delta T + m L_f \quad (V.1)$$

## V.3. En utilisant le MCP et le fluide caloporteur

A 13h 48mn, nous avons mis en marche le robinet pour faire circuler l'eau de refroidissement à l'intérieur de l'échangeur encastré à l'intérieur du conteneur et du composite.

Une série de mesures de températures ont été effectuées. Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau V.3.

# Résultats et discussion

*Tableau V.3 : Résultats obtenus en utilisant le MCP et le fluide caloporteur le 13/06/2017.*

<b>Temps</b>	<b>T° de la surface intérieure du MCP (°C)</b>	<b>T° de la surface extérieure du MCP (°C)</b>	<b>T° des cellules sans le MCP (°C)</b>	<b>T° des cellules avec le MCP et le fluide caloporteur (°C)</b>	<b>T° de la surface du panneau avec le MCP et le fluide caloporteur (°C)</b>	<b>T° de L'eau à la sortie de l'échangeur (°C)</b>
13:48:36	46,99	45,46	58,21	60 ,98	65,23	34,99
13:49:02	46,85	45,48	56,51	60,15	64,78	34,59
13:50:00	46,23	45,54	56,84	59,32	64,52	33,24
13:51:03	45,45	45,71	58,18	59,80	64,92	32,27
13:52:01	44,72	45,68	56,81	58,42	64,41	32,41
13:53:04	43,96	45,73	57,26	58,31	63,71	32,12
13:54:02	43,30	45,60	55,84	56,92	62,84	31,57
13:55:04	42,55	45,42	58,08	57,60	63,33	31,65
13:56:02	41,93	45,45	59,52	58,12	63,77	31,46
13:57:00	41,34	45,32	58,73	57 ,94	63,08	30,99
13:58:03	40,74	45,25	61,00	58,73	63,79	30,40
13:59:01	40,20	45,08	57,58	57,62	62,84	30,10
14:00:04	39,67	44,88	58,16	57,38	62,72	30,10
14:01:01	39,17	44,61	55,23	56,21	61,28	30,06
14:02:04	38,76	44,40	58,15	56,64	61,78	29,73
14:03:02	38,36	44,22	56,77	56,17	61,13	29,23
14:04:05	37,97	43,97	57,57	56,18	61,37	28,33
14:05:02	37,64	43,78	58,29	56,33	61,29	27,85
14:06:00	37,30	43,56	58,51	56,18	60,68	27,64
14:07:02	36,95	43,23	55,15	55,62	59,91	27,43
14:08:00	36,65	42,94	55,02	54,80	59,58	27,23
14:09:03	36,35	42,72	56,17	54,80	59,14	26,97
14:10:00	36,08	42,53	57,43	55,18	59,24	27,03
14:11:03	35,80	42,34	58,70	55,80	59,60	26,83
14:12:00	35,55	42,17	55,79	54,99	58,97	26,34
14:13:03	35,29	41,93	57,12	55,16	59,01	25,98
14:14:01	35,08	41,75	57,00	54,78	58,89	25,01
14:15:03	34,85	41,56	58,64	55,58	59,30	25,03
14:16:01	34,66	41,36	54,89	54,54	58,22	25,13
14:17:04	34,45	41,15	57,52	54,71	58,62	25,29
14:18:01	34,26	41,00	57,71	54,91	58,44	25,35
14:19:04	34,07	40,78	56,32	54,24	57,90	25,29

## Résultats et discussion

<b>14:20:01</b>	33,91	40,59	56,37	54,00	57,82	25,23
<b>14:21:04</b>	33,73	40,36	56,41	53,97	57,92	25,30
<b>14:22:01</b>	33,57	40,17	55,52	53,90	57,37	25,31
<b>14:23:04</b>	33,39	39,99	55,13	53,60	57,24	25,37
<b>14:24:01</b>	33,27	39,90	56,65	54,30	57,39	25,42
<b>14:25:04</b>	33,12	39,77	55,43	53,83	57,32	25,53
<b>14:26:01</b>	33,03	39,62	55,09	53,42	57,04	25,53
<b>14:27:04</b>	32,91	39,50	56,44	53,55	57,16	25,47
<b>14:28:01</b>	32,82	39,38	53,93	52,88	56,51	25,41
<b>14:29:04</b>	32,68	39,24	56,80	53,76	56,89	25,17
<b>14:30:02</b>	32,58	39,13	55,86	53,34	56,47	25,03
<b>14:31:04</b>	32,48	38,89	53,82	52,81	56,56	24,38
<b>14:32:02</b>	32,39	38,81	56,20	53,57	56,99	24,57
<b>14:33:04</b>	32,29	38,69	56,56	53,78	56,83	24,46
<b>14:34:02</b>	32,22	38,51	55,07	53,28	56,58	24,49
<b>14:35:04</b>	32,12	38,46	56,09	53,63	56,74	24,14
<b>14:36:02</b>	32,04	38,42	57,07	54,03	57,08	24,35
<b>14:37:04</b>	31,97	38,34	56,82	53,80	56,74	24,46
<b>14:38:02</b>	31,91	38,26	53,76	53,08	55,97	24,60
<b>14:39:04</b>	31,83	38,19	55,40	53,06	55,78	24,40
<b>14:40:02</b>	31,77	38,07	56,78	53,40	56,14	24,39
<b>14:41:04</b>	31,71	38,03	54,74	52,83	55,89	24,73
<b>14:42:02</b>	31,65	37,98	54,32	52,56	55,44	24,64
<b>14:43:04</b>	31,56	37,91	54,52	52,78	55,53	24,69
<b>14:44:02</b>	31,49	37,83	53,91	52,28	55,09	24,89
<b>14:45:04</b>	31,37	37,73	53,64	52,25	55,33	24,87
<b>14:46:02</b>	31,37	37,61	53,97	51,86	55,29	24,73
<b>14:47:04</b>	31,35	37,52	53,04	51,45	54,48	24,66
<b>14:48:01</b>	31,32	37,35	53,49	51,39	54,63	24,58
<b>14:49:04</b>	31,30	37,25	55,20	51,81	55,44	24,58
<b>14:50:01</b>	31,27	37,22	56,20	52,43	55,66	24,59
<b>14:51:04</b>	31,22	37,13	53,52	51,68	54,98	24,63
<b>14:52:01</b>	31,17	37,09	53,93	51,47	54,82	24,67
<b>14:53:04</b>	31,12	37,08	54,72	51 ,89	54,88	24,62

# Résultats et discussion

Tableau V.4 : Résultats obtenus en utilisant le MCP et le fluide caloporteur le 05/10/2017.

Temps	T° de la extérieure surface du MCP (°C)	T° de la intérieure surface du MCP (°C)	T° des cellules avec le MCP et le fluide caloporteur (°C)	T° de la surface du panneau avec le MCP et le fluide caloporteur (°C)	T° de la surface du panneau sans le MCP et le fluide caloporteur (°C)	T° des cellules sans le MCP et le fluide caloporteur (°C)
14:09:39	41,72	49,92	58,31	65,62	57,62	53,25
14:10:02	41,83	50,01	58,24	65,45	57,07	52,89
14:11:06	42,03	50,15	58,10	65,74	56,96	52,81
14:12:04	42,10	50,27	58,01	66,06	57,46	53,72
14:13:02	41,87	50,39	58,06	66,17	57,38	53,72
14:15:22	41,05	50,33	58,12	65,84	56,49	52,98
14:16:02	40,88	50,28	58,07	66,7	57,82	53,94
14:17:00	40,59	50,24	58,05	65,92	57,51	53,05
14:18:04	40,26	50,13	57,87	65,42	56,78	52,86
14:19:02	39,97	50,00	57,65	65,05	56,09	52,42
14:20:00	39,68	49,88	57,47	65,62	56,87	52,38
14:23:42	38,65	49,26	56,38	63,25	53,51	49,50
14:24:05	38,57	49,18	56,22	63,41	53,22	49,91
14:25:02	38,33	48,94	55,97	63,88	54,17	50,63
14:26:00	38,11	48,77	55,78	62,98	53,96	50,07
14:27:03	37,87	48,58	55,42	61,99	53,22	49,54
14:28:01	37,67	48,39	55,06	62,56	54,26	50,16
14:29:05	37,46	48,20	54,95	62,92	54,94	51,12
14:30:03	37,28	48,05	54,88	63,26	55,80	51,80
14:31:01	37,11	47,93	54,91	63,46	56,54	52,18
14:32:04	36,93	47,82	55,00	63,98	57,39	53,30
14:33:01	36,79	47,74	55,04	64,04	57,76	53,84
14:34:06	36,63	47,66	54,94	63,72	57,48	53,29
14:35:03	36,51	47,54	54,84	63,58	56,82	52,86
14:36:01	36,40	47,42	54,79	63,51	57,28	52,91
14:37:04	36,28	47,29	54,63	63,56	56,93	53,17
14:38:02	36,17	47,19	54,45	62,35	55,43	51,81
14:39:00	36,08	47,02	54,09	62,50	54,82	51,35
14:40:04	35,99	46,84	53,73	60,78	52,49	50,13
14:41:02	35,89	46,64	53,35	61,66	53,97	50,35
14:42:05	35,78	46,46	53,20	61,02	53,81	50,35
14:43:02	35,68	46,33	53,10	61,40	54,35	50,36
14:44:00	35,60	46,18	52,92	61,12	53,67	49,93
14:45:04	35,50	46,04	52,73	60,93	53,43	49,59
14:46:02	35,41	45,90	52,67	61,96	54,58	50,98

## Résultats et discussion

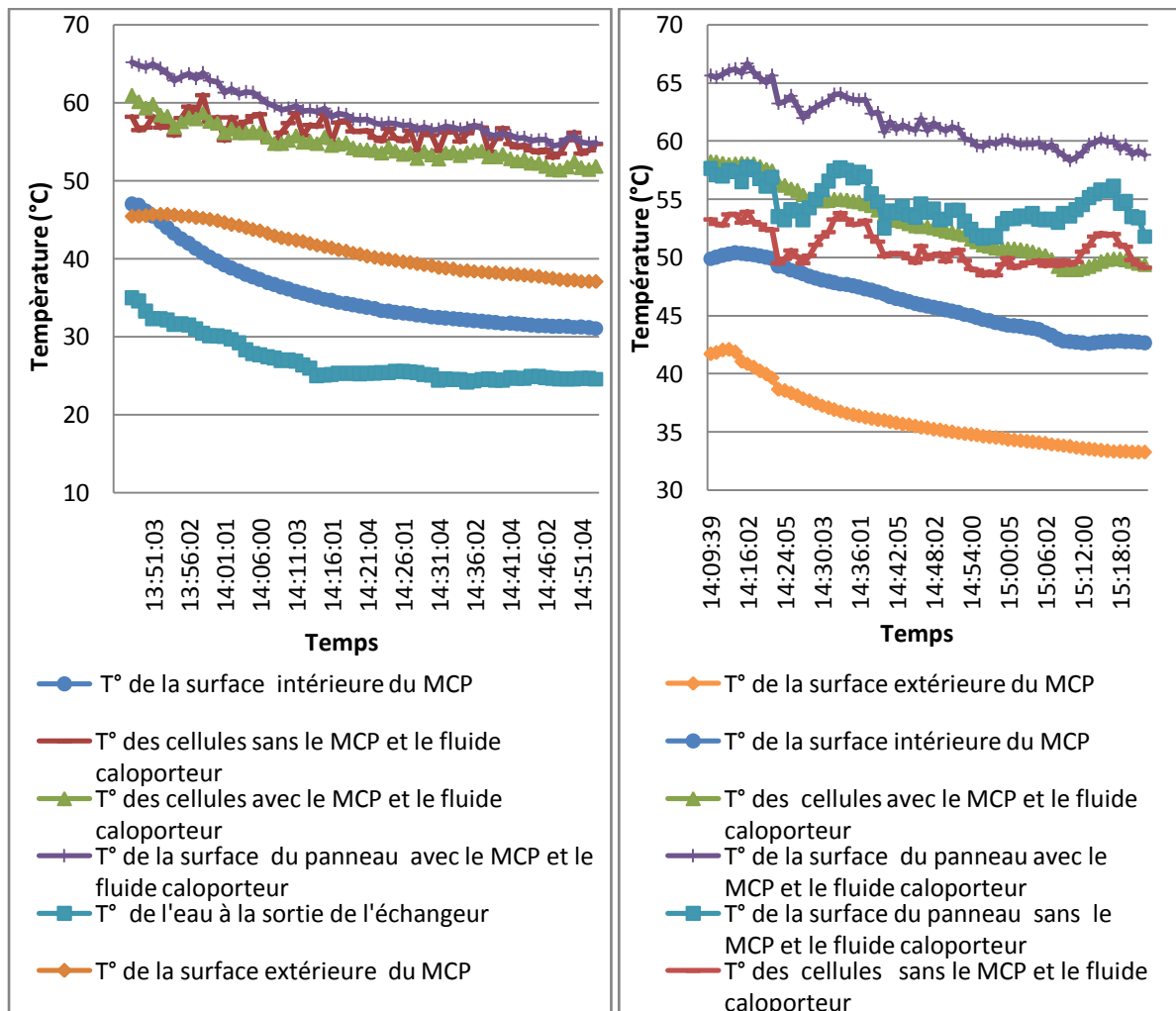
<b>14:47:00</b>	35,34	45,81	52,70	60,91	53,89	49,90
<b>14:48:02</b>	35,25	45,71	52,58	61,54	54,12	50,25
<b>14:49:00</b>	35,17	45,61	52,47	61,14	53,21	50,31
<b>14:50:04</b>	35,07	45,49	52,28	60,91	53,35	49,66
<b>14:51:02</b>	35,01	45,36	52,16	61,20	54,04	50,34
<b>14:52:00</b>	34,94	45,26	52,06	61,08	54,11	50,66
<b>14:53:03</b>	34,87	45,13	51,98	60,18	53,11	49,73
<b>14:54:00</b>	34,80	45,00	51,59	60,06	52,39	49,02
<b>14:55:05</b>	34,73	44,84	51,36	59,61	51,84	48,9
<b>14:56:02</b>	34,66	44,69	51,08	59,55	51,65	48,48
<b>14:57:00</b>	34,59	44,56	50,96	59,94	51,84	48,73
<b>14:58:03</b>	34,52	44,42	50,80	59,73	51,74	48,48
<b>14:59:00</b>	34,46	44,28	50,77	60,08	52,88	49,42
<b>15:00:05</b>	34,38	44,20	50,77	60,07	53,32	49,93
<b>15:01:02</b>	34,31	44,14	50,76	59,86	53,32	49,14
<b>15:02:00</b>	34,25	44,06	50,69	59,70	53,53	49,29
<b>15:03:03</b>	34,19	43,94	50,59	59,76	53,48	49,59
<b>15:04:01</b>	34,14	43,88	50,47	59,78	53,74	49,55
<b>15:05:05</b>	34,08	43,77	50,36	59,88	53,26	49,76
<b>15:06:02</b>	34,04	43,60	50,25	59,35	53,24	49,32
<b>15:07:00</b>	33,96	43,32	49,83	59,71	53,26	49,71
<b>15:08:03</b>	33,91	42,99	49,22	59,09	53,00	49,28
<b>15:09:01</b>	33,85	42,84	48,98	58,75	53,78	49,72
<b>15:10:05</b>	33,76	42,77	48,97	58,36	53,56	49,39
<b>15:11:02</b>	33,69	42,71	48,98	58,60	54,10	49,62
<b>15:12:00</b>	33,62	42,65	49,06	59,06	54,51	50,51
<b>15:13:03</b>	33,55	42,62	49,23	59,70	55,13	51,03
<b>15:14:01</b>	33,49	42,64	49,43	59,86	55,48	51,82
<b>15:15:05</b>	33,43	42,70	49,69	60,20	55,77	52,05
<b>15:16:03</b>	33,40	42,74	49,83	59,91	55,74	51,92
<b>15:17:00</b>	33,36	42,78	49,90	59,96	56,11	52,03
<b>15:18:03</b>	33,33	42,79	49,89	59,34	54,66	51,07
<b>15:19:01</b>	33,32	42,78	49,81	59,62	54,88	50,95
<b>15:20:05</b>	33,30	42,75	49,68	58,91	53,51	49,81
<b>15:21:03</b>	33,3	42,69	49,52	59,15	53,40	49,38
<b>15:22:00</b>	33,28	42,63	49,38	58,81	51,83	49,13

# Résultats et discussion

Les résultats montrés dans les tableaux V.3 et V.4 sont représentés sous forme graphique comme suit :

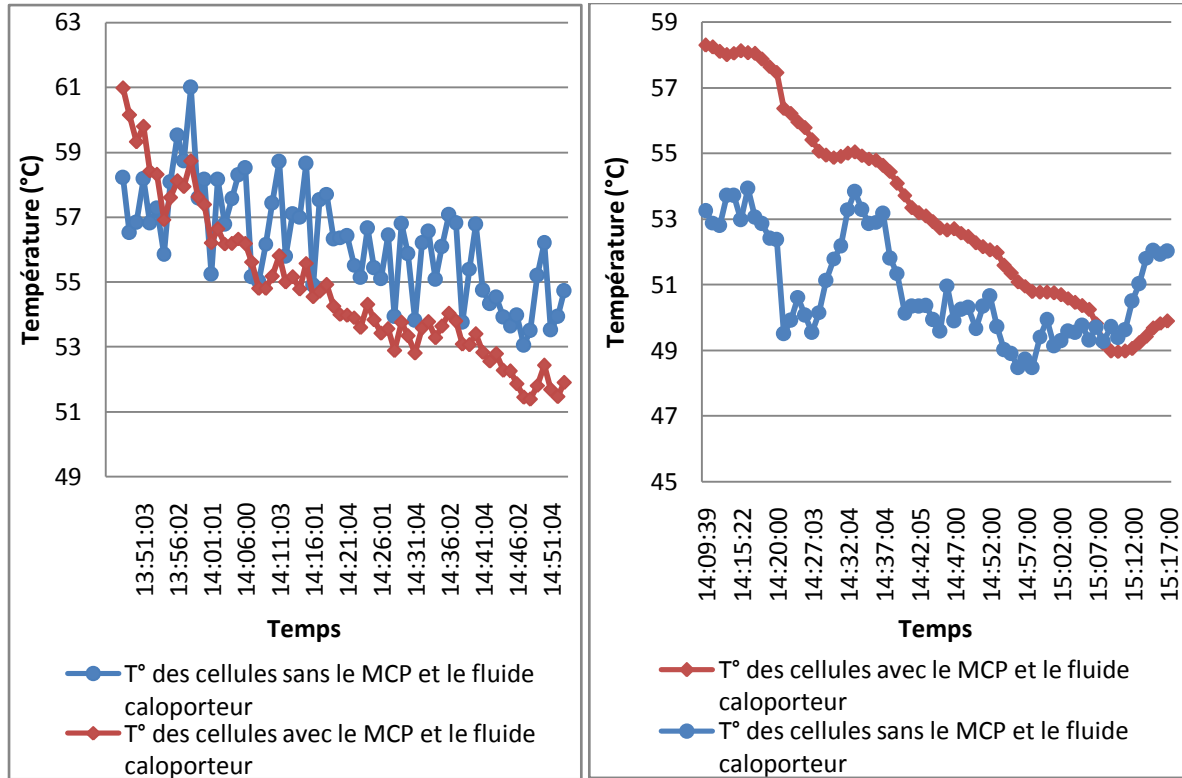
## V.3.1. Toutes les températures mesurées

- Les graphes ci-dessous représentent les différentes températures mesurées en fonction du temps des deux tests (en utilisant le MCP et le fluide caloporteur).



## V.3.2. La température des cellules des panneaux PV

- Les graphes ci-dessous représentent la variation de la température des cellules avec et sans refroidissement (cas avec le MCP et le fluide caloporteur).



Teste du 13/07/2017.

Teste du 05/10/2017.

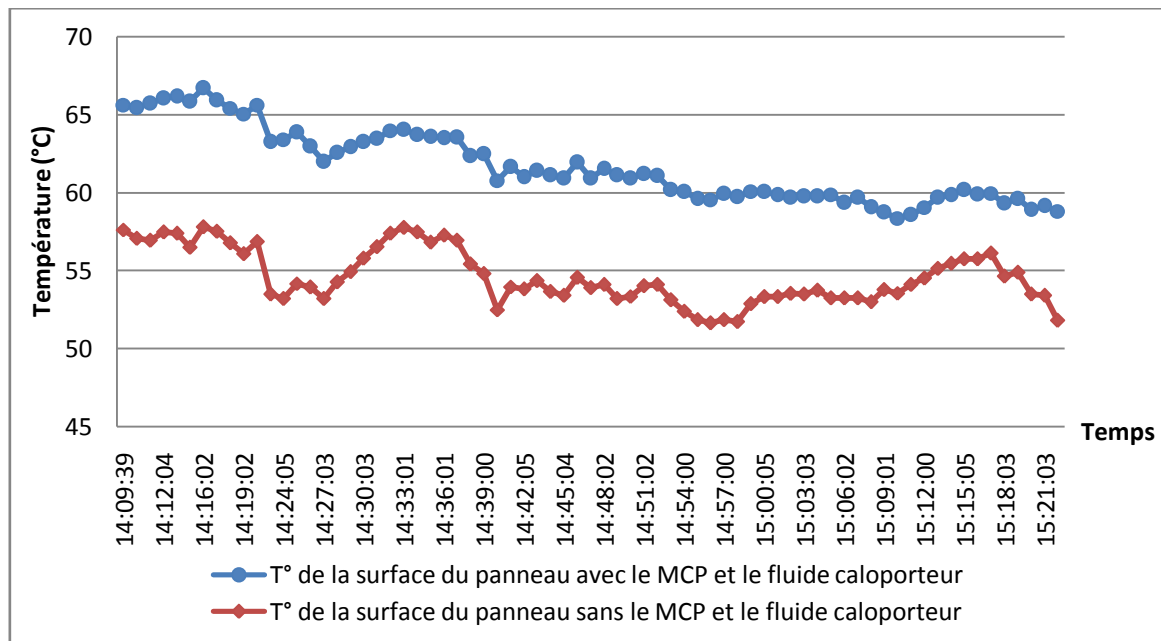
*Figure V.7 : Température des cellules en fonction du temps.*

Sur cette figure, nous remarquons qu'au début de la mesure, les cellules équipées de MCP et le fluide caloporteur a enregistré une température plus élevée que celle des cellules sans refroidissement, car le matériau est chargé d'énergie et ne peut plus absorber de la chaleur (fusion complète du MCP). Après la circulation de l'eau à l'intérieur de l'échangeur, nous remarquons une diminution de température des cellules avec système de refroidissement pour obtenir une température inférieure à celle des cellules non refroidies.

On conclut alors que le fluide caloporteur a une influence sur le refroidissement des cellules PV en absorbant l'énergie calorifique cédée par le MCP.

## V.3.3. La température de la surface des panneaux PV

- Le graphe ci-dessous représente la variation de la température de la surface des deux panneaux PV (cas en utilisant le MCP et le fluide caloporteur).



*Figure V.8 : Température de la surface des panneaux PV en fonction du temps.*

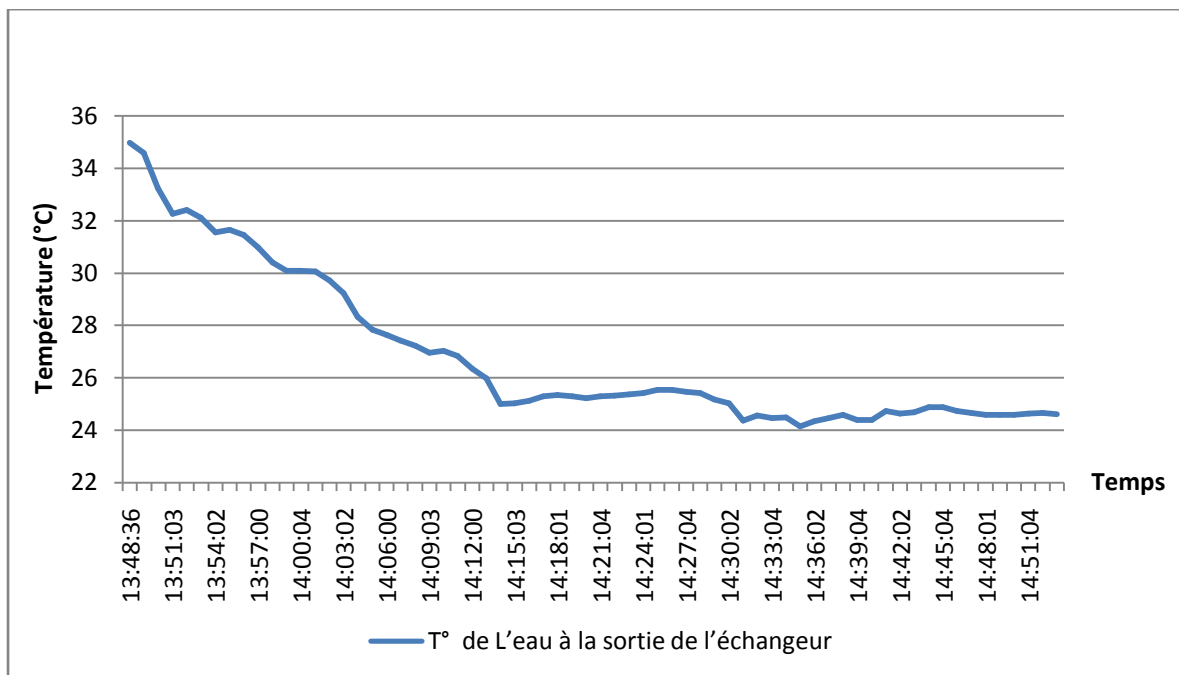
Dans ce graphe nous remarquons que la température de la surface du panneau avec le MCP et le fluide caloporteur diminue progressivement car le MCP commence à céder sa chaleur.

Nous remarquons aussi que la température de la surface du panneau PV avec le système de refroidissement est supérieure à celle du panneau témoin car l'expérience n'a pas duré suffisamment longtemps pour que nous puissions observer la suite de l'évolution de la température, car nous estimons que la température de la surface du panneau avec le MCP et le fluide caloporteur va diminuer encore plus à force que le MCP décharge sa chaleur et la cède au fluide caloporteur.

## V.3.4. La température de l'eau à la sortie de l'échangeur

- Le graphe représente l'évolution de la température de l'eau à la sortie de l'échangeur.

# Résultats et discussion



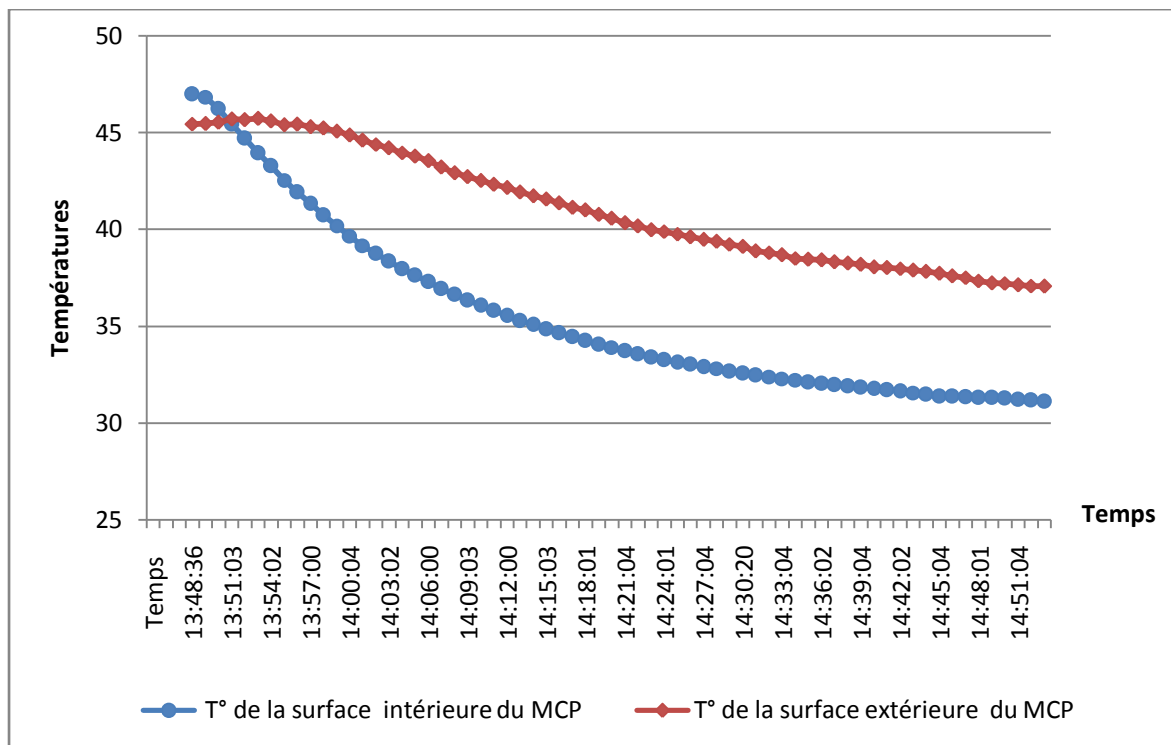
*Figure V.9 : L'évolution de la température de l'eau à la sortie de l'échangeur en fonction du temps.*

Au début de l'expérience, une température élevée de l'eau est enregistrée car le MCP décharge sa chaleur (chaleur sensible) et la cède au fluide caloporteur. Puis on assiste à une diminution progressive de la température de l'eau jusqu'à se stabiliser (diminue lentement) car durant cette période le MCP ne cède plus beaucoup d'énergie par chaleur sensible.

## V.3.5. La température du MCP

- Le graphique ci-dessous représente l'évolution de la température du MCP en fonction du temps (cas avec le MCP et le fluide caloporteur).

# Résultats et discussion



*Figure V.10 : Température du MCP en fonction du temps.*

Nous remarquons dans cette figure une diminution de la température du MCP. Ce qui veut dire que ce dernier déstocke de la chaleur et la cède au fluide caloporteur (refroidissement de la phase liquide du MCP).

Malheureusement on n'a pas eu suffisamment de temps pour laisser notre expérience continuer jusqu'à l'obtention de la phase de transition liquide-solide (solidification) et le refroidissement de la phase solide du MCP.

## V.4. Conclusion :

D'après les résultats de nos tests, nous constatons que l'utilisation du matériau à changement de phase nous a permis de réduire la température des cellules d'un panneau PV de plusieurs degrés.

Mais nous avons constaté aussi que quand le MCP atteint des températures élevées (supérieures à la température de fusion), où il fond complètement, il ne peut plus assurer tout seul le refroidissement du panneau PV, alors on a recours à un fluide caloporteur (eau) pour décharger le MCP de son énergie et lui permettre de se recharger en absorbant la chaleur du panneau PV.

# **Chapitre VI**

## **Simulation numérique**

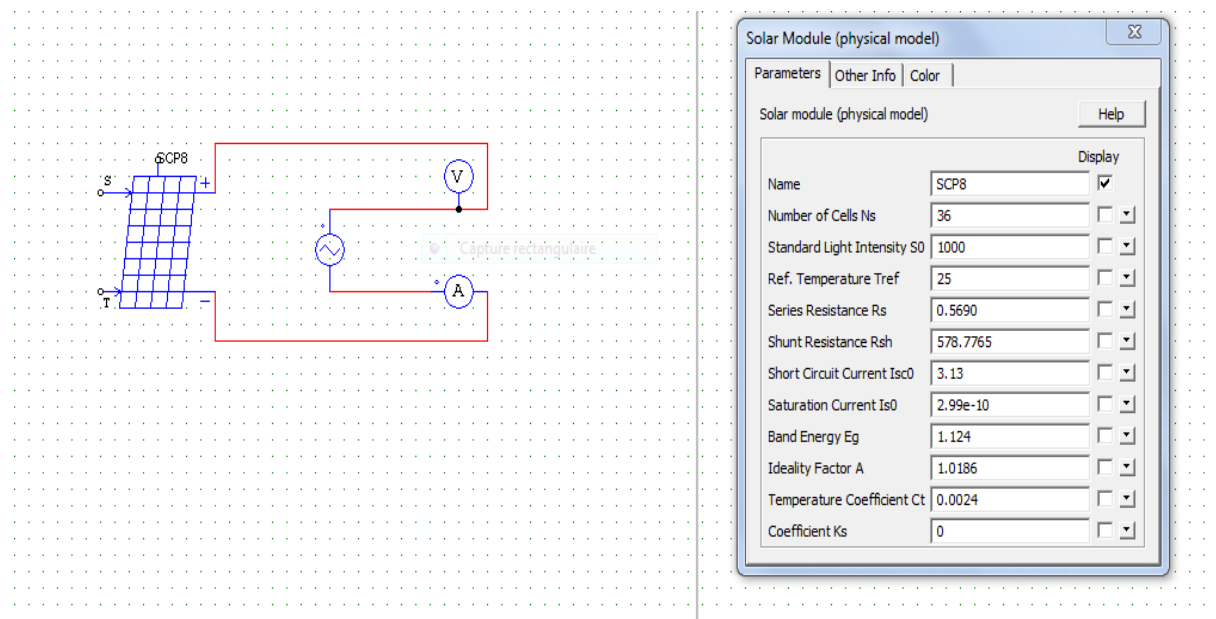
## VI.1. Introduction

Après avoir effectué différentes mesures et comparé l'évolution de la température en fonction du temps pour les différents éléments sur les deux panneaux, nous allons effectuer une simulation numérique sur le logiciel PSIM et discuter des différents résultats obtenus pour nous permettre d'avoir la tension, la puissance et le courant maximum en fonction de la variation du rayonnement et de la température des cellules.

## VI.2. Logiciel utilisé

PSIM est un logiciel de Simulation de circuit électronique, conçu spécifiquement pour une utilisation dans l'électronique de puissance et simulations d'entraînement de moteurs mais peut être utilisé pour simuler tout circuit électronique. Développé par Powersim, PSIM utilise l'analyse nodale et la règle trapézoïdale comme la base de son algorithme de simulation. PSIM fournit une interface de capture schématique et un visualiseur de forme d'onde Simview. PSIM a plusieurs modules qui étendent sa fonctionnalité dans des domaines spécifiques de simulation et de conception de circuits, notamment: théorie de contrôle, moteurs électriques, photovoltaïque et éoliennes. Le PSIM est utilisé par l'industrie pour la recherche et le développement de produits et il est utilisé pour la recherche et l'enseignement [43].

Pour notre simulation nous avons utilisé le logiciel cité ci-dessus, grâce auquel, en faisant entrer tous les paramètres du panneau PV utilisé, on peut avoir la puissance, la tension et le courant maximum, en variant seulement la densité de flux du rayonnement solaire ainsi que la température des cellules. Voici quelques images de fenêtres du fonctionnement du logiciel.



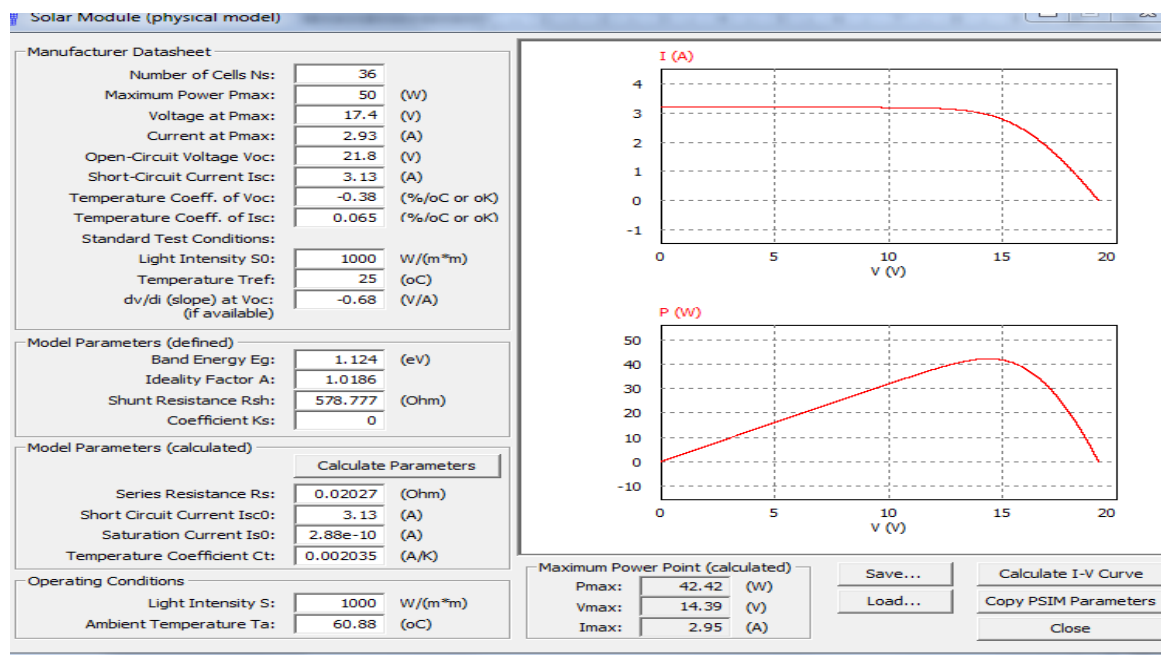


Figure VI.1 : Le logiciel PSIM.

## VI.3. Les résultats de la simulation

### VI.3.1. Sans utilisation du fluide caloporteur (fonctionnement avec seulement le MCP)

Les résultats obtenus de la simulation numérique sont illustrés dans les tableaux ci-dessous :

Tableau VI.1 : Résultats de la simulation en utilisant seulement le MCP le 13/07/2017.

Rayonnement (W/m <sup>2</sup> )	T° des cellules sans le MCP (°C)	P <sub>max</sub> (W)	I <sub>max</sub> (A)	V <sub>max</sub> (V)	T° des cellules avec le MCP (°C)	P <sub>max</sub> (W)	I <sub>max</sub> (A)	V <sub>max</sub> (V)
A 12 :48 : 991 W/m <sup>2</sup>	57,85	42,72	2,92	14,62	52,36	43,88	2,92	15,01
	57,88	42,71	2,92	14,61	52,62	43,83	2,92	14,99
	59,77	42,31	2,92	14,84	53,32	43,68	2,92	14,94
	60,81	42,09	2,92	14,40	54,28	43,48	2,92	14,78
A 12 :52 : 989 W/m <sup>2</sup>	61,13	41,95	2,92	14,38	54,81	43,28	2,92	14,84
	61,26	41,92	2,92	14,37	55,21	43,20	2,92	14,81
	61,81	41,80	2,92	14,33	55,89	43,06	2,92	14,76
	59,64	42,26	2,92	14,49	55,6	43,12	2,92	14,78
	57,11	42,80	2,92	14,67	54,5	43,35	2,92	14,86
	60,54	42,07	2,92	14,42	55,29	43,18	2,92	14,80
	59,83	42,22	2,92	14,48	55,47	43,14	2,92	14,79
	59,9	42,21	2,92	14,47	55,4	43,16	2,92	14,79

# Simulation numérique

	60,41	42,10	2,92	14,43	56,01	43,03	2,92	14,75
	61,29	41,91	2,92	14,37	56,38	42,95	2,92	14,72
	61,26	41,92	2,92	14,37	56,75	42,75	2,92	14,70
	59,8	42,23	2,92	14,48	56,34	42,96	2,92	14,73
	60,94	41,99	2,92	14,40	57,31	42,76	2,92	14,66
	58,84	42,43	2,92	14,55	56,93	42,84	2,92	14,68
	57,16	42,79	2,92	14,67	56,31	42,97	2,92	14,73
A 13 :07 : 987 W/m <sup>2</sup>	60,16	42,08	2,91	14,45	57,28	42,68	2,91	14,66
	61,04	41,89	2,91	14,39	57,96	42,54	2,91	14,61
	61,98	41,69	2,91	14,32	58,84	42,36	2,91	14,55
	60,72	41,96	2,91	14,41	58,72	42,38	2,91	14,56
	57,64	42,61	2,91	14,63	57,98	42,54	2,91	14,61
	62,27	41,63	2,91	14,30	59,56	42,20	2,91	14,50
	62,79	41,52	2,91	14,26	60,19	42,07	2,91	14,45
	59,64	42,19	2,91	14,49	59,07	42,31	2,91	14,53
	60,53	42,00	2,91	14,43	59,46	42,22	2,91	14,50
	59,78	42,16	2,91	14,48	58,98	42,33	2,91	14,54
	58,00	42,53	2,91	14,61	58,54	42,42	2,91	14,57
	59,5	42,22	2,91	14,50	58,86	42,39	2,91	14,56
	61,29	41,84	2,91	14,37	60,41	42,02	2,91	14,44
	61,51	41,79	2,91	14,36	60,51	42,00	2,91	14,43
62,09	41,67	2,91	14,31	61,4	41,84	2,91	14,36	
A 13 :22 984 W/m <sup>2</sup>	62,82	41,40	2,90	14,26	61,92	41,59	2,90	14,33
	59,38	42,12	2,90	14,51	60,32	41,93	2,90	14,44
	59,58	42,08	2,90	14,50	60,06	41,98	2,90	14,46
	57,9	42,44	2,90	14,62	59,51	42,10	2,90	14,50
	60,48	41,89	2,90	14,43	60,44	41,90	2,90	14,44
	60,84	41,89	2,90	14,43	60,72	41,84	2,90	14,42
	58,85	42,24	2,90	14,55	59,41	42,12	2,90	14,51
	61,2	41,74	2,90	14,38	61,05	41,77	2,90	14,39
	60,62	41,86	2,90	14,42	61,27	41,73	2,90	14,38
	61,96	41,58	2,90	14,33	61,82	41,61	2,90	14,34
	59,3	42,14	2,90	14,52	60,30	41,93	2,90	14,45
	59,94	42,01	2,90	14,47	60,88	41,81	2,90	14,40

# Simulation numérique

Tableau VI.2 : Résultats de la simulation en utilisant seulement le MCP le 05/10/2017.

Rayonnement (W/m <sup>2</sup> )	T° des cellules avec le MCP (°C)	P <sub>max</sub> (W)	I <sub>max</sub> (A)	V <sub>max</sub> (V)	T° des cellules sans le MCP (°C)	P <sub>max</sub> (W)	I <sub>max</sub> (A)	V <sub>max</sub> (V)
A 13:00: 1000 W/m <sup>2</sup>	46,99	45,38	2,95	15,39	56,24	43,42	2,95	14,72
	47,95	45,18	2,95	15,32	59,06	42,81	2,95	14,52
	48,16	45,14	2,95	15,31	59,25	42,77	2,95	14,51
	48,35	45,10	2,95	15,29	59,70	42,68	2,95	14,84
	48,62	45,04	2,95	15,27	59,84	42,65	2,95	14,47
	48,70	45,02	2,95	15,27	58,91	42,85	2,95	14,53
	48,84	44,99	2,95	15,26	59,03	42,82	2,95	14,52
	49,03	44,95	2,95	15,24	58,49	42,93	2,95	14,56
	49,18	44,92	2,95	15,23	59,12	42,80	2,95	14,52
	49,38	44,88	2,95	15,22	59,44	42,73	2,95	14,49
	49,60	44,83	2,95	15,20	59,86	42,64	2,95	14,46
	49,78	44,83	2,95	15,20	60,23	42,56	2,95	14,44
	50,05	44,73	2,95	15,17	60,67	42,47	2,95	14,41
	50,23	44,70	2,95	15,16	60,84	42,43	2,95	14,39
	50,23	44,70	2,95	15,16	59,32	42,76	2,95	14,50
	50,31	44,68	2,95	15,15	59,73	42,76	2,95	14,47
	50,47	44,64	2,95	15,14	59,64	42,69	2,95	14,48
	50,64	44,64	2,95	15,14	59,42	42,74	2,95	14,50
	50,79	44,58	2,95	15,12	60,00	42,61	2,95	14,45
	50,76	44,58	2,95	15,12	58,30	42,98	2,95	14,58
50,71	44,59	2,95	15,12	58,06	43,03	2,95	14,59	
A 13:22: 994 W/m <sup>2</sup>	50,78	44,34	2,93	15,12	58,65	42,67	2,93	14,56
	50,86	44,34	2,93	15,12	59,22	42,55	2,93	14,52
	51,04	44,28	2,93	15,10	60,12	42,36	2,93	14,45
	51,33	44,22	2,93	15,08	58,77	42,64	2,93	14,55
	51,50	44,28	2,93	15,10	58,53	42,69	2,93	14,56
	51,72	44,14	2,93	15,06	58,40	42,72	2,93	14,57
	51,74	44,13	2,93	15,05	57,72	42,72	2,93	14,62
	51,81	44,12	2,93	15,05	58,51	42,70	2,93	14,57
	52,01	44,08	2,93	15,03	59,14	42,56	2,93	14,52
	52,16	44,04	2,93	15,02	60,35	42,31	2,93	14,43
	52,36	44,00	2,93	15,01	60,36	42,30	2,93	14,43
	52,51	43,97	2,93	15,00	59,40	42,51	2,93	14,50
	52,56	43,94	2,93	14,99	58,57	42,68	2,93	14,56
	52,65	43,94	2,93	14,99	59,01	42,59	2,93	14,53
52,84	43,90	2,93	14,97	60,05	42,37	2,93	14,46	

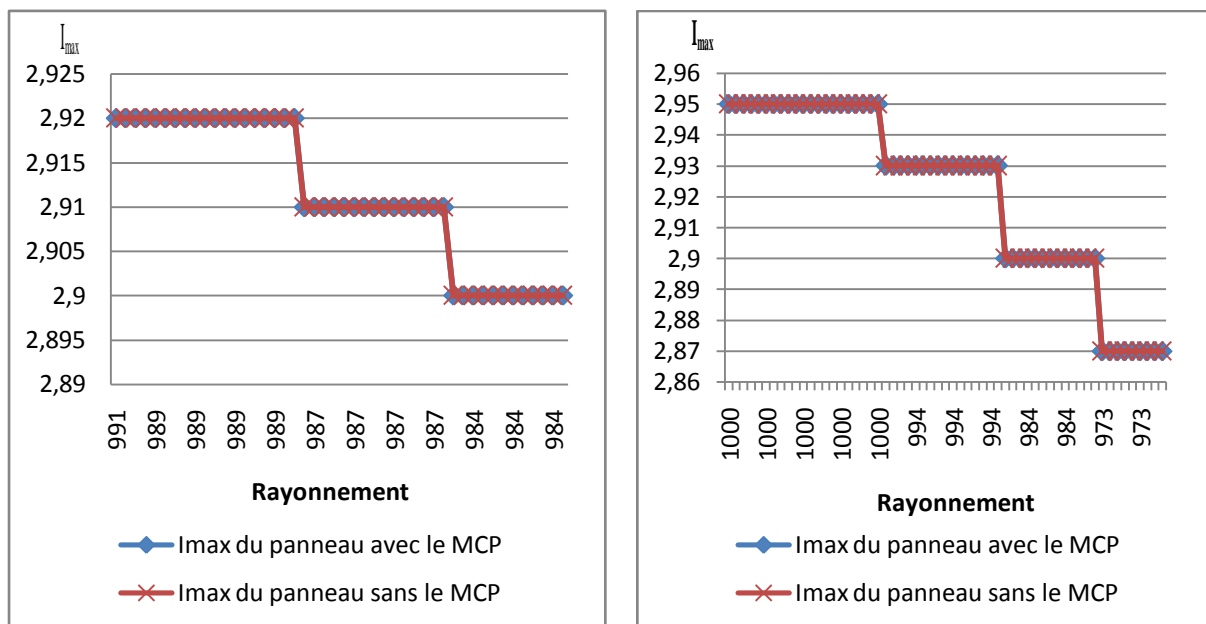
# Simulation numérique

	53,04	43,86	2,93	14,96	59,51	42,48	2,93	14,49
A 13:37: 984 W/m <sup>2</sup>	53,08	43,45	2,90	14,97	59,57	42,08	2,90	14,50
	53,16	43,43	2,90	14,96	59,76	42,05	2,90	14,48
	53,16	43,43	2,90	14,96	59,86	42,02	2,90	14,48
	53,27	43,41	2,90	14,95	59,18	42,17	2,90	14,53
	53,32	43,40	2,90	14,95	58,51	42,31	2,90	14,57
	53,33	43,39	2,90	14,95	57,64	42,49	2,90	14,64
	53,38	43,38	2,90	14,94	58,23	42,37	2,90	14,59
	53,57	43,34	2,90	14,93	58,84	42,24	2,90	14,55
	53,77	43,30	2,90	14,92	58,38	42,34	2,90	14,58
	53,94	43,27	2,90	14,90	57,20	42,58	2,90	14,67
	54,04	43,25	2,90	14,90	57,10	42,60	2,90	14,68
	54,23	43,21	2,90	14,88	56,60	42,71	2,90	14,71
	54,35	43,18	2,90	14,87	55,88	42,86	2,90	14,76
	A 13:52: 973 W/m <sup>2</sup>	54,64	42,68	2,87	14,86	56,40	42,32	2,87
55,05		42,60	2,87	14,83	57,92	42,00	2,87	14,63
55,41		42,52	2,87	14,81	57,77	42,03	2,87	14,64
56,26		42,34	2,87	14,74	58,19	41,94	2,87	14,61
56,90		42,21	2,87	14,70	57,28	42,13	2,87	14,67
57,51		42,09	2,87	14,66	57,84	42,02	2,87	14,63
58,28		41,93	2,87	14,60	57,67	42,05	2,87	14,64
58,58		41,86	2,87	14,58	56,91	42,21	2,87	14,70
58,74		41,83	2,87	14,57	56,68	42,26	2,87	14,71

Les résultats montrés dans les tableaux VI.1 et VI.2 sont représentés sous forme graphique comme suit :

## VI.3.1.1. Le courant

- Les graphes ci-dessous représentent la variation du courant en fonction du rayonnement et de la température des deux tests des deux panneaux (le panneau avec seulement le MCP et le panneau témoin).



Test du 13/07/2017.

Test du 05/10/2017.

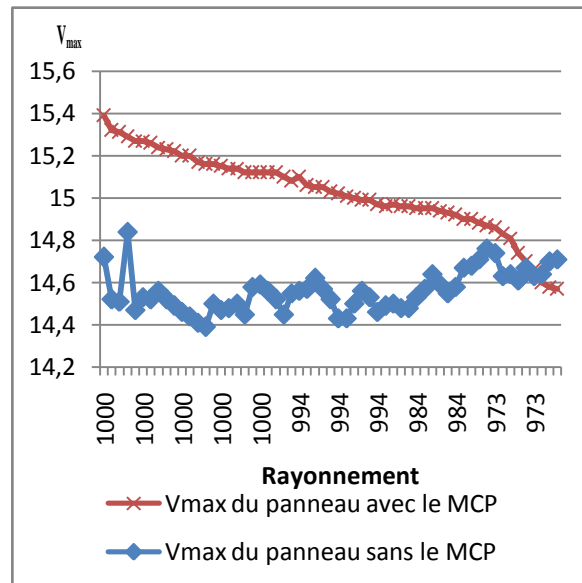
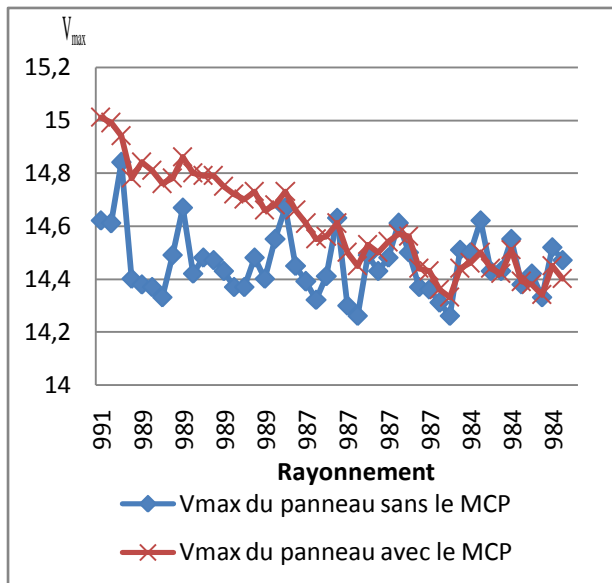
**Figure VI.2 :** Le courant en fonction du rayonnement (cas sans fluide caloporteur).

Sur les deux graphes nous remarquons que les deux courbes de courant sont confondues, ce qui veut dire que les deux panneaux PV délivrent le même courant, ce qui implique que la température n'a pas d'influence sur le courant.

Nous remarquons aussi que le courant diminue dans les deux panneaux PV avec la diminution du rayonnement, ce qui démontre que ce dernier a une grande influence sur le courant contrairement à la température.

## VI.3.1.2. La tension

- Les graphes suivants représentent la variation de la tension des deux panneaux PV en fonction du rayonnement et de la température.



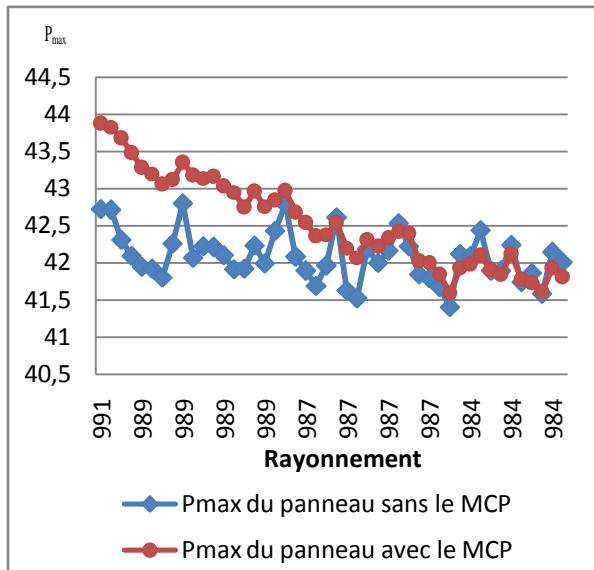
**Figure VI.3 :** La tension en fonction du rayonnement (cas sans fluide caloporteur).

Dans les deux graphes nous remarquons, au début de l'expérience, que la tension du panneau avec le MCP est plus importante que celle du panneau sans MCP, car ses cellules sont refroidies.

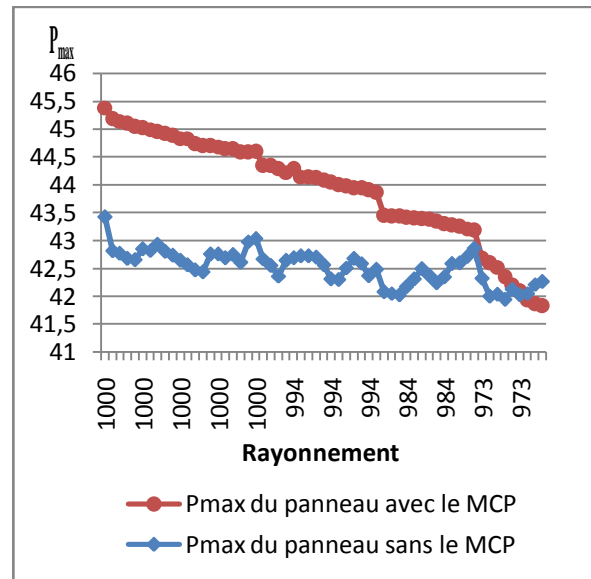
Après un bout de temps nous remarquons une diminution de la tension du panneau avec le MCP avec la diminution du rayonnement et l'augmentation de la température ce qui explique l'influence de la température et du rayonnement sur la tension.

### VI.3.1.3. La puissance

- Le graphe suivant représente l'évolution de la puissance des deux panneaux PV en fonction du rayonnement et de la température.



Test du 13/07/2017.



Test du 05/10/2017.

**Figure VI.4 :** La puissance en fonction du rayonnement (cas sans fluide caloporteur).

Dans la figure VI.4, nous remarquons, au début de l'expérience que la puissance du panneau avec le MCP est plus importante par rapport à celle du panneau témoin car le MCP a refroidi les cellules du panneau PV.

Après un moment, nous remarquons que la puissance des cellules du panneau PV muni du MCP décroît avec la diminution du rayonnement et l'augmentation de la température des cellules PV, ce qui explique le rôle et l'influence de la température sur la puissance du panneau.

### VI.3.1.4. Le rendement

$$\text{Rendement} = \frac{\text{Puissance fournie par le module}}{\text{puissance reçue par le module}} \times 100$$

Comme nous l'avons cité précédemment, nous avons utilisé deux panneaux identiques de dimension (665 × 631 × 30).

**La surface du panneau PV :**

$$S = 0.665 \times 0.631 = 0.419615 \text{ m}^2$$

- **Test du 13/07/2017**
- Pour un rayonnement de **991 W /m<sup>2</sup>**.

La puissance reçue par le panneau PV est :

$$P_r = 0.419615 \times 991 = 415.84 \text{ W}$$

# Simulation numérique

---

- Le rendement du panneau avec le MCP.

La puissance fournie par le panneau PV est  $P_f = 43.88 \text{ W}$  donc :

$$\eta = \frac{43.88}{415.84} \times 100 = 10.55 \%$$

- rendement du panneau sans le MCP.

La puissance fournie par le panneau PV est  $P_f = 42.72 \text{ W}$  donc :

$$\eta = \frac{42.72}{415.84} \times 100 = 10.27 \%$$

- Pour un rayonnement de  $989 \text{ W/m}^2$ .

La puissance reçue par le panneau PV est :

$$P_r = 0.419615 \times 989 = 415 \text{ W}$$

- Le rendement du panneau avec le MCP.

La puissance fournie par le panneau PV est  $P_f = 43.35 \text{ W}$  donc :

$$\eta = \frac{43.35}{415} = 10.44 \%$$

- Le rendement du panneau sans le MCP.

La puissance fournie par le panneau PV est  $P_f = 42.08 \text{ W}$  donc :

$$\eta = \frac{42.08}{415} = 10.14 \%$$

- Pour un rayonnement de  $987 \text{ W/m}^2$ .

La puissance reçue par le panneau PV est :

$$P_r = 0.419615 \times 987 = 414.16 \text{ W}$$

- Le rendement du panneau avec le MCP.

La puissance fournie par le panneau PV est  $P_f = 42.68 \text{ W}$  donc :

$$\eta = \frac{42.68}{414.16} \times 100 = 10.30 \%$$

- Le rendement du panneau sans le MCP.

La puissance fournie par le panneau PV est  $P_f = 42.08 \text{ W}$  donc :

$$\eta = \frac{42.08}{414.16} \times 100 = 10.16 \%$$

# Simulation numérique

---

- Pour un rayonnement de **984 W /m<sup>2</sup>**.

La puissance reçue par le panneau PV est :

$$P_r = 0.419615 \times 984 = 412.90W$$

- Le rendement du panneau avec le MCP.

La puissance fournie par le panneau PV est **P<sub>f</sub> = 42.12 W** donc :

$$\eta = \frac{42.12}{412.90} \times 100 = 10.20 \%$$

- Le rendement du panneau sans le MCP

La puissance fournie par le panneau PV est **P<sub>f</sub> = 42.24 W** donc :

$$\eta = \frac{42.24}{412.90} \times 100 = 10.23 \%$$

- **Test du 05/10/2017**

- Pour un rayonnement de **1000 W /m<sup>2</sup>**.

La puissance reçue par le panneau PV est :

$$P_r = 0.419615 \times 1000 = 419.61 W$$

- Le rendement du panneau avec le MCP.

La puissance fournie par le panneau PV est **P<sub>f</sub> = 45.38 W** donc :

$$\eta = \frac{45.38}{419.61} \times 100 = 10.81 \%$$

- Le rendement du panneau sans MCP.

La puissance fournie par le panneau PV est **P<sub>f</sub> = 43.32 W** donc :

$$\eta = \frac{43.32}{419.61} \times 100 = 10.32 \%$$

- Pour un rayonnement de **994 W /m<sup>2</sup>**.

La puissance reçue par le panneau PV est :

$$P_r = 0.419615 \times 994 = 417.01 W$$

- Le rendement du panneau avec MCP.

La puissance fournie par le panneau PV est **P<sub>f</sub> = 44.34 W** donc :

$$\eta = \frac{44.34}{417.01} \times 100 = 10.63 \%$$

- Le rendement du panneau sans MCP.

La puissance fournie par le panneau PV est  $P_f = 42.67 \text{ W}$  donc :

$$\eta = \frac{42.67}{417.01} \times 100 = 10.23 \%$$

- Pour un rayonnement de  $984 \text{ W/m}^2$ .

La puissance reçue par le panneau PV est :

$$P_r = 0.419615 \times 984 = 412.90 \text{ W}$$

- Le rendement du panneau avec le MCP.

La puissance fournie par le panneau PV est  $P_f = 43.45 \text{ W}$  donc :

$$\eta = \frac{43.45}{412.90} \times 100 = 10.52 \%$$

- Le rendement du panneau sans le MCP.

La puissance fournie par le panneau PV est  $P_f = 42.08 \text{ W}$  donc :

$$\eta = \frac{42.08}{412.90} \times 100 = 10.19 \%$$

- Pour un rayonnement de  $973 \text{ W/m}^2$ .

La puissance reçue par le panneau PV est :

$$P_r = 0.419615 \times 973 = 408.28 \text{ W}$$

- Le rendement du panneau avec le MCP.

La puissance fournie par le panneau PV est  $P_f = 42.68 \text{ W}$  donc :

$$\eta = \frac{42.68}{408.28} \times 100 = 10.45 \%$$

- Le rendement du panneau sans le MCP.

La puissance fournie par le panneau PV est  $P_f = 42.32 \text{ W}$  donc :

$$\eta = \frac{42.32}{408.28} \times 100 = 10.36 \%$$

# Simulation numérique

Les tableaux ci-dessous récapitulent tous les rendements calculés précédemment.

**Tableau VI.3 :** Les rendements en fonction du rayonnement (cas avec seulement le MCP).

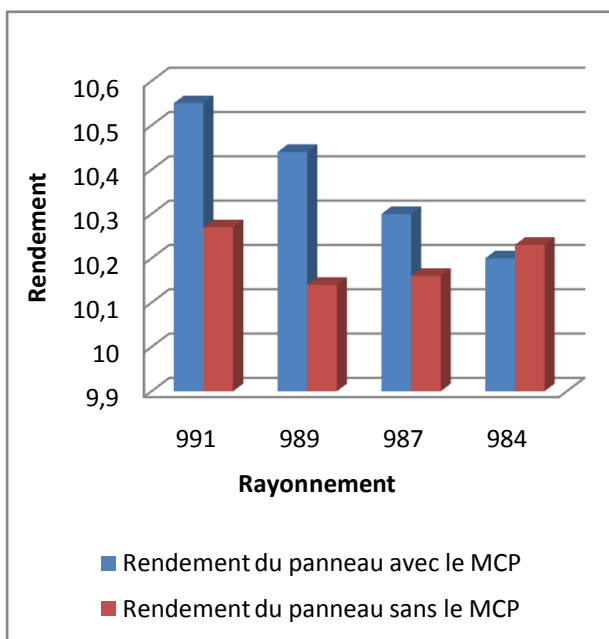
Test du 13/07/2017.

Rayonnement (W/m <sup>2</sup> )	Rendement du panneau avec le MCP (%)	Rendement du panneau sans le MCP (%)
991	10.55	10.27
989	10.44	10.14
987	10.30	10.16
984	10.20	10.23

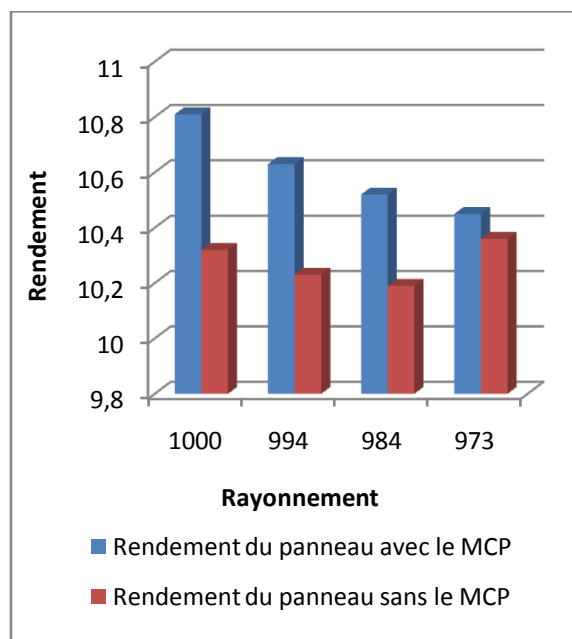
Test du 05/10/2017.

Rayonnement (W/m <sup>2</sup> )	Rendement du panneau avec le MCP (%)	Rendement du panneau sans le MCP (%)
1000	10.81	10.32
994	10.63	10.23
984	10.52	10.19
973	10.45	10.36

Représentation graphique des résultats illustrés dans le tableau ci-dessus.



Test du 13/07/2017.



Test du 05/10/2017.

**Figure VI.5 :** Le rendement en fonction du rayonnement (cas avec seulement le MCP).

Dans cette figure nous remarquons une diminution du rendement des deux panneaux PV en fonction de la diminution du rayonnement car le rayonnement influence sur le rendement du panneau PV.

Nous remarquons aussi que le rendement du panneau PV muni du MCP est plus important que celui du panneau PV témoin car le MCP fait refroidir les cellules du panneau. Nous remarquons aussi, qu'à la fin du test, une augmentation du rendement du panneau PV témoin, qui est dû au refroidissement naturel des cellules de ce dernier, ce qui implique que la température a une grande influence sur le rendement du panneau PV.

## VI.3.2. Avec l'utilisation du MCP et du fluide caloporteur

Les résultats de la simulation sont illustrés dans les tableaux ci-dessous.

*Tableau VI.4 : Résultats de la simulation en utilisant le MCP et le fluide caloporteur le 13/07/2017.*

Rayonnement (W/m <sup>2</sup> )	T° des cellules sans le MCP et le fluide caloporteur (°C)	P <sub>max</sub> (W)	I <sub>max</sub> (A)	V <sub>max</sub> (V)	T° des cellules avec le MCP et le fluide caloporteur (°C)	P <sub>max</sub> (W)	I <sub>max</sub> (A)	V <sub>max</sub> (V)
A 13 :48 980 W/m <sup>2</sup>	58,21	42,21	2,89	14,60	60 ,98	41,61	2,89	14,40
	56,51	42,57	2,89	14,72	60,15	41,81	2,89	14,46
	56,84	42,50	2,89	14,70	59,32	41,98	2,89	14,52
	58,18	42,22	2,89	14,60	59,80	41,88	2,89	14,48
A 13 :52: 976 W/m <sup>2</sup>	56,81	42,35	2,88	14,70	58,42	42,01	2,88	14,59
	57,26	42,26	2,88	14,67	58,31	42,04	2,88	14,60
	55,84	42,55	2,88	14,77	56,92	42,33	2,88	14,70
	58,08	42,09	2,88	14,61	57,60	42,19	2,88	14,65
	59,52	41,79	2,88	14,51	58,12	42,19	2,88	14,65
	58,73	41,73	2,88	14,56	57 ,94	42,11	2,88	14,62
	61,00	41,48	2,88	14,40	58,73	41,95	2,88	14,56
	57,58	42,19	2,88	14,65	57,62	42,18	2,88	14,64
	58,16	42,07	2,88	14,61	57,38	42,23	2,88	14,66
	55,23	42,68	2,88	14,82	56,21	42,47	2,88	14,75
	58,15	42,07	2,88	14,61	56,64	42,39	2,88	14,72
	56,77	42,36	2,88	14,71	56,17	42,48	2,88	14,75
	57,57	42,19	2,88	14,65	56,18	42,48	2,88	14,75
	58,29	42,04	2,88	14,60	56,33	42,45	2,88	14,74
58,51	42,00	2,88	14,58	56,18	42,48	2,88	14,75	
A 14 :07 : 970 W/m <sup>2</sup>	55,15	42,46	2,86	14,83	55,62	42,36	2,86	14,79
	55,02	42,48	2,86	14,84	54,80	42,53	2,86	14,85
	56,17	42,25	2,86	14,75	54,80	42,53	2,86	14,85
	57,43	41,98	2,86	14,66	55,18	42,45	2,86	14,83
	58,70	41,72	2,86	14,57	55,80	42,32	2,86	14,78

# Simulation numérique

	55,79	42,32	2,86	14,78	54,99	42,49	2,86	14,84
	57,12	42,05	2,86	14,69	55,16	42,66	2,86	14,90
	57,00	42,07	2,86	14,69	54,78	42,53	2,86	14,85
	58,64	41,73	2,86	14,58	55,58	42,37	2,86	14,80
	54,89	42,51	2,86	14,85	54,54	42,58	2,86	14,87
	57,52	41,97	2,86	14,66	54,71	42,55	2,86	14,86
	57,71	41,93	2,86	14,64	54,91	42,51	2,86	14,84
	56,32	42,21	2,86	14,74	54,24	42,64	2,86	14,89
	56,37	42,20	2,86	14,74	54,00	42,69	2,86	14,91
	56,41	42,20	2,86	14,74	53,97	42,70	2,86	14,91
<b>A 14 :22 : 962 W/m<sup>2</sup></b>	55,52	42,06	2,84	14,81	53,90	42,39	2,84	14,92
	55,13	42,14	2,84	14,84	53,60	42,45	2,84	14,95
	56,65	41,83	2,84	14,73	54,30	41,31	2,84	14,90
	55,43	42,08	2,84	14,81	53,83	42,41	2,84	14,93
	55,09	42,15	2,84	14,84	53,42	42,49	2,84	14,96
	56,44	41,87	2,84	14,74	53,55	42,46	2,84	14,95
	53,93	42,39	2,84	14,92	52,88	42,60	2,84	15,00
	56,80	41,80	2,84	14,72	53,76	42,42	2,84	14,93
	55,86	41,99	2,84	14,78	53,34	42,51	2,84	14,96
	53,82	42,41	2,84	14,93	52,81	42,62	2,84	15,00
	56,20	41,92	2,84	14,76	53,57	42,46	2,84	14,95
	56,56	41,85	2,84	14,73	53,78	42,46	2,84	14,95
	55,07	41,74	2,84	14,70	53,28	42,52	2,84	14,97
	56,09	41,94	2,84	14,77	53,63	42,45	2,84	14,94
	57,07	41,74	2,84	14,70	54,03	42,37	2,84	14,92
<b>A 14 :37 : 953 W/m<sup>2</sup></b>	56,82	41,44	2,81	14,72	53,80	42,05	2,81	14,94
	53,76	42,06	2,81	14,94	53,08	42,20	2,81	14,99
	55,40	41,73	2,81	14,82	53,06	42,20	2,81	14,99
	56,78	41,45	2,81	14,72	53,40	42,13	2,81	14,97
	54,74	41,86	2,81	14,87	52,83	42,25	2,81	15,01
	54,32	41,95	2,81	14,90	52,56	42,30	2,81	15,03
	54,52	41,90	2,81	14,89	52,78	42,26	2,81	15,01
	53,91	42,03	2,81	14,93	52,28	42,36	2,81	15,05
	53,64	42,08	2,81	14,95	52,25	42,36	2,81	15,05
	53,97	42,02	2,81	14,93	51,86	42,44	2,81	15,08
	53,04	42,20	2,81	14,99	51,45	42,53	2,81	15,11
	53,49	42,11	2,81	14,96	51,39	42,54	2,81	15,11
	55,20	41,77	2,81	14,84	51,81	42,45	2,81	15,08
	56,20	41,56	2,81	14,77	52,43	42,33	2,81	15,04
	53,52	42,11	2,81	14,96	51,68	42,48	2,81	15,09
	53,93	42,02	2,81	14,93	51,47	42,52	2,81	15,11
	54,72	41,86	2,81	14,87	51,89	42,44	2,81	15,08

# Simulation numérique

Tableau VI.5 : Résultats de la simulation en utilisant le MCP et le fluide caloporteur le 05/10/2017.

Rayonnement (W/m <sup>2</sup> )	T° des cellules avec le MCP et le fluide caloporteur (°C)	P <sub>max</sub> (W)	I <sub>max</sub> (A)	V <sub>max</sub> (V)	T° des cellules sans le MCP et le fluide caloporteur (°C)	P <sub>max</sub> (W)	I <sub>max</sub> (A)	V <sub>max</sub> (V)
A 14:07: 959 W/m <sup>2</sup>	58,31	41,37	2,83	14,61	53,25	42,40	2,83	14,97
	58,24	41,39	2,83	14,61	52,89	42,48	2,83	15,00
	58,10	41,41	2,83	14,62	52,81	42,49	2,83	15,01
	58,01	41,43	2,83	14,63	53,72	42,31	2,83	14,94
	58,06	41,42	2,83	14,63	53,72	42,31	2,83	14,94
	58,12	41,41	2,83	14,62	52,98	42,46	2,83	14,99
	58,07	41,42	2,83	14,63	53,94	42,26	2,83	14,92
	58,05	41,42	2,83	14,63	53,05	42,45	2,83	14,99
	57,87	41,46	2,83	14,64	52,86	42,48	2,83	15,00
	57,65	41,51	2,83	14,64	52,42	42,57	2,83	15,03
57,47	41,54	2,83	14,67	52,38	42,58	2,83	15,04	
A 14:22: 941 W/m <sup>2</sup>	56,38	41,05	2,78	14,76	49,5	42,42	2,78	15,26
	56,22	41,08	2,78	14,77	49,91	42,34	2,78	15,23
	55,97	41,13	2,78	14,79	50,63	42,20	2,78	15,18
	55,78	41,17	2,78	14,81	50,07	42,31	2,78	15,22
	55,42	41,24	2,78	14,83	49,54	42,42	2,78	15,26
	55,06	41,31	2,78	14,86	50,16	42,29	2,78	15,21
	54,95	41,34	2,78	14,87	51,12	42,10	2,78	15,14
	54,88	41,35	2,78	14,87	51,80	41,97	2,78	15,09
	54,91	41,34	2,78	14,87	52,18	41,89	2,78	15,07
	55,00	41,33	2,78	14,86	53,30	41,67	2,78	14,98
	55,04	41,32	2,78	14,86	53,84	41,56	2,78	14,95
	54,94	41,34	2,78	14,87	53,29	41,67	2,78	14,99
	54,84	41,36	2,78	14,87	52,86	41,75	2,78	15,02
54,79	41,37	2,78	14,88	52,91	41,74	2,78	15,01	
A14:37:921 W/m <sup>2</sup>	54,63	40,59	2,72	14,90	53,17	40,88	2,72	15,01
	54,45	40,63	2,72	14,92	51,81	41,14	2,72	15,11
	54,09	40,70	2,72	14,94	51,35	41,23	2,72	15,14
	53,73	40,77	2,72	14,97	50,13	41,47	2,72	15,23
	53,35	40,84	2,72	15,00	50,35	41,43	2,72	15,21
	53,20	40,87	2,72	15,01	50,35	41,43	2,72	15,21
	53,10	40,89	2,72	15,01	50,36	41,43	2,72	15,21
	52,92	40,93	2,72	15,03	49,93	41,51	2,72	15,24

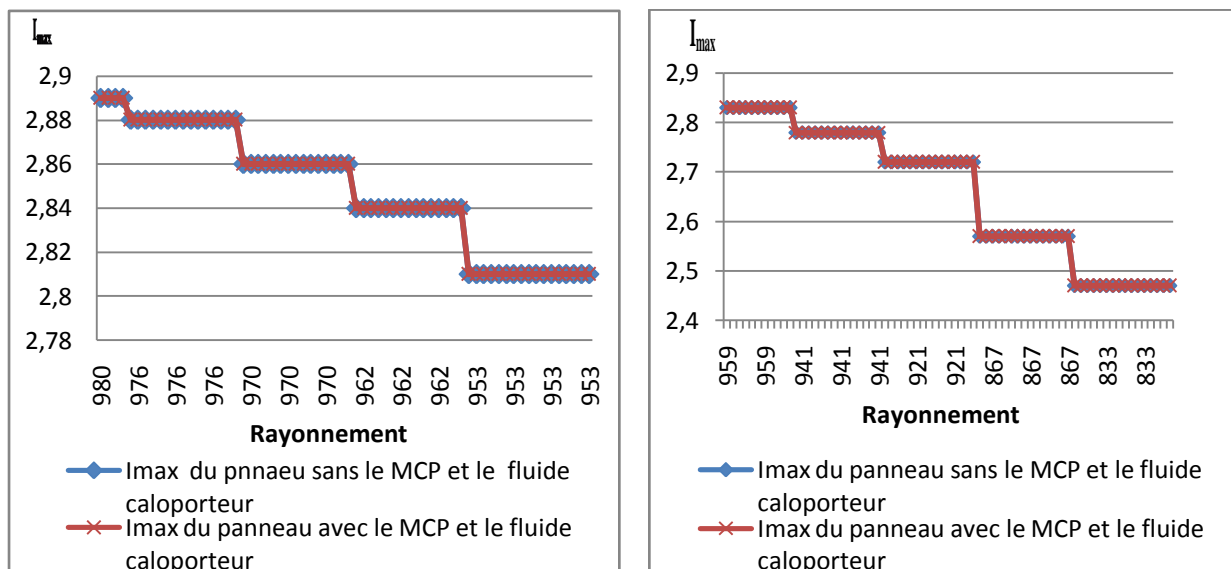
# Simulation numérique

	52,73	40,97	2,72	15,04	49,59	41,58	2,72	15,27
	52,67	40,98	2,72	15,05	50,98	41,31	2,72	15,17
	52,7	40,97	2,72	15,04	49,90	41,52	2,72	15,25
	52,58	40,99	2,72	15,05	50,25	41,45	2,72	15,22
	52,47	41,01	2,72	15,06	50,31	41,44	2,72	15,22
	52,28	41,05	2,72	15,07	49,66	41,56	2,72	15,26
	52,16	41,08	2,72	15,08	50,34	41,43	2,72	15,22
A 14:52: 867 W/m <sup>2</sup>	52,06	38,87	2,57	15,03	50,66	39,12	2,57	15,23
	51,98	38,88	2,57	15,14	49,73	39,29	2,57	15,30
	51,59	38,95	2,57	15,17	49,02	39,42	2,57	15,35
	51,36	38,99	2,57	15,18	48,9	39,44	2,57	15,36
	51,08	39,05	2,57	15,20	48,48	39,52	2,57	15,39
	50,96	39,07	2,57	15,21	48,73	39,47	2,57	15,37
	50,8	39,10	2,57	15,22	48,48	39,52	2,57	15,37
	50,77	39,10	2,57	15,22	49,42	39,35	2,57	15,32
	50,77	39,10	2,57	15,22	49,93	39,26	2,57	15,29
	50,76	39,10	2,57	15,23	49,14	39,40	2,57	15,34
	50,69	39,12	2,57	15,23	49,29	39,37	2,57	15,33
	50,59	39,14	2,57	15,24	49,59	39,32	2,57	15,31
	50,47	39,16	2,57	15,25	49,55	39,32	2,57	15,31
	50,36	39,18	2,57	15,25	49,76	39,29	2,57	15,30
50,25	39,20	2,57	15,26	49,32	39,37	2,57	15,33	
A 15:22: 833 W/m <sup>2</sup>	49,83	37,84	2,47	15,32	49,71	37,86	2,47	15,33
	49,22	37,95	2,47	15,36	49,28	37,94	2,47	15,36
	48,98	37,99	2,47	15,38	49,72	37,86	2,47	15,33
	48,97	37,99	2,47	15,38	49,39	37,92	2,47	15,35
	48,98	37,99	2,47	15,38	49,62	37,88	2,47	15,33
	49,06	37,97	2,47	15,37	50,51	37,72	2,47	15,27
	49,23	37,95	2,47	15,36	51,03	37,63	2,47	15,23
	49,43	37,91	2,47	15,35	51,82	37,49	2,47	15,17
	49,69	37,86	2,47	15,33	52,05	37,45	2,47	15,16
	49,83	37,84	2,47	15,32	51,92	37,48	2,47	15,17
	49,90	37,83	2,47	15,31	52,03	37,46	2,47	15,16
	49,89	37,83	2,47	15,31	51,07	37,62	2,47	15,23
	49,81	37,84	2,47	15,32	50,95	37,65	2,47	15,24
	49,68	37,87	2,47	15,33	49,81	37,84	2,47	15,32
	49,52	37,89	2,47	15,34	49,38	37,92	2,47	15,35
	49,38	37,92	2,47	15,35	49,13	37,96	2,47	15,37

Les résultats montrés dans les tableaux ci-dessus sont représentés sous forme graphique comme suit :

## VI.3.2.1. Le courant

- Les graphes ci-dessous représentent la variation du courant en fonction du rayonnement et de la température des deux panneaux PV (panneau avec le MCP et le fluide caloporteur et le panneau témoin).



Test du 13/07/2017.

Test du 05/10/2017.

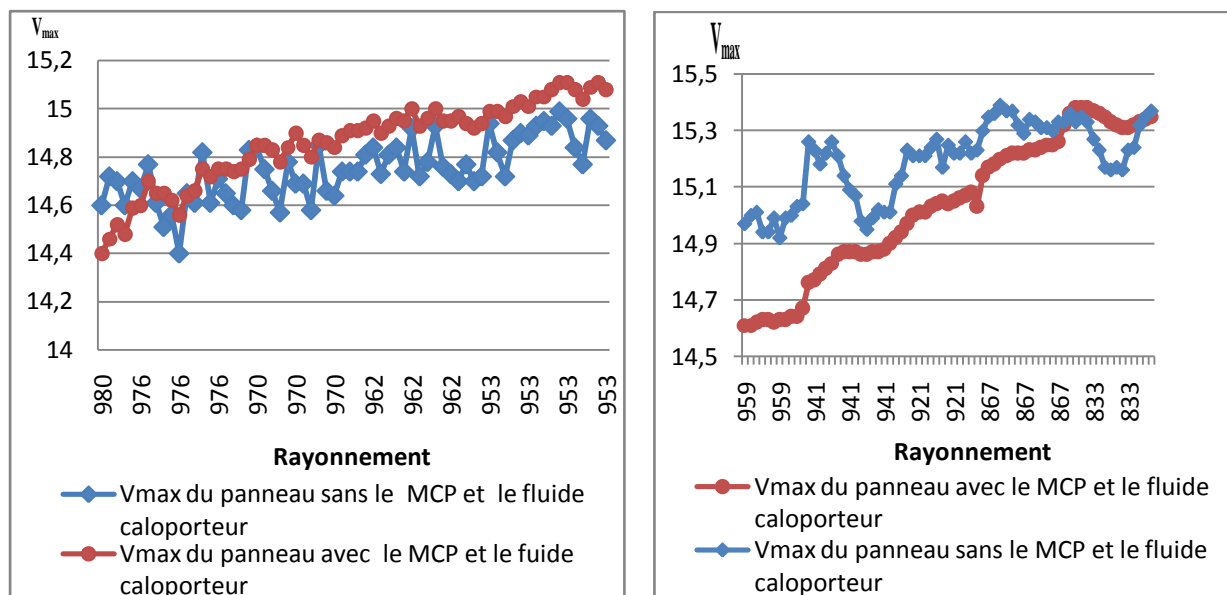
**Figure VI.6 :** Le courant en fonction du rayonnement (cas avec le MCP et fluide caloporteur).

Dans la figure ci-dessus nous remarquons la diminution du courant en fonction de la diminution du rayonnement ; ce qui implique que le rayonnement a une grande influence sur le courant.

Nous remarquons aussi que les deux courbes sont confondues, ce qui induit que les deux panneaux ont le même courant, par conséquent la température des cellules n'a pas d'influence sur le courant.

## VI.3.2.2. La tension

- Les graphes ci-dessous représentent la variation de la tension en fonction du rayonnement et de la température des deux panneaux PV (panneau avec le MCP et le fluide caloporteur et le panneau témoin).



Test du 13/07/2017.

Test su 05/10/2017.

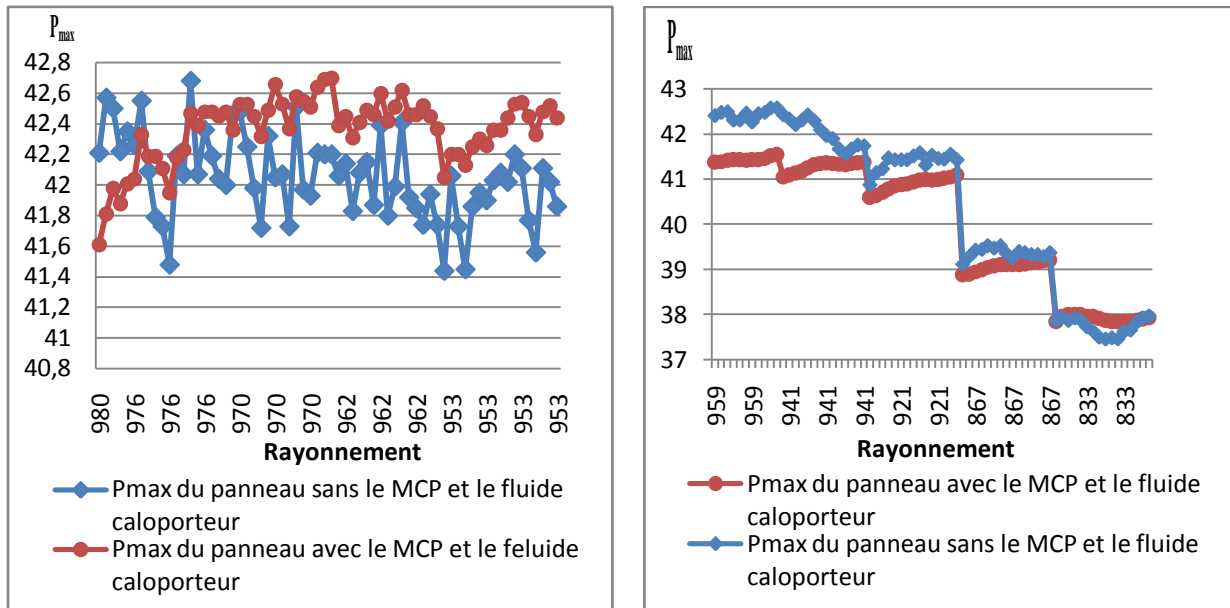
**Figure VI.7 :** La tension en fonction du rayonnement (cas avec le MCP et le fluide caloporteur).

Dans cette figure nous remarquons, au début du test que la tension du panneau PV muni du MCP et du fluide caloporteur est inférieure à celle du panneau PV témoin car la température de ce dernier est moins importante que celle du panneau refroidi (le MCP ne peut plus assurer le refroidissement du panneau PV tout seul car il est complètement fondu).

Après un bout de temps, avec la circulation du fluide caloporteur à l'intérieur de l'échangeur nous remarquons l'augmentation de la tension du panneau PV muni du MCP et du fluide caloporteur en fonction de la diminution de la température de ces cellules PV jusqu'à dépasser la tension du panneau PV témoin, ce qui explique que le fluide caloporteur a une influence sur la température du panneau PV qui elle-même influe sur la tension de ce dernier.

### VI.3.2.3. La puissance

- Les graphes ci-dessous représentent la variation de la puissance en fonction du rayonnement et de la température des deux panneaux PV (panneau avec le MCP et le fluide caloporteur et le panneau témoin).



Test du 13/07/2017.

Test du 05/10/2017.

**Figure VI.8 :** La puissance en fonction de rayonnement (cas avec le MCP et le fluide caloporteur).

Dans cette figure nous remarquons, au début de l'expérience, la puissance du panneau muni du MCP et du fluide caloporteur est inférieure à celle du panneau témoin car la température de ce dernier est inférieure à celle du premier, car le MCP ne peut plus refroidir le panneau PV.

Après un moment nous remarquons, dans le graphe du teste du 13/07/2017 que la puissance du panneau muni du MCP et du fluide caloporteur augmente jusqu'à dépasser la puissance du panneau PV témoin car le fluide caloporteur refroidit les cellules PV, ce qui explique l'influence de la température sur la puissance.

Dans le graphe du test du 05/10/2017, nous remarquons, l'augmentation de la puissance du panneau PV muni du MCP et du fluide caloporteur en fonction de la diminution de la température des cellules de ce dernier. Nous remarquons aussi une brusque chute de la puissance en fonction de la variation du rayonnement dans les deux panneaux PV, ce qui explique l'influence de la température et du rayonnement sur la puissance du panneau PV.

### VI.3.2.4. Le rendement

- **Test du 13/07/2017**
  - Pour un rayonnement de **980 W/m<sup>2</sup>**.

La puissance reçue par le panneau PV est :

$$P_r = 0.419615 \times 980 = 411.22 \text{ W}$$

- Le rendement du panneau avec le MCP et le fluide caloporteur.

La puissance fournie par le panneau PV est  $P_f = 41.98 \text{ W}$  donc :

$$\eta = \frac{41.98}{411.22} \times 100 = 10.20 \%$$

- Le rendement du panneau témoin.

La puissance fournie par le panneau PV est  $P_f = 41.98 \text{ W}$  donc :

$$\eta = \frac{42.50}{411.22} \times 100 = 10.33 \%$$

- Pour un rayonnement de  $976 \text{ W/m}^2$ .

La puissance reçue par le panneau PV est :

$$P_r = 0.419615 \times 976 = 409.54 \text{ W}$$

- Le rendement du panneau avec le MCP et le fluide caloporteur.

La puissance fournie par le panneau PV est  $P_f = 42.48 \text{ W}$  donc :

$$\eta = \frac{42.48}{409.54} \times 100 = 10.37 \%$$

- Le rendement du panneau témoin.

La puissance fournie par le panneau PV est  $P_f = 42.19 \text{ W}$  donc :

$$\eta = \frac{42.19}{409.54} \times 100 = 10.30 \%$$

- Pour un rayonnement de  $970 \text{ W/m}^2$ .

La puissance reçue par le panneau PV est :

$$P_r = 0.419615 \times 970 = 407.02 \text{ W}$$

- Rendement du panneau avec le MCP et le fluide caloporteur.

La puissance fournie par le panneau PV est  $P_f = 42.70 \text{ W}$  donc :

$$\eta = \frac{42.70}{407.02} \times 100 = 10.49 \%$$

- Rendement du panneau témoin.

La puissance fournie par le panneau PV est  $P_f = 42.20 \text{ W}$  donc :

$$\eta = \frac{42.20}{407.02} \times 100 = 10.36 \%$$

- Pour un rayonnement de **962 w /m<sup>2</sup>**.

La puissance reçue par le panneau PV est :

$$P_r = 0.419615 \times 962 = 403.67 \text{ W}$$

- Le rendement du panneau avec le MCP et le fluide caloporteur.

La puissance fournie par le panneau PV est **P<sub>f</sub> = 42.62 W** donc :

$$\eta = \frac{42.62}{403.67} \times 100 = 10.55 \%$$

- Le rendement du panneau témoin.

La puissance fournie par le panneau PV est **P<sub>f</sub> = 42.41 W** donc :

$$\eta = \frac{42.41}{403.67} \times 100 = 10.50 \%$$

- Pour un rayonnement de **953 w /m<sup>2</sup>**.

La puissance reçue par le panneau PV est :

$$P_r = 0.419615 \times 953 = 400 \text{ W}$$

- Le rendement du panneau avec le MCP et le fluide caloporteur.

La puissance fournie par le panneau PV est **P<sub>f</sub> = 42.54 W** donc :

$$\eta = \frac{42.54}{400} \times 100 = 10.63 \%$$

- Le rendement du panneau témoin.

La puissance fournie par le panneau PV est **P<sub>f</sub> = 42.41 W** donc :

$$\eta = \frac{42.11}{400} \times 100 = 10.52 \%$$

- **Test du 05/10/2017**

- Pour un rayonnement de **959 W m<sup>2</sup>**.

La puissance reçue par le panneau PV est :

$$P_r = 0.419615 \times 959 = 402.41 \text{ W}$$

- Le rendement du panneau avec le MCP et le fluide caloporteur.

La puissance fournie par le panneau PV est **P<sub>f</sub> = 41.54 W** donc :

$$\eta = \frac{41.54}{402.41} \times 100 = 10.32 \%$$

# Simulation numérique

---

- Le rendement du panneau témoin.

La puissance fournie par le panneau PV est  $P_f = 42.58 \text{ W}$  donc :

$$\eta = \frac{42.58}{402.41} \times 100 = 10.58 \%$$

- Pour un rayonnement de  $941 \text{ W/m}^2$ .

La puissance reçue par le panneau PV est :

$$P_r = 0.419615 \times 941 = 394.86 \text{ W}$$

- Le rendement du panneau avec le MCP et le fluide caloporteur.

La puissance fournie par le panneau PV est  $P_f = 41.37 \text{ W}$  donc :

$$\eta = \frac{41.37}{394.86} \times 100 = 10.47 \%$$

- Le rendement du panneau témoin.

La puissance fournie par le panneau PV est  $P_f = 41.74 \text{ W}$  donc :

$$\eta = \frac{41.74}{394.86} \times 100 = 10.57 \%$$

- Pour un rayonnement de  $921 \text{ W/m}^2$ .

La puissance reçue par le panneau PV est :

$$P_r = 0.419615 \times 921 = 386.46 \text{ W}$$

- Le rendement du panneau avec le MCP et le fluide caloporteur.

La puissance fournie par le panneau PV est  $P_f = 41.08 \text{ W}$  donc :

$$\eta = \frac{41.08}{386.46} \times 100 = 10.62 \%$$

- Le rendement du panneau témoin.

La puissance fournie par le panneau PV est  $P_f = 41.43 \text{ W}$  donc :

$$\eta = \frac{41.43}{386.46} \times 100 = 10.72 \%$$

- Pour un rayonnement de  $867 \text{ W/m}^2$ .

La puissance reçue par le panneau PV est :

$$P_r = 0.419615 \times 867 = 363.80 \text{ W}$$

- Le rendement du panneau avec le MCP et le fluide caloporteur.

# Simulation numérique

La puissance fournie par le panneau PV est  $P_f = 39.20 \text{ W}$  donc :

$$\eta = \frac{39.20}{363.80} \times 100 = 10.77 \%$$

- Le rendement du panneau témoin.

La puissance fournie par le panneau PV est  $P_f = 39.37 \text{ W}$  donc :

$$\eta = \frac{39.37}{363.80} \times 100 = 10.82 \%$$

- Pour un rayonnement de  $833 \text{ W/m}^2$ .

La puissance reçue par le panneau PV est :

$$P_r = 0.419615 \times 833 = 349.54 \text{ W}$$

- Le rendement du panneau avec le MCP et le fluide caloporteur.

La puissance fournie par le panneau PV est  $P_f = 37.99 \text{ W}$  donc :

$$\eta = \frac{37.99}{349.54} \times 100 = 10.86 \%$$

- Le rendement du panneau témoin.

La puissance fournie par le panneau PV est  $P_f = 37.88 \text{ W}$  donc :

$$\eta = \frac{37.88}{349.54} \times 100 = 10.83 \%$$

**Tableau VI.6 :** Le rendement en fonction du rayonnement (cas avec le MCP et le fluide caloporteur).

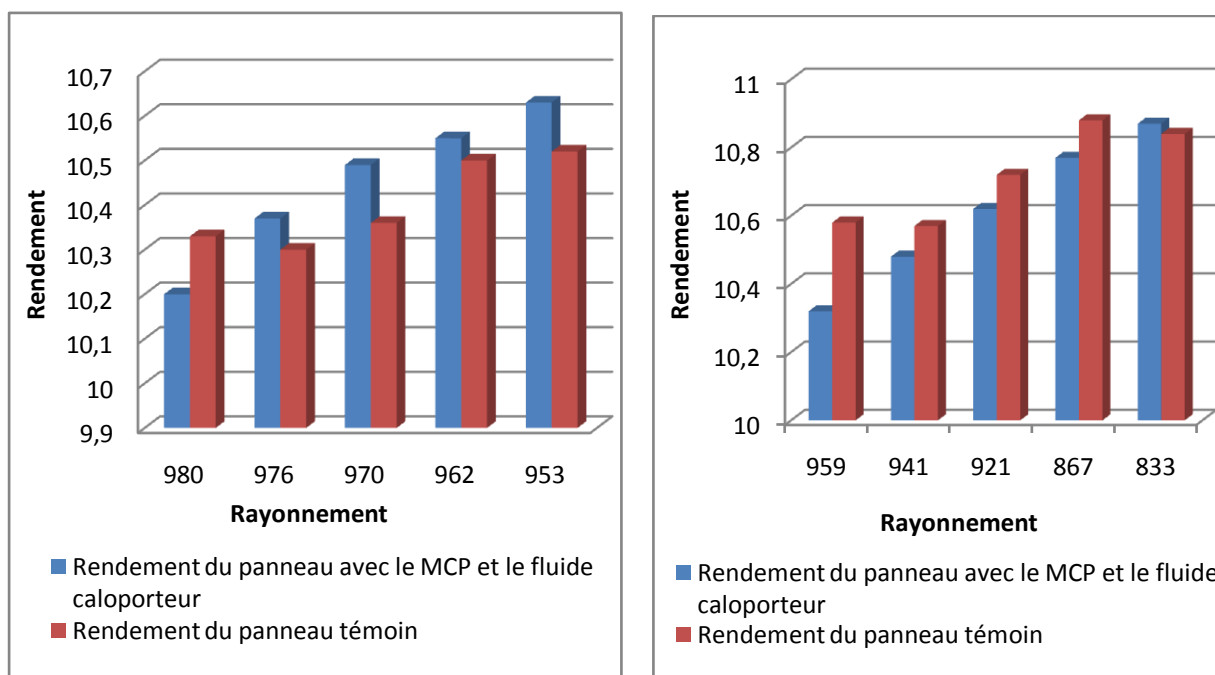
Test du 13/07/2017.

Test du 05/10/2017.

Rayonnement (W/m <sup>2</sup> )	Rendement du panneau avec le MCP et le fluide caloporteur (%)	Rendement du panneau sans le MCP et le fluide caloporteur (%)
980	10.20	10.33
976	10.37	10.30
970	10.49	10.36
962	10.55	10.50
953	10.63	10.52

Rayonnement (W/m <sup>2</sup> )	Rendement du panneau avec le MCP et le fluide caloporteur (%)	Rendement du panneau sans le MCP et le fluide caloporteur (%)
959	10.32	10.58
941	10.47	10.57
921	10.62	10.72
867	10.77	10.82
833	10.86	10.83

Représentation des résultats des tableaux ci-dessus sous forme graphique comme suit :



Test du 13/07/2017.

Test du 05/10/2017.

**Figure VI.9 :** Le rendement en fonction du rayonnement (cas avec le MCP et le fluide caloporteur).

Dans cette figure nous remarquons, au début du test, que le rendement du panneau témoin est plus important que celui du panneau avec le MCP et le fluide caloporteur, car la température de ce dernier est plus importante. Mais après un bout de temps le rendement du panneau muni du MCP et du fluide caloporteur augmente progressivement jusqu'à dépasser celui du panneau PV témoin, car celui-ci a une température plus importante que celui du panneau refroidi, ce qui explique l'influence de la température sur le rendement du panneau PV.

Nous remarquons aussi, dans le test du 05/10/2017, que le rendement du panneau témoin augmente progressivement mais lentement par rapport à celui du panneau avec le MCP et le fluide caloporteur, car il est refroidi naturellement par la diminution de la température ambiante. Mais à la fin du test, le rendement diminue avec la diminution du rayonnement, ce qui montre l'influence de la température et du rayonnement sur les panneaux PV.

## VI.4. Conclusion

Les résultats de la simulation sur le logiciel PSIM ont montré que la puissance fournie par le panneau PV refroidi est plus importante que celle fournie par le panneau témoin.

Les résultats de la simulation ont montré aussi que le panneau refroidi a un meilleur rendement que celui du panneau PV témoin.

# **Conclusion générale**

# Conclusion générale

---

Dans ce travail, nous avons étudié et réalisé un système de refroidissement pour un panneau solaire PV dans le but d'augmenter ces performances.

Un conteneur en acier inoxydable a été mis en œuvre à cet effet, qui est rempli par un composite à base de MCP (graisse de coprah raffiné)/Graphite/Maïzena et dans lequel est fixé un échangeur de chaleur en cuivre sous forme d'un serpentín dans le but de faire circuler à l'intérieur un fluide caloporteur (de l'eau).

Le dispositif est placé à l'arrière d'un panneau PV pour absorber l'énergie thermique provenant du rayonnement solaire incident sur la surface avant du capteur PV, la stocker dans le composite durant sa fusion, puis la restituer au fluide caloporteur en se solidifiant. Pour comparer l'effet du dispositif sur la température du panneau, deux capteurs PV identiques ont été utilisés, l'un est muni du système de refroidissement et l'autre servira de témoin.

Les tests et les mesures de températures sur les deux panneaux PV ont été effectués sous les mêmes conditions de températures et du rayonnement.

Les résultats des tests ont montré qu'en utilisant le matériau à changement de phase, la température du panneau peut être réduite d'une façon significative durant sa phase de fusion (le stockage de l'énergie thermique), mais après la fusion totale, le MCP ne peut plus assurer le refroidissement du panneau PV tout seul, donc on a eu recours à un fluide caloporteur dans le but de refroidir et de solidifier le MCP, pour se décharger et restituer sa chaleur qui sera récupérée sous forme d'eau chaude, pour l'utilisation journalière de cette dernière (eau chaude sanitaire, préchauffage de l'eau du chauffage).

Malgré que le refroidissement du panneau PV avec le MCP et sans le fluide caloporteur a une efficacité réduite, puisqu'il n'assure plus le refroidissement après sa fusion totale, il reste indispensable dans des sites où on ne peut pas traiter cette eau chaude ou on n'a simplement pas besoin de celle-ci comme dans le sud Algérien.

En faisant la simulation sur le logiciel PSIM, nous avons constaté que le refroidissement du panneau PV, nous a permis d'augmenter la puissance du capteur, et par conséquent obtenir un meilleur rendement.

En perspective, ce travail, pourra être complété par l'utilisation d'un MCP qui a une chaleur latente de fusion plus importante pour absorber et stocker beaucoup plus d'énergie et un système qui déclenchera la circulation du fluide caloporteur juste après la fusion totale du MCP et arrêtera cette circulation d'eau après la solidification de celui-ci pour éviter l'augmentation de la température des cellules PV après la fusion totale du MCP.

# **Références bibliographiques**

# Références bibliographiques

---

- [1] : Bouden Abdelmalek, mémoire de Magistère, Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque, Université Mentouri Constantine, 2008.
- [2] : Ait saada sonia, mémoire de Master, refroidissement d'un panneau photovoltaïque avec stockage de chaleur, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2016.
- [3] : Thomas letz, intégrer le solaire thermique dans le bâtiment, Ines éducation, institut national de l'énergie solaire, formation Décembre 2007-Janvier 2008.
- [4] : Livre « D'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE » Anne Labouret et Michel Villos, Dunod, Paris, 2009 .pages 32-33.
- [5] : CHENNI. Rachid, mémoire de Master, Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire, Université Mantouri de constantine, 2007.
- [6] : Michel Daguenet: les séchoirs solaires : théorie et pratique, Unisco, paris ; 1985.
- [7] : C. Zidani, F. Benyarou. Simulation de la position apparente du soleil et estimation des Energies Solaires incidentes sur un Capteur Plan pour la Ville de Tlemcen en Algérie. Rev.Energ. Ren, Vol.6, pp 69-76, 2003.
- [8] : KHAROUS.Nabil, HAMZAOUI. Jugurtha, mémoire de Master, Etude et réalisation d'un concentrateur solaire parabolique, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2015.
- [9] : Vincent BOURDIN, Calculs astronomiques simplifiés, Université Paris-Sud Orsay, 2014.
- [10] : MATALLAH Sorya, mémoire de Master, dimensionnement et simulation d'un système photovoltaïque pour alimenter un habitat dans la wilaya d'Ouargla, Université KASDI Merbah de Ouargla, 2015.
- [11] : BENMEHDI Rachid, mémoire de Master, conception et régulation des systèmes fermés de distribution et de circulation des chauffage/climatisation, Université ABOUBEKR Belkaide Tlemcen, 2013.
- [12] : Zeghib ilhem, Etude et Réalisation d'un Concentrateur Solaire parabolique université mentouri –constantine.
- [13] : <http://physique.unice.fr/sem6/2007-2008/PagesWeb/ProjetAstro/definitions.html>
- [14] : <http://squ-art-patch.over-blog.com/article-une-de-plus-de-quoi-93759664.html>
- [15] : <http://outilssolaires.com/glossaire/rayonnement-solaire/rayonnement-solaire+a172.html>
- [16] : [https://www.memoireonline.com/07/08/1433/m\\_etude-effet-temperature-parametres-cellule-solaire-organique13.html](https://www.memoireonline.com/07/08/1433/m_etude-effet-temperature-parametres-cellule-solaire-organique13.html)
- [17] : HELALI Kamelia, mémoire de Master, modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative, université MOULOUD Mamméri de Tizi-Ouzou, 2012.

# Références bibliographiques

---

- [18] : ZERGUINE Bilal, modélisation d'un système de production électrique par la cellule photovoltaïque, université BADJI Mokhtar Annaba, 2010.
- [19] : <http://www.cder.dz/spip.php?article40>
- [20] : BRAHIMI Aghiles, etude de performance d'un capteur solaire plan à eau, université de lorraine, faculté des sciences et technologies Nancy 1, 2016.
- [21] : [http://www.solairethermique.guidenr.fr/I\\_capteur-solaire-thermique-non-vitre.php](http://www.solairethermique.guidenr.fr/I_capteur-solaire-thermique-non-vitre.php)
- [22] : KALLA Fayçal, conversion thermodynamique de l'énergie solaire : étude et modélisation d'un capteur solaire, université de Batna, 2014.
- [23] : Y. MAIGNE, J-P. CAUSSE, M. CLAVERIE, B. EQUER, les perspectives de l'énergie solaire en France, Commission « Energie et changement climatique » Groupe de travail « Energie solaire » Juillet 2008.
- [24] : KABOUCHE Azouz, architecture et efficacité énergétique des panneaux solaires, Université Mentouri Constantine, 2012.
- [25]: Stéphane Barbier, formation bâtiment durable : système d'énergie renouvelable (SER) : conception et régulation, institut bruxellois pour la gestion de l'environnement.
- [26]: BRIHMAT Fouzia, l'étude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour une centrale hybride pv/éolien, université MOULOUD Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012.
- [27] : [https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_solaire\\_photovolt%C3%AFque](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire_photovolt%C3%AFque)
- [84]: ZOUAK Belkacem, étude de l'évolution des caractéristiques des matériaux thermoélectriques des anciennes et nouvelles générations et applications photovoltaïque-thermoélectricité, Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012.
- [29]: MAZIANI Zahra, modélisation de modules photovoltaïques, Université de Batna, 2012.
- [30]: BELHADJ Mohammed, Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome Mémoire de Magister, Centre Universitaire De Bechar, 2008.
- [31]: MT.BAISSI, K.TOUAFEK, I.TABET, AKHELIFA, conception d'un capteur solaire hybride photovoltaïque (système thermosiphon), unité de recherche appliquée en énergies renouvelables, URARE, CDER, université Mohamed KHIDER, 2016.
- [32]: ZEROUKHI Djouher, dimensionnement d'un capteur solaire hybride photovoltaïque/thermique en vue de son installation sur le toit d'un bâtiment administratif, Université MOULOUD Mammeri de Tizi-Ouzou, 2013.
- [33] : Hegazy AA. Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collectors. Energy Convers Manage 2000.
- [34] : BENBOUZA Chaouki, production et performances des capteurs hybrides PV/T à eau intégrés dans le bâtiment -cas de l'Algérie-, Université Constantine 1, 2014.

## Références bibliographiques

---

[35] : TIWARI A., SODHA M. S., CHANDRA A., et al. Performance evaluation of photovoltaic / thermal solar air collector for composite climate of India. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 90, n° 2, pp.175-189, 2006.

[36] : Tripanagnostopoulos Y, Nousia Th, Souliotis M, Yianoulis P. Hybridphotovoltaic/thermal solar systems. *Sol Energy* 2002.

[37]: T.CHOW. « Performance analysis of photovoltaic/ thermal collector by explicit dynamic model ». *Solar Energy*, 2003, Vol 75 pp 143-152.

[38] : TRIPANAGNOSTOPOULOS Y. TZAVELLAS D., et al. Hybrid PV/T systems with dual heat extraction operation. In: *Proceedings of the 17<sup>th</sup> European PV Solar Energy Conference*, Munich, Allemagne, pp. 2515-2518, 2001.

[39] : G.N. Tiwari, '*Solar Energy: Fundamentals, Design, Modeling and Applications*', Narosa Publishing House, New Delhi (2002).

[40] : *Mechanical Engineering Handbook* (CRC Press), section 2, page196.

[41] : Maha AHMAD, Thèse De Doctorat, Couplage matériaux à changement de phase, super isolation, apport solaire, Université Josef Fourier, 2004.

[42] : Amina Akrouche, Mémoire de master, Etude du stockage et déstockage d'énergie dans matériaux à changement de phase, Ecole Des mines de Nantes 29/10 /2011.

[43] : [https://en.wikipedia.org/wiki/PSIM\\_Software](https://en.wikipedia.org/wiki/PSIM_Software)