



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies
Département des Sciences et Technologie

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : *Sciences et Technologies*

Filière : *Électrotechnique*

Spécialité : *Energies Renouvelables*

Par : **Souna Houda**

Thème

**SIMULATION D'UN CAPTEUR SOLAIRE
THERMODYNAMIQUE THERMOSIPHON A EAU
APPLICATION AU SITE DE GHARDAÏA.**

Soutenu publiquement le : 22/05/2017

Devant le jury :

Mr :BOUARAOUR Kamel	MCA	Univ. Ghardaïa	Président
Mr :FERKOUS Khaled	MAA	Univ. Ghardaïa	Examinateur
Mr :BENYELLOUL Kamel	MRA	URAER	Examinateur
Mr :DJELLOULI Abdelkader	MAA	Univ. Ghardaïa	Encadreur

Année universitaire 2017/2018

Résume

Le travail présent concerne la simulation d'un capteur solaire thermodynamique thermosiphon à eau application au site de Ghardaïa.

L'objectif de ce travail il est d'étudier le comportement thermique d'un capteur solaire plan à eau en régime transitoire, en développant un programme de calcul utilise le logiciel matlab. La résolution du système d'équations obtenu est abordée par la méthode de Runge Kutta d'ordre 4.

Les résultats que nous avons obtenus ont permis de préciser l'effet des paramètres externes sur le rendement instantané du capteur sont données sous formes de graphes traduisant les différentes variations de chaque paramètre.

Mots clefs: capteur solaire plan, thermosiphon, régime transitoire, rendement instantané, simulation sous MATLAB.

Abstract

The present work concerns the simulation of a thermosyphon solar thermodynamic solar collector at the Ghardaïa site.

The objective of this work is studied the thermal behavior of a of the flat plat collector transient, developing a calculation program uses the matlab software. The solution of the system of equations obtained is approached by the method Runge Kutta of order 4.

The results obtained have made it possible to specify the effect of the external parameters on the instantaneous efficiency of the sensor. They are given in the form of graphs representing the different variations of each parameter.

Key words: flat plat collector- transient regime- thermosyphon - efficiency- MATLAB simulation

ملخص

هذه المذكرة تتعلق بمحاكاة للملقط الحراري المائي الديناميكي لطاقة الشمسية العاملة بفعل الكثافة مطبقة في موقع غرداية. الهدف من هذا العمل هو دراسة التصرف الحراري للملقط في حالة النظام الانتقالي وذلك بتطوير برنامج حسابي باستخدام برنامج MATLAB. حل جملة المعادلات التي تحكم التصرف الحراري للملقط تم بطريقة Runge Kutta من درجة 4.

سمحت النتائج المتحصل عليها بتعيين تأثير العوامل الخارجية على الفعالية اللحظية للملقط الحراري وبتبين الفعل الهام للإشعاع الشمسي، وتعطى النتائج على شكل رسوم بيانية تعكس التغيرات المختلفة لكل متغير .

الكلمات المفتاحية: ملقط حراري نظام انتقالي – thermosyphon فعالية لحظية- المحاكاة MATLAB

Dédicace

A mon père ;

A ma mère ;

A mes sœurs et mon frère ;

A tous mes amis ;

A toute la famille souna et sebai;

A tous ceux qui me sont chers et proches ;

Je dédie ce travail.....

Mille merci

SOUNA HONDA

REMERCIEMENTS

Je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donnée le courage, la volonté et la patience de mener à terme le présent mémoire.

*A Monsieur Djalouli Qui a accepté d'encadrer et de diriger ce travail
Pour ses conseils précieux, son aide et sa grande patience Mes vifs remerciements,
ma sincère considération.*

*J'adresse mes vifs remerciements à Mr. Khelifa Abdelkrim , pour
m'avoir guidé lors de l'élaboration de ce travail, pour son aide, ces orientations,
ces conseils et ces encouragements.*

*J'adresse mes remerciements à Monsieur le Président de jury et
Messieurs les membres de jury d'avoir accepté de me faire l'honneur
de juger ce travail et de participer au jury de ce mémoire.*

*Je remercie enfin toute personne ayant contribué à l'élaboration de ce
travail.*

Liste des figures

Chapitre I

<i>FigureI.1:</i>	<i>Les énergies renouvelables.....</i>	<i>1</i>
<i>FigureI.2:</i>	<i>Structure du soleil.....</i>	<i>4</i>
<i>FigureI.3:</i>	<i>Mouvement apparent du soleil.....</i>	<i>5</i>
<i>FigureI.4:</i>	<i>les Coordonnées géographiques.....</i>	<i>6</i>
<i>FigureI.5:</i>	<i>Les coordonnées horizontales.....</i>	<i>7</i>
<i>FigureI.6:</i>	<i>La longueur d'onde de rayonnement solaire.....</i>	<i>9</i>
<i>FigureI.7:</i>	<i>Composantes du rayonnement solaire.....</i>	<i>10</i>
<i>FigureI.8:</i>	<i>Orientation et inclinaison d'une surface.....</i>	<i>12</i>
<i>FigureI.9:</i>	<i>Pyrhéliomètre.....</i>	<i>13</i>
<i>FigureI.10:</i>	<i>Pyranomètre avec anneau d'ombrage.....</i>	<i>13</i>
<i>FigureI.11:</i>	<i>Pyranomètre.....</i>	<i>14</i>
<i>FigureI.12:</i>	<i>Solarimètre type (Kipp Zonen).....</i>	<i>14</i>
<i>FigureI.13:</i>	<i>Carte du monde de l'enseilllement moyen annuel.....</i>	<i>15</i>

Chapitre II

<i>FigureII.1:</i>	<i>Capteur à air fixé à un mur (mur Trombe).....</i>	<i>19</i>
<i>FigureII.2:</i>	<i>Capteur non vitré.....</i>	<i>20</i>
<i>FigureII.3:</i>	<i>Principe de fonctionnement de capteur solaire non vitré à revêtement sélectif.....</i>	<i>21</i>
<i>FigureII.4:</i>	<i>Capteur plan vitré.....</i>	<i>22</i>
<i>FigureII.5:</i>	<i>Principe de fonctionnement des capteurs plans vitrés.....</i>	<i>22</i>
<i>FigureII.6:</i>	<i>Absorbeur et revêtement sélectif.....</i>	<i>23</i>
<i>FigureII.7:</i>	<i>Capteur sous vide.....</i>	<i>23</i>
<i>FigureII.8:</i>	<i>Principe de fonctionnement des capteurs à tubes sous vide.....</i>	<i>24</i>
<i>FigureII.9:</i>	<i>Coupe longitudinale d'un capteur solaire plan.....</i>	<i>25</i>
<i>FigureII.10:</i>	<i>Absorbeurs sous forme d'échelle et de serpentins.....</i>	<i>28</i>
<i>FigureII.11:</i>	<i>Schéma de principe d'un capteur solaire plan.....</i>	<i>30</i>
<i>FigureII.12:</i>	<i>Courbes caractéristiques de rendement de différents types de capteurs.....</i>	<i>32</i>
<i>FigureII.13:</i>	<i>Les différents échanges thermiques dans un capteur plan.....</i>	<i>33</i>
<i>FigureII.14:</i>	<i>Schéma du transfert de chaleur par conduction.....</i>	<i>33</i>
<i>FigureII.15:</i>	<i>Schéma du transfert de chaleur par convection.....</i>	<i>34</i>
<i>FigureII.16:</i>	<i>Effet thermosiphon.....</i>	<i>37</i>

Liste des figures

<i>FigureII.17: Système à thermosiphon.....</i>	<i>38</i>
<i>FigureII.18: chauffe-eau solaire monobloc.....</i>	<i>38</i>
<i>FigureII.19: chauffe-eau thermosiphon à éléments séparés.....</i>	<i>39</i>
<u>Chapitre III</u>	
<i>FigureIII.1: Schéma de principe d'un capteur solaire thermique.....</i>	<i>43</i>
<i>FigureIII.2: Schéma représentatif du bilan thermique d'un capteur solaire.....</i>	<i>44</i>
<i>FigureIII.3: Schématisation des différents nœuds du capteur.....</i>	<i>45</i>
<i>FigureIII.4: Mécanisme des échanges de chaleur détaillé.....</i>	<i>46</i>
<i>FigureIII.5: Circuit électrique équivalent relative à un capteur solaire plan.....</i>	<i>50</i>
<u>Chapitre IV</u>	
<i>FigureIV.1: L'évolution temporelle du rayonnement solaire.....</i>	<i>58</i>
<i>FigureIV.2: Variation temporelle des puissances solaires reçue et absorbées.....</i>	<i>59</i>
<i>FigureIV.3: Variation temporelle des températures de l'ambiance et du ciel.....</i>	<i>59</i>
<i>FigureIV.4: Evolution temporelle des températures des différentes parties du capteur.....</i>	<i>60</i>
<i>FigureIV.5: Evolution temporelle du rendement instantané du capteur.....</i>	<i>61</i>
<i>FigureIV.6: Variation temporelle de la puissance utile du capteur.....</i>	<i>61</i>
<i>FigureIV.7: Variation temporelle de température sortie du fluide caloporteur.....</i>	<i>62</i>
<i>FigureIV.8: Evolution temporelle des températures des différentes parties du capteur.....</i>	<i>62</i>
<i>FigureIV.9: Evolution temporelle du rendement instantané du capteur.....</i>	<i>63</i>
<i>FigureIV.10: Variation temporelle de température sortie du fluide caloporteur.....</i>	<i>63</i>
<i>FigureIV.11: Evolution de température sortie du fluide au cours de la journée.....</i>	<i>64</i>
<i>FigureIV.12: Evolution temporelle du rendement instantané du capteur.....</i>	<i>64</i>
<i>FigureIV.13: Evolution de température sortie du fluide.....</i>	<i>65</i>
<i>FigureIV.14: Evolution temporelle du rendement instantané du capteur.....</i>	<i>65</i>
<i>FigureIV.15: Evolution de température sortie du fluide.....</i>	<i>65</i>
<i>FigureIV.16: Evolution temporelle du rendement instantané du capteur.....</i>	<i>66</i>
<i>FigureIV.17: Evolution de température sortie du fluide.....</i>	<i>66</i>
<i>FigureIV.18: Evolution temporelle du rendement instantané du capteur.....</i>	<i>66</i>
<i>FigureIV.19: Evolution de température sortie du fluide.....</i>	<i>67</i>
<i>FigureIV.20: Evolution temporelle du rendement instantané du capteur.....</i>	<i>67</i>
<i>FigureIV.21: Evolution de température sortie du fluide.....</i>	<i>68</i>

Liste des figures

<i>FigureIV.22:</i>	<i>Evolution temporelle du rendement instantané du capteur.....</i>	<i>68</i>
<i>FigureIV.23:</i>	<i>Evolution de température sortie du fluide.....</i>	<i>68</i>
<i>FigureIV.24:</i>	<i>Evolution temporelle du rendement instantané du capteur.....</i>	<i>69</i>
<i>FigureIV.25:</i>	<i>Evolution de température sortie du fluide.....</i>	<i>69</i>
<i>FigureIV.26:</i>	<i>Evolution temporelle du rendement instantané du capteur.....</i>	<i>69</i>
<i>FigureIV.27:</i>	<i>Evolution de température sortie du fluide.....</i>	<i>70</i>
<i>FigureIV.28:</i>	<i>Evolution temporelle du rendement instantané du capteur.....</i>	<i>70</i>
<i>FigureIV.29:</i>	<i>Evolution temporelle des températures des différentes parties du capteur(T=20C°).....</i>	<i>71</i>
<i>FigureIV.30:</i>	<i>Evolution temporelle des températures des différentes parties du capteur(T=43C°).....</i>	<i>71</i>
<i>FigureIV.31:</i>	<i>Evolution temporelle des températures des différentes parties du capteur(T=5C°).....</i>	<i>72</i>
<i>FigureIV.32:</i>	<i>Evolution temporelle du rendement instantané du capteur(S=2m²).....</i>	<i>72</i>

Liste des tableaux

Chapitre I

<i>Tableau I.1: Caractéristiques principales du soleil.....</i>	<i>2</i>
<i>Tableau I.2: Caractéristiques principales de la terre.....</i>	<i>5</i>
<i>Tableau I.3: Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques.....</i>	<i>15</i>

Chapitre II

<i>Tableau II.1: Propriétés de quelques surfaces transparentes au rayonnement solaire mais opaques au rayonnement infrarouge.....</i>	<i>26</i>
<i>Tableau II.2: Caractéristiques des matériaux utilisés comme absorbeur.....</i>	<i>27</i>
<i>Tableau II.3: Revêtements des surfaces d'absorbeur.....</i>	<i>28</i>
<i>Tableau II.4: Propriétés thermiques de quelques matériaux isolants.....</i>	<i>29</i>
<i>Tableau II.5: la valeur du facteur k pour les différents capteurs solaires plans.....</i>	<i>31</i>

Chapitre IV

<i>Tableau IV.1: Caractéristiques du capteur plan étudié</i>	<i>57</i>
--	-----------

Nomenclature

Indice

Symbole	Désignation	Unité
C_p	chaleur spécifique	J/kg k
T	température	C°
N	nombre du jour	/
TSV	temps solaire vrai	Heure
TL	temps légal	Heure
TSM	temps solaire moyen	Heure
TU	temps universel	Heure
ΔH	décalage horaire	Heure
I_0	constant solaire	W/m ²
S	surface	m ²
φ	flux de chaleur	w
Nu	nombre de Nusselt	/
Pr	nombre de Prandtl	/
Re	nombre de Reynolds	/
Gr	nombre de Grashof	/
Ra	nombre de Rayleigh	/
g	Accélération de la pesanteur	m ² /s
G	Rayonnement global incident	W/m ²
h	Hauteur solaire	
h^c	coefficient d'échange par convection	W/m ² k
h^r	coefficient d'échange par rayonnement	W/m ² k
V_{vent}	Vitesse du vent	m/s
M	débit massique	Kg/s
D_H	diamètre hydraulique	m
p	périmètre	m
U	Coefficient global de perte du capteur	W/m ² °K

Nomenclature

Indices	Désignation
<i>am</i>	<i>Air ambiant</i>
<i>abs</i>	<i>Absorbeur</i>
<i>Ciel</i>	<i>Ciel</i>
<i>f</i>	<i>Fluide</i>
<i>Isolext</i>	<i>Isolant extérieur</i>
<i>isolint</i>	<i>Isolant intérieur</i>
<i>Vext</i>	<i>Vitre extérieure</i>
<i>Vint</i>	<i>Vitre intérieure</i>

Lettre grec

Symbole	Désignation	Unité
α	<i>Absorptivité</i>	-
β	<i>angle d'inclinaison capteur</i>	<i>degré</i>
δ	<i>déclinaison solaire</i>	<i>degré</i>
η	<i>Rendement</i>	-
θ	<i>angle d'incidence</i>	<i>degré</i>
λ	<i>conductivité thermique</i>	<i>W/m K</i>
μ	<i>viscosité dynamique</i>	<i>kg/m s</i>
ν	<i>viscosité cinématique</i>	<i>m²/s</i>
ρ	<i>masse volumique</i>	<i>Kg/m³</i>
σ	<i>constant de Stefan-Boltzmann</i>	<i>W/m²k⁴</i>
τ	<i>Transmittivité</i>	-
ω	<i>angle solaire</i>	<i>degré</i>
a	<i>Azimut</i>	<i>degré</i>
ε	<i>Emissivité</i>	-
e	<i>Epaisseur</i>	<i>m</i>

Sommaire

Résumé	I
Dédicace	II
Remerciements	III
Liste des figures	IV
Liste des tableaux.....	VII
Nomenclature.....	VIII
Sommaire	X
Introduction générale	I

Chapitre I : Gisement solaire

I.1 - Introduction.....	3
I.2 - Soleil et L'énergie solaire.....	3
I.2.1- Toute énergie renouvelable provient du soleil.....	3
I.2.2 - Soleil.....	4
I.3 - la Terre.....	7
I.3.1 - Caractéristiques de la terre	7
I.3.2 - L'atmosphère terrestre	7
I.3.3 - Mouvement de la terre	8
I.4 - Coordonnées célestes	8
I.4.1 - Coordonnées géographiques.....	8
I.4.2 - Coordonnées horizontals	9
I.4.3 - Temps solaires.....	10
1- Temps solaire vrais (TSV).....	10
2- Temps solaire moyen (TSM)	10
3- Temps universel (TU).....	10
4- Temps légal (TL).....	11
I.5 - rayonnement solaire.....	11
I.5.1 Le rayonnement direct.....	12
I.5.2 Le rayonnement diffus	12
I.5.3 Le rayonnement réfléchi	13
I.5.4 Le rayonnement global.....	13
I.5.5 - Le rayonnement solaire hors atmosphère	13
I.5.6 - Direction des rayons solaire par rapport à un plan	13
1- Orientation d'un plan.....	13
2- Angle d'incidence sur un plan.....	14
I.6 - Mesure du rayonnement solaire.....	15
1- Le Pyrhéliomètre.....	15
2- Pyranomètre ombré	15
3- Le Pyranomètre.....	16
I.7 - Le gisement solaire en Algérie.....	16
I.8 - conclusion	18

Sommaire

Chapitre II: Étude théorique d'un capteur solaire thermique

II.1 introduction.....	19
II.2 Principaux matériaux utilisés en photothermique	19
II.3 l' énergie solaire.....	19
II.4 Les Capteurs solaires.....	20
II .4. 2 Les composants d'un capteur plan	26
II .4. 3 Principe de fonctionnement d'un capteur Plan	32
II .5 Définition des différentes caractéristiques des capteurs solaires.....	32
II.6 Le rendement global.....	33
II .7 Paramètres et caractéristiques de fonctionnement des capteurs solaires	34
II.7.1 Paramètres externes.....	34
II.7.2 Paramètres internes	34
II.7.3 Paramètres de fonctionnements	34
II.8 Les différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire	35
II.8.1. La conduction.....	35
II.8.2. La convection	36
II.8.3. Le rayonnement.....	38
II.9 rappel de l'effet thermosiphon	39
II.9.1 principe du thermosiphon	40
II.9.2 les chauffe-eau thermosiphon monoblocs	40
II.9.3 les chauffe-eau thermosiphon à éléments séparés	41
II .10 Conclusion.....	42

Chapitre III: Le bilan thermique d'un capteur solaire

III.1 introduction.....	43
III.2 Puissances absorbées par un capteur solaire plan	43
III.3 Bilan thermique global du capteur plan en régime transitoire	44
III.4 Perte globale d'énergie	49
III.5 Rendement instantané du capteur solaire.....	51
III.6 Principe de simulation en régime transitoire	51
III.7 les différents modèles.....	53
III.8 L'organigramme général pour le régime transitoire	55
III.9 conclusion	56

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1 introduction.....	57
IV.2 L'évolution temporelle du rayonnement solaire incident	58
IV.3 Variation temporelle des puissances solaires reçue et absorbées.....	58
IV.4 Variation temporelle des températures de l'ambiance et du ciel	59
IV.5 Variation temporelles des températures des différentes parties du capteur.....	60
IV.6 Variation temporelle du rendement instantané.....	60
IV.7 Variation temporelle de la puissance utile du capteur	61
IV.8 Variation temporelle de température sortie du fluide caloporteur.....	61

Sommaire

<i>IV.9 Effet des paramètres externes sur le rendement instantané du capteur</i>	62
<i>IV.9.1 Effet de la vitesse du vent</i>	62
<i>IV.9.2 Effet de la température de l'ambiance</i>	63
<i>IV.9.3 Effet de surface d'échange</i>	72
<i>IV.10 Conclusion</i>	73
Conclusion générale	74
Références bibliographiques	76

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie a toujours constitué un enjeu vital pour l'homme et les sociétés humaines. Les comportements humains sont fortement induits par sa disponibilité ou sa non-disponibilité, son abondance ou sa pénurie. De ces comportements vont découler de nouveaux enjeux, en particulier pour l'environnement et les équilibres socio-économiques. La prise de conscience de l'importance de ces enjeux (réchauffement climatique, épuisement des ressources, augmentation des coûts de la santé, ...) devrait, nous l'espérons, permettre de tendre vers une utilisation plus rationnelle de l'énergie, une optimisation des processus énergétiques que nous mettons en œuvre tous les jours. [1]

L'énergie est l'un des moteurs du développement des sociétés. La civilisation industrielle s'est bâtie autour de l'exploitation du charbon à la fin XVIII^e siècle, puis du pétrole au milieu du XX^e siècle. Après le premier choc pétrolier de 1973. Quelques pays (exemple la France) ont optés pour une nouvelle énergie, Le nucléaire, contrairement aux autres pays du globe. Celle-ci nous dit on s'épuise vers les années 2050, alors que les menaces sur le climat sont pour une grande part dues à leur utilisation et que la consommation d'énergie ne cesse d'augmenter. Les énergies renouvelables apparaissent dans ce contexte une alternative intéressante pour préserver à la fois le confort des êtres humains et la qualité de l'air (Elles ne produisent pas de gaz à effet de serre qui sont responsables du réchauffement de la terre). [2]

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. Celles-ci sont exploitées par l'homme depuis la nuit des temps. Autrefois, moulins à eau, à vent, bois de feu, traction animale, bateaux à voile ont largement contribué au développement de l'humanité. Elles constituaient une activité économique à part entière, notamment en milieu rural où elles étaient aussi importantes et aussi diversifiées que la production alimentaire [7].

Parmi les énergies renouvelables, nous citons l'énergie solaire, une énergie exploitée depuis les millénaires. Les techniques d'exploitation de cette ressource ont vu ces dernières années une mutation remarquable faisant intervenir une technologie de pointe, rendant ainsi les coûts d'exploitation de plus en plus attractifs, notamment dans la production l'énergie thermique. En effet l'énergie thermique produit par voie solaire est une forme d'énergie très écologique sans émission de CO₂. De ce fait substitution des charbons, gaz naturelle et autres réduisent sans aucun doute les effets désastreux des systèmes énergétiques classiques [25].

Dans le cadre de ce travail, nous allons nous intéresser à l'exploitation de l'énergie solaire par voie thermique en utilisant un capteur solaire plan pour la production de l'eau chaude.

Introduction générale

Le but de notre travail est fait une simulation d'un capteur solaire thermodynamique thermosiphon à eau application au site de Ghardaïa.

A cet effet, un système d'équation régissant le comportement thermique du capteur et les différents coefficients d'échange thermique est établi. Une simulation mathématique nous a permis d'obtenir des résultats représentés graphiquement, suivi par une analyse et une discussion, en plus d'une conclusion générale et des recommandations [9].

Le présent travail comporte quatre chapitres:

- Le premier chapitre est consacré à l'étude du gisement solaire avec quelques notions et définitions astronomiques, couramment utilisées dans tout domaine relatif au solaire.
- Une étude théorique du capteur solaire plan, ses différents composants, ses classifications, son fonctionnement et les différents échanges thermiques mis en jeu au sein du capteur feront l'objet du deuxième chapitre.
- Dans le troisième chapitre, nous présenterons une étude thermique des capteurs plans à eau, les différentes équations gouvernant le fonctionnement du système en régime transitoire ainsi qu'une simulation numérique du comportement du système.
- Les principaux résultats obtenus et leurs interprétations font l'objet du quatrième chapitre.
- Une introduction générale et une conclusion se rapportant au travail, complètent ce mémoire

Chapitre I

I.1 - introduction

Énergie, capacité d'un système à produire un travail. L'énergie est l'un des quatre concepts prédéfinis de la physique, avec la matière, l'espace et le temps. L'énergie totale d'un système isolé demeure constante. [2]

Les ressources énergétiques mondiales peuvent être classées en: [3]

- Les énergies conventionnelles ou les énergies non renouvelables, elles sont d'origine fossile, dont les plus connues sont : le pétrole, le charbon, le gaz et l'uranium.
- Les énergies renouvelables ou les énergies non conventionnelles, dont les plus importantes sont : le solaire ; l'éolien, la géothermie et la biomasse.

Elles ont pour origines des sources d'énergie inépuisables grâce aux cycles naturels telles que, le rayonnement solaire, le vent, le flux de chaleur interne de la terre, et le cycle du carbone dans la biosphère. [4] qui sont essentiellement :

- ✓ Le rayonnement solaire, qui procure 99,97% de sa densité thermique.
- ✓ La chaleur interne terrestre, qui procure 0,03% de sa densité thermique.
- ✓ Les forces de gravitation [5].

L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, elle est l'une des plus facilement exploitables. Comme la plus part des énergies douces, elle donne à l'utilisateur la possibilité de subvenir sans intermédiaire à une partie de ses besoins. [4]

I.2 - Soleil et L'énergie solaire

I.2.1 - Toute énergie renouvelable provient du soleil

Toute énergie provient du Soleil, L'énergie éolienne, la force hydraulique et la chaleur sont issues directement du rayonnement solaire. Cela vaut également pour le pétrole, le gaz naturel et le charbon qui peuvent être considérés comme de l'énergie solaire accumulée depuis des millions d'années. Théoriquement, l'énergie solaire rayonnée en une demi-heure pourrait couvrir la totalité des besoins énergétiques mondiaux d'une année. Seule une infime partie est utilisée techniquement aujourd'hui [2].

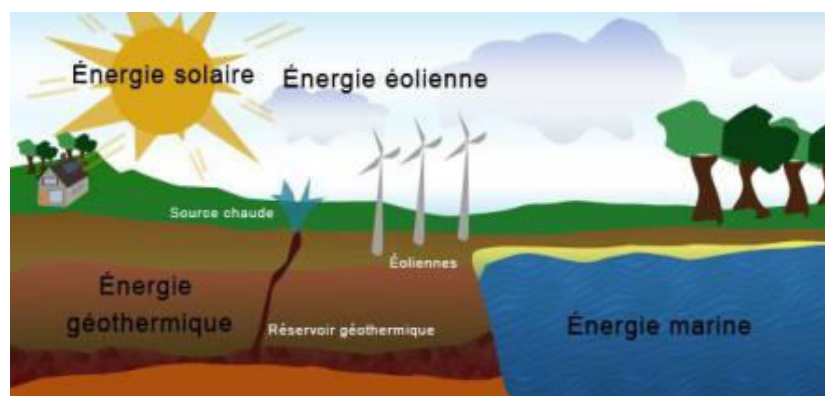


Figure I.1: Les énergies renouvelables [5].

I .2 .2 - Soleil

Le soleil est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la terre, sa lumière met environ 8 mn à nous atteindre. La deuxième étoile la plus proche est Proxima de Centaure située à 4.23 années lumières du soleil mais la grande distance qui nous sépare de cette étoile fait que le soleil soit la seule étoile qui assure la vie sur terre. [3].

La masse du soleil représente 99.85 % de la masse totale du système solaire et 330000 fois la masse de la terre. L'âge du soleil est approximativement de 5 milliards d'années. La température apparente de la surface du soleil a voisine 5 7500 °C. . [2]

L'astre soleil est de constitution gazeuse, de forme sphérique de 14×10^5 km de diamètre, sa masse est de l'ordre de 2×10^{30} kg. Il est constitué principalement de 80% d'hydrogène, de 19% d'hélium, le 1% restant est un mélange de plus de 100 éléments. Il est situé à une distance de la terre égale à environ 150 millions de km.

Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau ci-dessous [4]

Tableau I.1 : Caractéristiques principales du soleil [4].

Diamètre (km)	14×10^5
Masse (kg)	2×10^{30}
Surface (km ²)	6.09×10^{12}
Volume (km ³)	1.41×10^{18}
Masse volumique moyenne (kg/m ³)	1408
Vitesse (km/s)	217
Distance du centre de la voie lactée (km)	2.5×10^{17}

A- Constitution physique du soleil

Le soleil n'est pas une sphère homogène, il est constitué de :

- Le noyau contient 40% de la masse du soleil, c'est là où se crée 90% de son énergie sous forme de rayons gamma et X, tout le rayonnement émis dans cette région est totalement absorbé par les couches supérieures, cette zone s'étend sur une épaisseur de 25.104 km, elle présente les caractéristiques suivantes : [3]
 - Une température de 15.10^6 °C.
 - Une densité est de 1015 kg/m^3 .

- Une pression de 109 atm.
 - La zone radiative où la chaleur produite se propage par une diffusion radiative, elle présente les propriétés suivantes :
 - Une épaisseur de 244160 km.
 - Une température variant de $10 \cdot 10^6$ °C à $50 \cdot 10^4$ °C.
 - La zone de convection où la chaleur produite se propage par une convection turbulente, elle présente les propriétés suivantes:
 - Une température comprise entre $50 \cdot 10^4$ °C à 6400 °C.
 - Une épaisseur de l'ordre 199758 km.
 - La photosphère est une couche opaque, les gaz qui la constituent sont fortement ionisés et capables d'absorber et d'émettre un spectre continu de radiations, elle émet 99% du rayonnement total principalement dans le visible et c'est elle que l'œil humain perçoit. Elle présente les caractéristiques suivantes: [3]
 - La température de surface décroît de 6400 °C à 4500 °C.
 - Une épaisseur de 500 km.
 - Une pression de 1/100 atm.
 - La chromosphère constitue avec la couronne l'atmosphère du soleil, cette couche présente les caractéristiques suivantes :
 - Une épaisseur 2000 km.
 - Une température augmentant de 4200 °C à 10^4 °C.
- La couronne est la dernière couche du soleil, ses caractéristiques sont :
- Elle est sans limite précise.
 - La température augmente de 10^6 °C à $2 \cdot 10^6$ °C. [3]

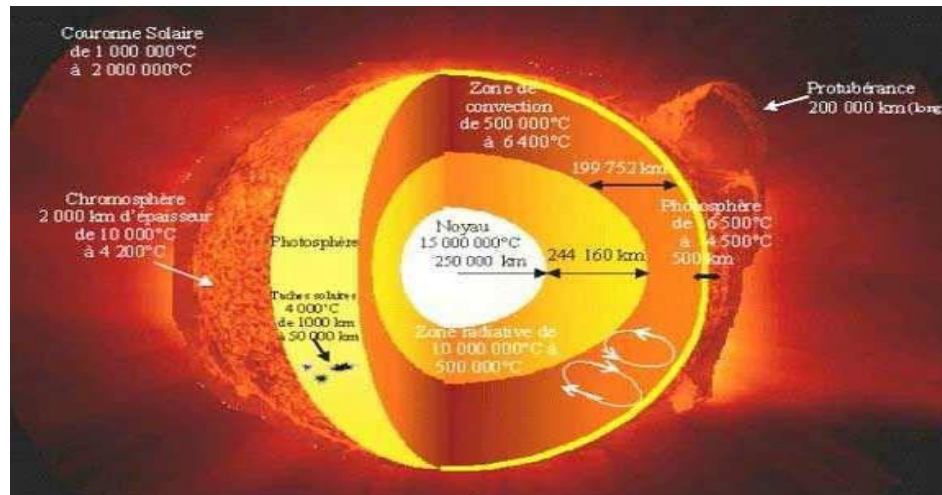


Figure I.2: Structure du soleil [3]

B- Mouvements du soleil

La figure I.3 représente le mouvement annuel de la terre autour du soleil dans un plan appelé plan écliptique. Le nom d'écliptique provient du fait que la lune doit être dans ce plan pour qu'une éclipse se produise.

Ce mouvement annuel de la terre donne l'impression que le soleil se déplace, au cours de l'année, sur un grand cercle de la sphère céleste appelé cercle écliptique: le cercle écliptique coupe le cercle équatorial en deux points γ et γ' ; le point γ , appelé point vernal, indique la direction dans laquelle un observateur terrestre verra le soleil le jour de l'équinoxe de printemps.

L'axe des pôles terrestres P et P' fait avec l'axe des pôles Q et Q' de l'écliptique un angle ε dont la valeur est égale à $23^{\circ}27'$.

Cette révolution fait varier les durées relatives du jour et de la nuit au rythme des saisons limitées par les deux équinoxes et les deux solstices (voire figure I.3)

- Equinoxe de printemps correspond au 21 Mars
- Equinoxe d'automne correspond au 23 Septembre
- Solstice d'été correspond au 22 Juin
- Solstice d'hiver correspond au 22 Décembre. [7]

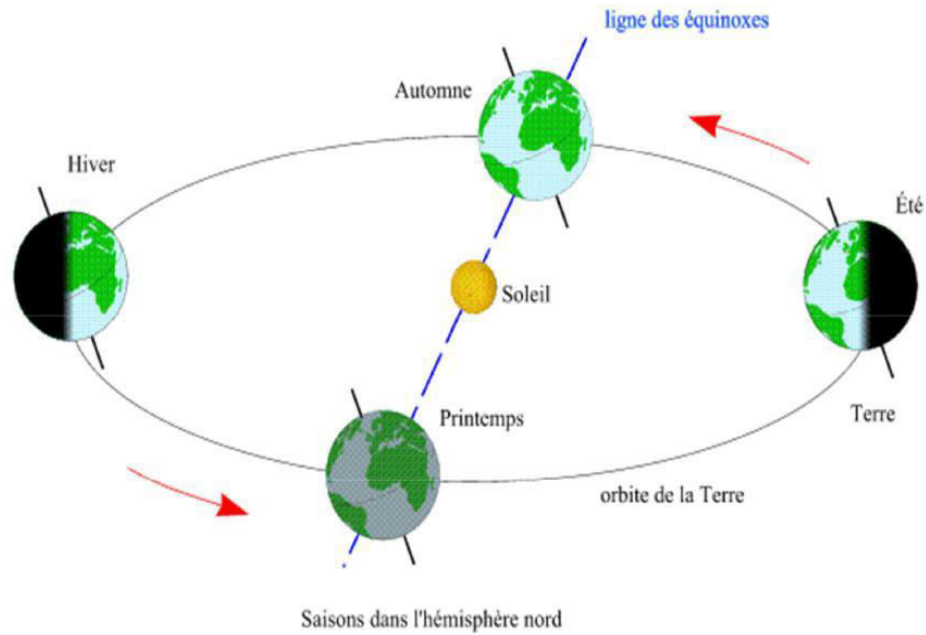


Figure I.3: Mouvement apparent du soleil [7].

I.3- la Terre

I.3.1- Caractéristiques de la terre

Les principales caractéristiques sont données dans le tableau I.2 [17]

Tableau I.2 : Caractéristiques principales de la terre [17].

Caractéristiques	Valeur
Masse	6.10^{21} t
Volume	1083320.10^6 km ³
Surface	510101.10^3 km ²
Diamètre équatorial	12756,32 km
Diamètre polaire	12713,55 km

I.3.2- L'atmosphère terrestre

L'atmosphère est constituée de plusieurs couches on distingue notamment :

- ✓ La troposphère, entre le sol et 15 km d'altitude.
- ✓ La stratosphère, entre 15 et 80 km d'altitude.
- ✓ L'ionosphère, entre 80 et 200 km d'altitude. [17]

I.3.3- Mouvement de la terre

La trajectoire de la terre autour du soleil est une ellipse dont le soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique. L'excentricité de cette ellipse est faible, il en résulte que la distance terre-soleil ne varie que de $\pm 1.7\%$ par rapport à la distance moyenne qui est de $149, 579.10^6$ km. La position de la terre à l'équinoxe de printemps est appelée point vernal g. La révolution complète de la terre autour du soleil s'effectue en une année, on distingue :

- ✓ **L'année tropique:** est l'intervalle de temps qui sépare deux équinoxes de printemps successifs. Elle est de 365j, 5h, 48min, 46s.
- ✓ **L'année sidérale:** est le temps mis par le soleil pour que sa longitude céleste augmente de 360° à partir d'un équinoxe fixe. Elle est de 365j, 6h, 9min, 10s. [17]

I.4 - Coordonnées célestes

I.4.1 - Coordonnées géographiques

Sont des coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre. (Figure I.4)

A. La longitude (L) : est comptée positivement de 0 à $+180^\circ$ vers l'est et négativement de 0 à -180° vers l'ouest, à partir du méridien Greenwich.

B. La latitude (Φ) : permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque à l'équateur. Elle est comptée positivement de 0 à $+90^\circ$ vers le nord et négativement de 0 à -90° vers le sud.

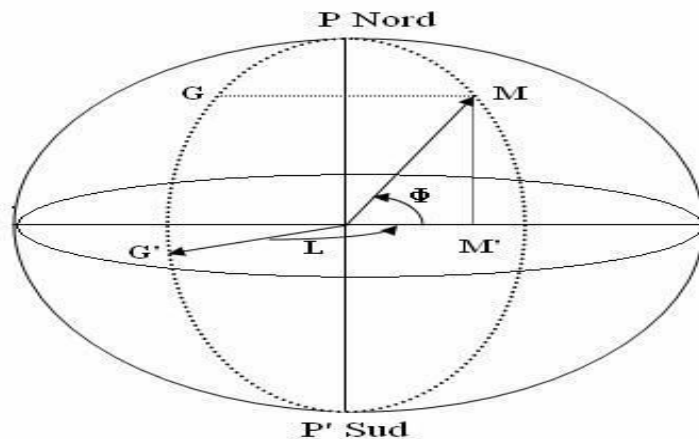


Figure I.4: les Coordonnées géographiques [8].

C.L'angle horaire (ω): est déterminé par la rotation régulière de la terre autour de son axe .Elle est comptée positivement dans le sens rétrograde de 0 à $+360^\circ$, une heure sidérale vaut donc 15° d'angle et $\omega=0^\circ$ (12 h :00) au méridien de Greenwich.

D.La déclinaison (δ) : c'est l'angle fait par le plan de l'équateur avec celui de l'écliptique. Elle est variée au cours de l'année de $+23^{\circ}27'$ à $-23^{\circ}27'$ et détermine l'inégalité des durées des jours. δ est donnée par la relation suivante [8] :

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{360}{365}(N + 284)\right) \quad (I.1)[8]$$

N : Le numéro du jour dans l'année compté à partir du 1^{ère} janvier (1 à 366).

I.4.2 - Coordonnées horizontal

a. La hauteur du soleil h : C'est l'angle que fait la direction de l'astre avec le plan horizontal. Il est particulièrement égal à : 0° au lever et coucher astronomiques du soleil. 90° à midi temps solaire vrai. φ Latitude de lieu [9].

$$\cos(h) = \cos(\delta)\cos(\varphi)\cos(\omega) + \sin(\delta)\sin(\varphi) \quad (I.2)[9]$$

b. L'azimut (a) : est l'angle entre la direction de soleil et la direction de sud. On peut le compter positivement de 0 à $+180^{\circ}$ vers l'ouest et négativement de 0 à -180° vers l'est.

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta)\sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (I.3)[9]$$

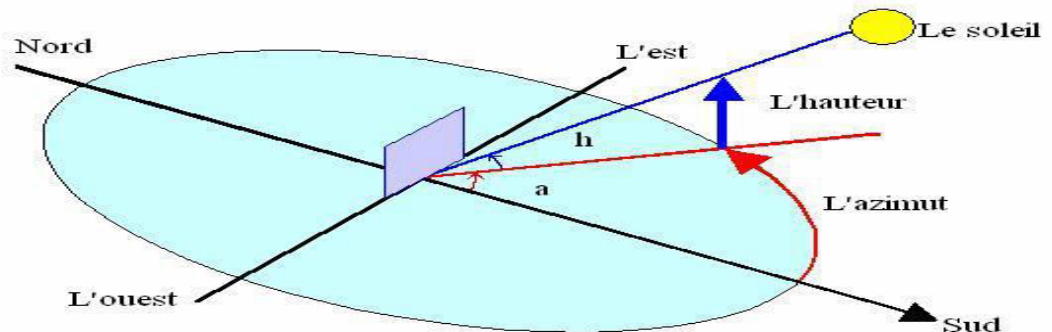


Figure I.5: Les coordonnées horizontales [8].

I.4.3 - Temps solaires

1. Temps solaire vrais (TSV)

Le temps solaire vrais, en un instant et un lieu donné, est l'angle horaire du soleil, ce temps est indiqué par les cadrans solaires et les héliographes, Il est donné par la relation suivante [8] :

$$TSV = 12 + \frac{\omega}{15} \quad (I.4)[8]$$

2. Temps solaire moyen (TSM)

Le temps solaire moyen est appelé parfois temps local, Il est donné par la relation suivante [8] :

$$TSM = TSV + Et \quad (I.5)[8]$$

Où:

$$Et = 9.87 \sin \left[\frac{2.360}{365} (N - 81) \right] - 7.53 \cos \left[\frac{360}{365} (N - 81) \right] - 1.5 \sin \left[\frac{360}{365} (N - 81) \right] \quad (I.6)[8]$$

Et : est l'équation du temps exprimée en minutes.

N: est le numéro du jour dans l'année.

Cette équation du temps (ET) indique la correction qui permet de passer du temps solaire vrai au temps solaire moyen cette correction varie de -14 à +16 minutes au cours de l'année. Cela veut dire que le soleil peut passer au méridien de 16 minutes d'avance ou 14 minutes de retard par rapport au temps moyen.

3. Temps universel (TU)

Le temps universel est le temps civil moyen du méridien de Greenwich (méridien origine), appelé encore GM.T (Greenwich Mean Time). Est donné par la relation suivante:

$$TU = TSM - \frac{L}{15} \quad (I.7)[8]$$

Où : L est la longitude .Tel que :

L < 0 : Pour les sites situés à l'Est de Greenwich.

L > 0 : Pour les sites situés à l'Ouest de Greenwich.

L = 0 : Pour les sites situés au méridien de Greenwich.

4. Temps légal (TL)

Le temps légal est une heure liée au TU par une différence fixe exprimée en un nombre entier d'heures qui dépend de la longitude et des coutumes de chaque pays. Est donné par la relation suivante [8] :

$$TL = TU + \Delta H \quad (I.8)[8]$$

Où :

ΔH : Est le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considérée.

I.5 Rayonnement solaire

L'énergie solaire est l'énergie émise par le soleil sous forme d'ondes électromagnétiques (principalement entre 0,3 et 3 micromètres) ou toute autre énergie obtenue par captage du rayonnement solaire. [2]

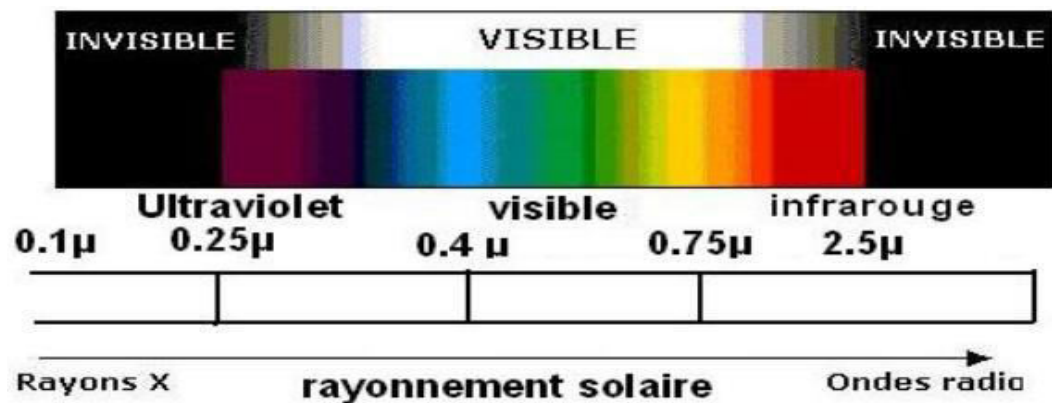


Figure. I.6: La longueur d'onde de rayonnement solaire [10].

Le rayonnement Solaire est une énergie produite par le Soleil à la suite de réactions de fusion thermonucléaire. [10] L'hydrogène se transforme en hélium et voit sa masse diminuée au coure de cette réaction. [2] qui dégage une très grande quantité d'énergie, source de la plupart des énergies disponibles sur Terre et exploitable pour la production d'électricité.



La masse totale du soleil diminue de 4 million de tonnes à chaque seconde. Cette masse disparue se retrouve sous forme d'énergie selon la loi d'Einstein.

$$E = m_e C_L^2 \quad (I.9)[2]$$

Où :

C'est la vitesse de la lumière dans le vide (300 000 000 m/s). Il produit ainsi chaque seconde 36.10²⁵ joules soit environ 10¹⁶ Tep (Tonne équivalent Pétrole). Cette énergie est émise dans tout l'espace sous forme de rayonnement [2]

L'énergie solaire se propage dans l'espace sous la forme de « grains », ou quanta d'énergie, les photons ; elle est sans cesse renouvelée.[10]

Le rayonnement solaire qui nous provient sous forme de rayonnement thermique se propage sous la forme d'ondes électromagnétiques. C'est un apport énergétique disponible quotidiennement, dont l'intensité varie selon le lieu, l'heure et la date. Le rayonnement solaire arrive au sol directement et sous forme diffuse, l'ensemble forme le rayonnement global .[11]

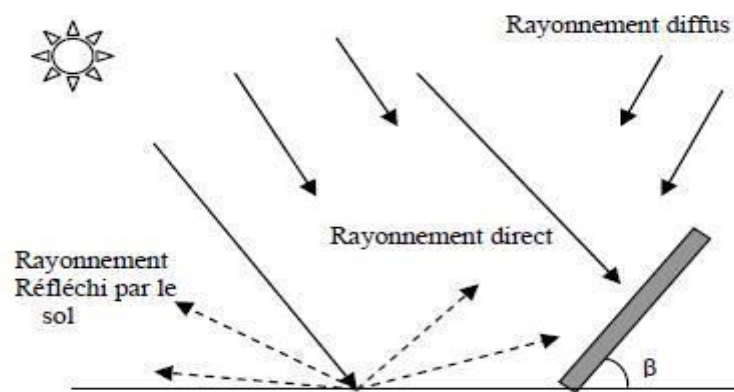


Figure I.7: Composantes du rayonnement solaire [11].

I.5.1 Le rayonnement direct

C'est le rayonnement solaire atteignant directement la surface terrestre depuis le soleil et celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications. Il dépend de l'épaisseur de l'atmosphère que la radiation solaire doit traverser et de l'inclination des rayons par rapport au sol. Le pyréliomètre mesure l'intensité du rayonnement direct. Le pyréliomètre doit être muni d'un dispositif chargé de l'orienter en permanence vers le Soleil. [12]

I.5.2 Le rayonnement diffus

C'est l'éclairement énergétique provenant de toute la voûte céleste et un part qui diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée. [12]

I.5.3 Le rayonnement réfléchi

C'est le rayonnement émis par la surface terrestre sous forme réfléchi ou diffuse. Il dépend directement de la nature du sol. Il est donc négligeable pour les systèmes photothermiques sauf pour le fort albédo du sol (neige) et au facteur de trouble atmosphérique élevé (vent de sable). [12]

I.5.4 Le rayonnement global

Est le rayonnement reçu sur une surface horizontale provenant du soleil et de la totalité de la voûte céleste. Il est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus. La figure 1.8 illustre les différents composants du rayonnement solaire au niveau du sol. Les trois quantités, le rayonnement direct noté I, le rayonnement diffus D, et le rayonnement global G, sont reliés par la relation suivante : [4]

$$G = I \cdot \sin(h) + D \quad (\text{I.10})[4]$$

I.5.5 Le rayonnement solaire hors atmosphère

Le rayonnement solaire hors atmosphère ne dépend que des paramètres astronomiques, il est caractérisé par une donnée fondamentale appelée constante solaire. [4]

✓ La constante solaire

La constante solaire E_0 est le flux énergétique reçu par une surface unité, normale aux rayons solaires, située en dehors de l'atmosphère à une distance moyenne terre-soleil. La mesure de la constante solaire a fait l'objet de nombreuses expériences. Dans notre cas nous adopterons la valeur de 1353 w/m^2 ($\pm 1,5\%$). Ce flux, dit constante solaire varie cependant légèrement au cours de l'année, suivant les variations de la distance terre-soleil. [4]

En première approximation, on peut calculer la valeur de E en fonction du numéro du jour de l'année j par la relation suivante: [4]

$$E = E_0 [1 + 0.033 \cos(0.984N)] \quad (\text{I.11})[4]$$

I.5.6 Direction des rayons solaires par rapport à un plan

1- Orientation d'un plan

Un plan quelconque est défini par deux angles. (γ α ,)

γ : hauteur du plan, c'est l'angle que fait la normale du plan et sa projection sur le plan horizontal.

α : azimut du plan, c'est l'angle que fait la projection de la normale sur le plan horizontal et la direction du sud.

L'inclinaison β du plan par rapport au plan horizontal est donnée par : [13]

$$\beta = 90 - \gamma \quad (\text{I.12})[13]$$

β angle entre le plan horizontal et le plan considéré: [15]

$\beta = 0$ pour le plan horizontal

$\beta = 90^\circ$ pour un plan vertical

$\beta > 0$ si le plan regarde l'équateur

α , angle entre le méridien local et la normale au plan: [15]

$\alpha = 0$ vers le sud

$\alpha < 0$ vers l'est

$\alpha > 0$ vers l'ouest

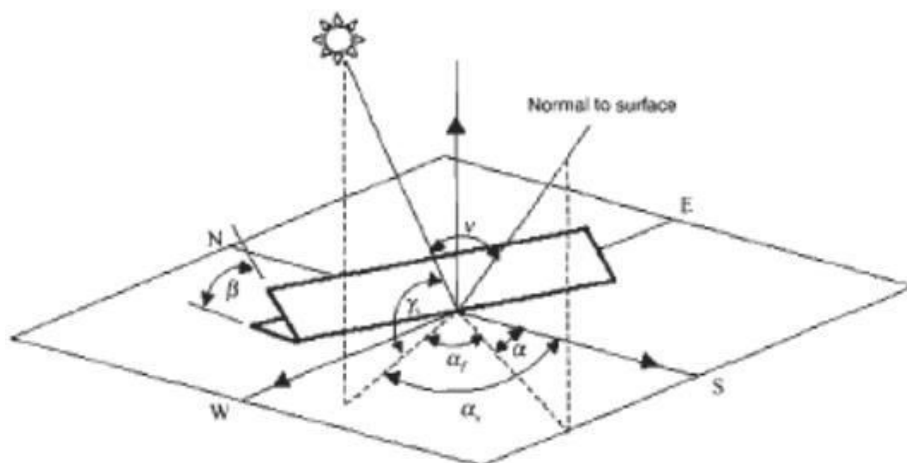


Figure I.8: Orientation et inclinaison d'une surface. [16]

2- Angle d'incidence sur un plan

L'angle d'incidence i est l'angle entre la direction du soleil et la normale du plan. Cet angle est déterminé par la connaissance des cosinus directeurs du rayon incident et la normale en coordonnées horizontales :

$$\cos(i) = \cos(\alpha - a) \cos(\gamma) \cos(h) + \sin(\gamma) \sin(h) \quad (\text{I.13})[13]$$

En coordonnées horaires : [13]

$$\begin{aligned} \cos(i) = & \sin(\alpha) \cos(\gamma) \sin(\omega) \cos(\delta) + \cos(\alpha) \cos(\gamma) \\ & (\cos(\omega) \cos(\delta) \sin(\varphi) - \sin(\delta) \cos(\varphi)) + \\ & \sin(\gamma) (\cos(\omega) \cos(\delta) \cos(\varphi) + \sin(\delta) \sin(\varphi)) \end{aligned} \quad (\text{I.14})[13]$$

- pour une surface horizontale ($\beta = 0$) : [15]

$$\cos(i) = \sin(h) \quad (\text{I.15})[15]$$

- pour une surface verticale ($\beta = 90^\circ$) :

$$\cos(i) = \cos(h) \cos(a) \quad (\text{I.16})[15]$$

- pour une surface orientée vers l'équateur et inclinée d'un angle β sur horizontale: [15]

$$\cos(i) = \cos(\varphi - \beta)\cos(\delta)\cos(\omega) + \sin(\varphi - \beta)\sin(\delta) \quad (I.17)[15]$$

I.6 - Mesure du rayonnement solaire

La mesure du rayonnement solaire est assurée par des appareils spécifiques :

1- Le Pyrhéliomètre

La mesure de l'éclairement solaire direct est assurée par un Pyrhéliomètre. Cet appareil est généralement constitué par une thermopile peinte en noir. Cette thermopile est installée dans un tube de 30cm de longueur ayant une ouverture de 5°. Le tube est monté sur un système de poursuite du disque solaire, appelé monture équatorial qui permet au tube d'être pointé constamment vers le soleil. Ainsi à l'exclusion du rayonnement issu de l'atmosphère et de la terre cet appareil ne mesure que le rayonnement directement issu du soleil. [5]



Figure I.9: Pyrhéliomètre [5].

2- Pyranomètre ombré

La mesure de l'éclairement diffus est assurée par un Pyranomètre avec un anneau d'ombrage appelé bande pare-soleil. Cette dernière permet d'occulter la partie sensible du pyranomètre de la part du rayonnement solaire provenant directement du disque solaire. Ce qui permet par conséquent de ne mesurer que l'éclairement du au rayonnement diffus.



Figure I.10: Pyranomètre avec anneau d'ombrage [5].

3- Le Pyranomètre

Pour la mesure de l'éclairement global, on utilise un Pyranomètre.



Figure I.11: Pyranomètre [5].

Les pyranomètre les plus utilisés sont de type (Kipp Zonen) pour la mesure de l'éclairement solaire global. Il peut être fixé sur une base collée parallèlement sur le capteur, ainsi il aura la même inclinaison du capteur (Figure I.12). [5]



Figure I.12: Solarimètre type (Kipp Zonen) [5].

I.7 Le gisement solaire en Algérie

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire, De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure I.13 : [14].

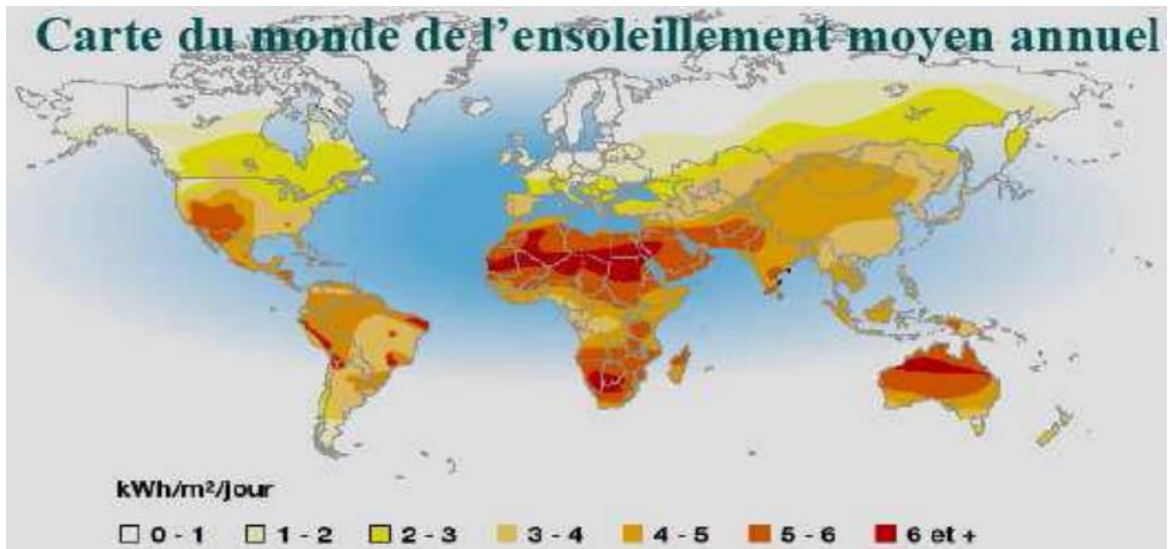


Figure I.13: Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [14].

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13.9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. [14]

La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau I.2 selon l'ensoleillement reçu annuellement [14]:

Tableau I.3: Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques [14].

Régions	Région côtières	Haute plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié brièvement le gisement de soleil, son énergie et son rayonnement reçus au niveau de la terre. Nous avons défini aussi quelques données astronomiques nécessaires pour cette étude et nous introduirons quelques données sur le gisement solaire.

Chapitre II

II .1 Introduction

Le capteur solaire est un échangeur de chaleur qui fonctionne entre une source radiante le soleil et un fluide. Son rôle est la conversion de l'énergie apportée par le rayonnement solaire en énergie calorifique. La chaleur collectée par l'absorbeur est cédée au fluide caloporteur qui circule dans des canalisations qui servent à transporter la chaleur du capteur vers le point d'utilisation.

L'histoire des capteurs thermiques à basse température remonte à Horace-Bénédict de Saussure (1740-1799) qui met en évidence l'effet de serre obtenu par un vitrage au-dessus d'un absorbeur dans un caisson isolé. Il faut cependant attendre 1910 pour voir apparaître les premiers chauffe-eau solaires en Californie. [9]

Dans le présent chapitre on décrit les différentes techniques de captation, ainsi qu'une présentation des différents composants d'un capteur solaire plan.

II .2 Principaux matériaux utilisés en photothermique

De nouveaux problèmes relatifs aux matériaux sont apparus lors du développement des applications thermiques de l'énergie solaire. Une partie de chaque réalisation solaire doit être installée à l'extérieur et doit pouvoir résister aux divers agents atmosphériques pendant au moins une dizaine d'années. Les agressions, dont l'installation extérieure pourra être dégradée, proviennent principalement des causes suivantes:

- Le rayonnement solaire, dont la composante ultra-violette peut induire des réactions photochimiques modifiant la constitution des matériaux.
- La pluie, qui pose des problèmes d'étanchéité et aussi d'hydrolyse de certaines substances organiques.
- La rosée, fréquemment oxydante car elle peut contenir un peu d'eau oxygénée.
- La grêle qui peut casser les couvertures des capteurs.
- Le vent chargé de sable qui raye les surfaces transparentes.
- La poussière, particulièrement gênante en ville ou à proximité d'industries polluantes.
- Les variations de température (entre -1 °C par nuit d'hiver rigoureux et $+13$ °C pour un capteur laissé vider au soleil) qui entraînent des dilatations. [18]

II .3. l'énergie solaire

II.3.1 L'énergie solaire thermique

Le thermique solaire est un procédé de transformation de l'énergie solaire en une forme thermique, qu'on peut utiliser :

- En usage direct de la chaleur : chauffe-eau solaire, chauffage solaire, cuisinière et séchoir solaire.
- En usage indirect où la chaleur sert pour un autre usage : centrales solaires thermodynamiques, froid solaire. [19]

II.3.2 L'énergie solaire thermodynamique

Le solaire thermodynamique utilise le solaire thermique pour produire de l'électricité selon le même principe qu'une centrale électrique classique mais en utilisant des centrales héliothermoélectriques. [19]

Trois types principaux de centrales sont utilisées [19]:

- ✓ Les centrales à capteurs cylindro-paraboliques pour atteindre des températures entre 300 et 350 °C.
- ✓ Les centrales à capteurs paraboliques pour atteindre des températures de 1000°C ou plus.
- ✓ Les centrales à tour pour atteindre 1000 °C.

II.4 Les Capteurs solaires

Selon la conversion d'énergie on distingue deux catégories de capteurs solaires :

- Capteurs solaires thermiques.
- Capteurs solaires photovoltaïques [9].

Dans notre travail on s'intéressera uniquement au capteur solaire thermique.

II.4.1 Capteurs solaires thermiques

Ce sont des capteurs qui transforment l'énergie solaire en énergie thermique, utilisés pour le chauffage des locaux, la production d'eau chaude sanitaire à basse température, on distingue deux catégories de capteurs solaires thermiques: [9]

- 1- Capteurs à air
- 2- Capteurs à circulation de liquide.

1- Les capteurs solaires à air

Le capteur solaire à air est constitué généralement d'une plaque noire exposée au soleil pour s'échauffer et deux plaques de verre (double vitrage), ce système étant recouvert d'un isolant qui limite les pertes de chaleur (Voir Figure II.1).

L'air circulant entre le verre et la plaque noire pour s'échauffer, a un rendement de l'ordre de 40 à 50 %. [20]

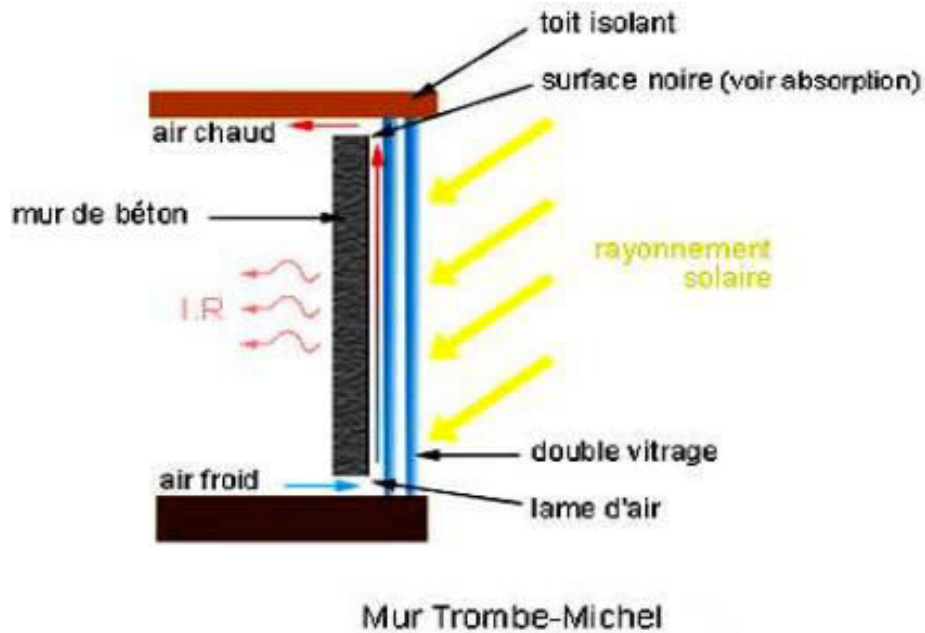


Figure II.1: Capteur à air fixé à un mur (mur Trombe) [20].

Le mur Trombe-Michel est un système directement incorporé au mur d'une maison. Une des parties d'un mur extérieur est remplacée par un double vitrage derrière lequel est situé un mur de béton (le mur de béton se trouve donc dans la maison)

2- Capteurs à circulation de liquide

Ce sont des capteurs où le fluide caloporteur qui circule à travers un circuit solaire c'est un liquide (eau, huile, un fluide thermique, antigel).

Les capteurs solaires à circulation de liquide les plus répandus sont :

- les capteurs plans.

2.1- Capteur plan (ou isolateur)

Le rayonnement solaire peut être transformé en chaleur à basse température, par des capteurs plans utilisant conjointement l'absorbeur, surface sélective et l'effet de serre créé par le vitrage, Ces capteurs ont l'avantage d'utiliser aussi bien les rayons directs du soleil que les rayons diffusés, c'est à dire que même par temps couvert, le fluide caloporteur de capteur parvient à s'échauffer. L'autre avantage est qu'il n'est pas nécessaire d'orienter le capteur suivant le soleil. [19]

Il existe trois types de capteurs solaires plans :

- Capteurs plans non vitre.
- Capteurs plans vitre.
- Capteurs plans à haute performance. [9]

✓ **Avantages**

- Cout du capteur relativement bas.
- Le capteur peut être installé au sol comme il peut être aussi intégré architecturalement (toits, balcons,.....).
- Il possède un degré de rendement élevé [21].

✓ **Inconvénients**

- Baisse du rendement d'utilisation en hiver à cause des pertes thermiques élevées.
- Risque de salissement de la surface de l'absorbeur par dépôt de poussière particulièrement dans les régions arides et semi arides.
- Possibilité de condensation au vitrage de capteur [21].

a- Capteurs non vitrés

Le capteur non vitré est composé d'une série de tubes noirs en matière plastique accolés les uns aux autres, les tubes étant parcourus par de l'eau (fluide caloporteur) Pour chauffer l'eau d'une piscine. Le rendement du capteur moquette est très bon pour produire des températures proches de la température de l'air ambiant (20 à 30°C). [20]



Figure II.2: Capteur non vitré [20]

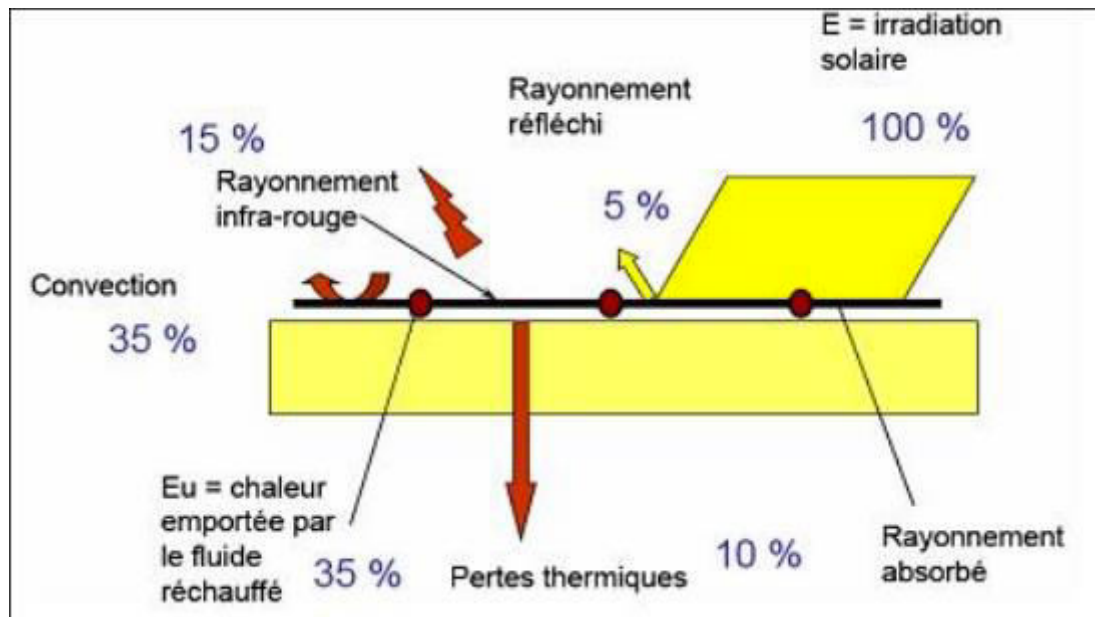


Figure II.3: Principe de fonctionnement de capteur solaire non vitré à revêtement sélectif [21].

Avec :

- $E =$ irradiation solaire 100%
- Transfert par convection 35%
- Rayonnement réfléchi 5%
- $E_u =$ chaleur emportée par le fluide réchauffé 35%
- Rayonnement infra-rouge 15%
- Pertes thermiques 10%

b- Les capteurs plans vitrés

Les capteurs solaires plans vitrés sont très répandus. Ils existent sous formes de capteurs à eau et de capteurs à air.

Ces capteurs conviennent mieux à des applications à température modérée où les températures souhaitées se situent entre 30°C et 70°C. Les capteurs à circulation d'eau sont plus couramment utilisés pour la production de l'eau chaude sanitaire à l'échelle individuelle ou collective, pour un usage industriel, ainsi que pour les piscines intérieures. Les capteur. [5]



Figure II.4: Capteur plan vitré [5].

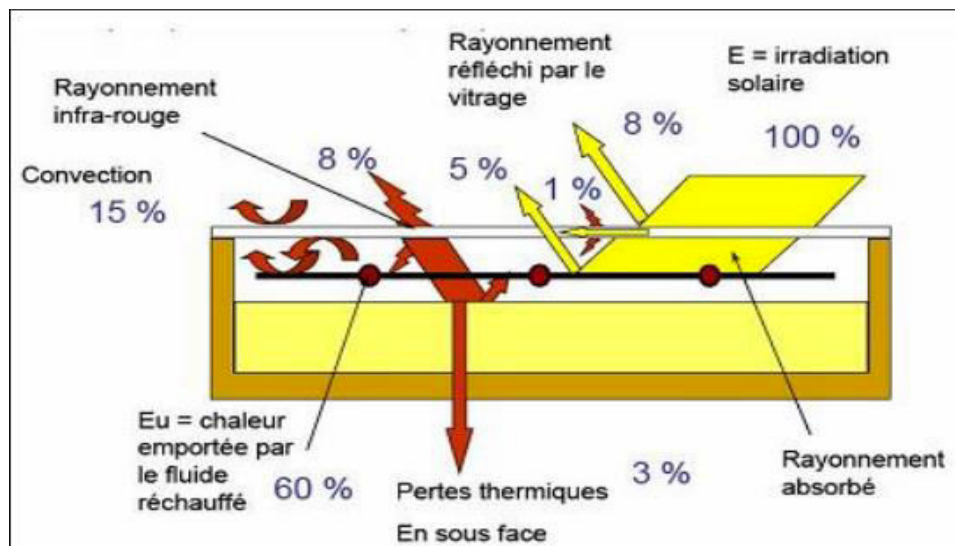


Figure II.5: Principe de fonctionnement des capteurs plans vitrés [21].

c- Capteurs plan à haute performance

1. Capteurs plans sélectifs

Chaque par exemple Certains absorbeurs ont un revêtement sélectif dont la propriété est d'émettre qu'une faible portion de l'énergie absorbée (7 à 20%). Pour la plupart des capteurs ce type de revêtement est à base de nickel et de chrome.

L'absorbeur sélectif améliore le rendement du capteur.

Cette particularité est d'autant plus intéressante pour des climats froids et pour des applications nécessitant des températures importantes (eau). figure(II.6) [9]

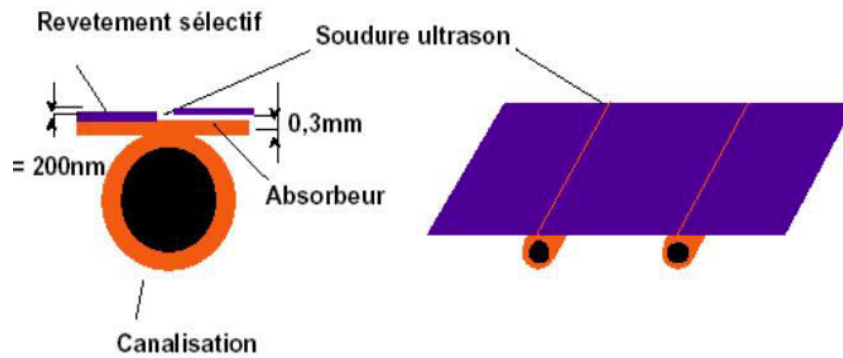


Figure II.6: Absorbeur et revêtement sélectif [9].

2. Les capteurs sous vide

Les capteurs solaires "sous vide" sont composés d'une série de tubes en verre transparents. Dans chaque tube il y a une plaque absorbante pour capter le rayonnement solaire et un échangeur pour favoriser le transfert de l'énergie thermique. Les tubes sont mis sous vide pour éviter les déperditions thermiques convectives de la plaque absorbante et la plaque absorbante reçoit un traitement sélectif pour empêcher le rayonnement à ce dissiper sous forme de grande longueur d'onde. Ainsi, on peut réaliser des capteurs solaires performants sans une isolation thermique rapportée ou un coffre de protection. [5]



Figure II.7: Capteur sous vide [22].

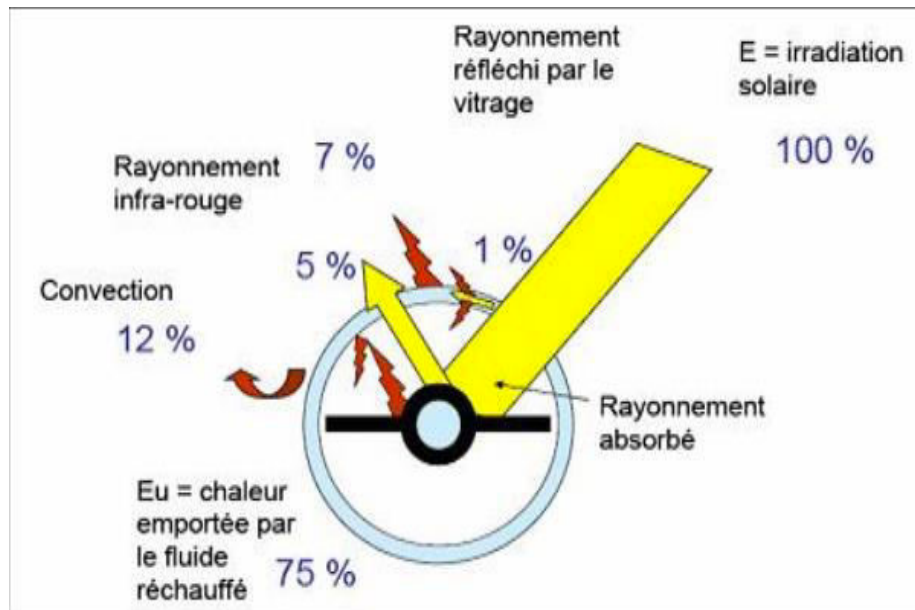


Figure II.8 : Principe de fonctionnement des capteurs à tubes sous vide [18].

- E = irradiation solaire 100%
- Rayonnement infra-rouge 5%
- Rayonnement réfléchi par le vitrage 7%
- Transfert par convection 12%
- Rayonnement absorbé par le vitrage 1%.
- E_u = chaleur emportée par le fluide chauffé 75%

II .4. 2 Les composants d'un capteur plan

Dans le fonctionnement de ces capteurs, nous retrouvons trois fonctions :

- Absorption du rayonnement solaire
- Transformation de cette énergie en chaleur
- Transmission de cette chaleur au fluide caloporteur

Un capteur plan est constitué d'une plaque noircie, généralement en métal, recouverte d'une ou plusieurs vitres ou de feuilles de plastique transparentes.

Les radiations solaires qui traversent le vitrage sont absorbées par le métal noirci qui réémet l'énergie sous forme de radiations de grande longueur d'onde. Comme ces radiations ne peuvent pas traverser la vitre, la température de la plaque noircie s'élève. On fait passer un fluide caloporteur (air ou eau) sur celle-ci (plaque), où il se réchauffe, et, tant que le soleil brille, la température du fluide quittant le collecteur est maintenue. [12]

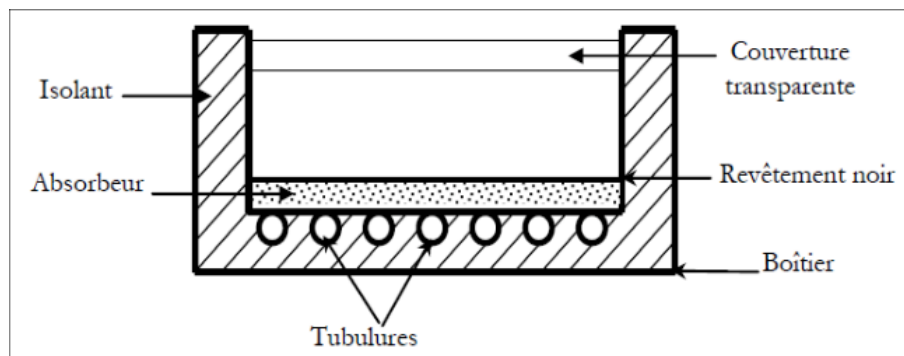


Figure II.9 : Coupe longitudinale d'un capteur solaire plan [17].

Nous décrivons brièvement les principaux matériaux utilisés actuellement pour capter, véhiculer ou retenir la chaleur solaire, en suivant le cheminement de l'énergie, depuis la couverture transparente du capteur jusqu'au stock. [12]

a- Une couverture transparente

La couverture est la surface à travers laquelle le rayonnement solaire non concentré est admis dans le capteur. On ne peut utiliser que des matériaux transparents. L'intérêt d'une couverture transparente habituelle pour le rayonnement solaire est d'autant plus grand que la température de fonctionnement du convertisseur est élevée. Cette couverture doit assurer trois fonctions essentielles:

- Recevoir le maximum du rayonnement incident sans réflexion ni diffusion importante.
- Transmettre la plus part du rayonnement reçu.
- S'opposer aux déperditions thermiques par convection et rayonnement.

Les inconvénients du verre sont sa fragilité, son poids et son prix élevé en double vitrage. L'inconvénient principal des matériaux plastiques est la dégradation de certaines de leurs propriétés avec le temps pour certains, ou le prix élevé pour d'autres. Le tableau II.1 fournit quelques indications sur ces matériaux: [17]

Chapitre II: Étude théorique d'un capteur solaire thermique

Tableau II.1: Propriétés de quelques surfaces transparentes au rayonnement solaire mais opaques au rayonnement infrarouge [21].

Matière	Réflexio n	Epaisseur (mm)	Transmittance $\lambda=0.4 \rightarrow 2.5 \mu\text{m}$	Transmittance $\lambda=2.5 \rightarrow 40 \mu\text{m}$	C _p (Kj/Kg.K)	ρ (Kg/m ³)
Verre	1.518	3.175	0.840	0.7020	0.754	2489
Fibre de verre polyester	1.540	6.350	0.870	0.076	1.465	1399
Fibre acrylique	1.490	3.175	0.900	0.020	1.465	1189
Polycarbonate	1.586	3.175	0.840	0.020	1.193	1199
Polytétraflour- oéthylène	1.343	5.080	0.960	0.0256	1.172	2480
Fluorure de polyvinylidène	1.460	1.016	0.920	0.07	1.256	1379
Polyester (mylar)	1.460	1.270	0.870	0.178	1.046	1394
Fluorure de polyvinylidène	1.413	1.016	0.930	0.230	1.256	1770
Polyéthylène	1.500	1.016	0.920	0.810	2.302	1189

b- Le fluide caloporteur

Le fluide de travail est chargé de transporter la chaleur entre deux ou plusieurs sources de température. Il est choisi en fonction de ses propriétés physiques et chimiques, il doit posséder une conductivité thermique élevée, une faible viscosité et une capacité calorifique élevée. Dans le cas des capteurs plans, on utilise de l'eau à laquelle on ajoute un antigel (généralement de l'éthylène glycol) ou bien de l'air. Par rapport à l'eau, l'air a les avantages suivants [9]:

- Pas de problème de gel l'hiver ou d'ébullition l'été.
- Pas de problème de corrosion (l'air sec).
- Toute fuite est sans conséquence.
- Il n'est pas nécessaire d'utiliser un échangeur de chaleur pour le chauffage des locaux.
- Le système à mettre en œuvre est plus simple et plus fiable.

Cependant il présente certains inconvénients, à savoir :

- L'air ne peut servir qu'au chauffage des locaux ou pour le séchage solaire.
- Le produit masse volumique - capacité calorifique, est faible ($\rho.C_p=1225 \text{ J/m}^3.K$) pour l'air contre $4,2.10^6 \text{ J/m}^3.K$ pour l'eau.

- Les conduites doivent avoir une forte section pour laisser passer un débit suffisant. [3]

c- L'absorbeur

Le rôle principal d'un absorbeur est le captage du rayonnement solaire et sa conversion en énergie calorifique. Il est généralement peint en noir pour absorber tous les rayonnements dans le spectre du visible, du l'ultraviolet et une faible quantité dans l'infrarouge. L'absorbeur est choisi selon les caractéristiques suivantes :

- Un bon coefficient d'absorption .
- Une bonne conductivité thermique .
- Une bonne résistance à la corrosion.

Le choix du matériau et le procédé de construction ont une grande influence sur la qualité d'un capteur. Du fait de leurs conductivités élevées, le cuivre, l'acier et l'aluminium sont les matériaux les plus couramment utilisés. Les caractéristiques de divers matériaux utilisés comme absorbeur sont données au tableau II.2. [5]

Tableau II.2 : Caractéristiques des matériaux utilisés comme absorbeur[5]

Matière	Conductibilité (w/m°C)	Coefficient de dilatation
Aluminium	230	2,38
Cuivre	380	1,65
Zinc	112	2,9
Acier	52	1,15
Inox	52	1,15
Plastique	0,2-0,4	7-20

Afin de diminuer les pertes par rayonnement, les absorbeurs sont généralement revêtus d'une couche sélective. Le nickel et le chrome sont les principaux métaux utilisés pour les revêtements sélectifs pour la plupart des capteurs.

Chapitre II: Étude théorique d'un capteur solaire thermique

Au tableau(II.3) sont donnés les modes de revêtement les plus souvent utilisés. [5]

Tableau II.3: Revêtements des surfaces d'absorbeur. [5]

Revêtement	Absorption	Emission
Peinture noire	0,92-0,97	0,95
Chrome noir sur cuivre (sélectif)	0,95	0,14
Chrome noir sur acier (sélectif)	0,91	0,07
Tinox (sélectif)	0,95	0,05

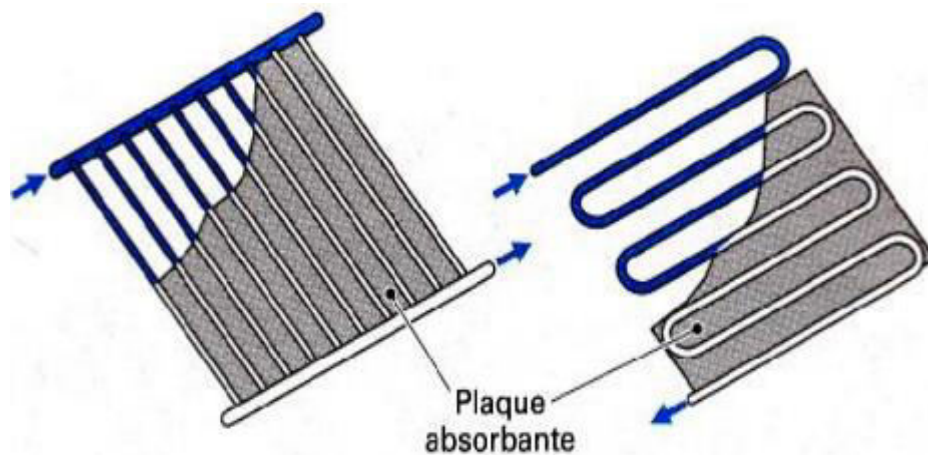


Figure II.10: Absorbeurs sous forme d'échelle et de serpentins [23].

d- L'isolation thermique

L'absorbeur doit transmettre l'énergie captée au fluide caloporteur en évitant les pertes thermiques par conduction, convection et par rayonnement, des différentes parties périphériques vers l'extérieur. Les solutions adaptées sont les suivantes :

1- Partie avant de l'absorbeur

La lame d'air située entre la vitre et l'absorbeur se comporte comme un isolant vis-à-vis de la transmission de chaleur par conduction. Cependant, si l'épaisseur de cette lame est trop grande, une convection naturelle intervient, d'où une perte d'énergie. Pour les températures usuelles de fonctionnement du capteur plan, l'épaisseur de la lame d'air est de 2.5 cm. En plaçant deux vitres, on limite les pertes dues à la réémission ainsi que les pertes par conduction et par convection [9].

2- Parties arrière et latérale

Afin de limiter les pertes thermiques à la périphérie du capteur, on peut placer une ou plusieurs couches d'isolant qui doit résister et ne pas dégazer aux hautes températures, sinon, il faut s'attendre à voir apparaître un dépôt sur la face intérieure de la couverture. En plus d'utiliser un isolant pour minimiser les pertes thermiques on peut augmenter la résistance de contact entre la plaque l'isolant et le coffre en évitant de presser ces surfaces les unes contre les autres car dans le cas d'une forte rugosité, il peut exister entre les deux faces en contact un film d'air qui empêche la chaleur de passer facilement par conduction [9].

Tableau II.4 : Propriétés thermiques de quelques matériaux isolants [21].

Matériau	Conductivité thermique (w/m.k)	Masse volumique (kg/m ³)	Chaleur massique (j/kg.k)	Diffusivité (10 ⁻⁷ m ² /s)
Air (à 20° c)	0.025	1.2	1003	208
Mousse de Polyuréthane	0.029	30	1600	6
Laine de verre	0.036	40	840	10.7
Polystyrène expansé	0.040	20	1500	13.3
Papier journal comprimé	0.105	130	1340	6
Bois de pin	0.118	500	1210	1.95
Plâtre	0.35	800	800	5.5

e- Le boîtier

Le boîtier constitue l'enveloppe arrière et latérale de l'appareil, il est constitué de matériau choisis, tels que les métaux en feuille ou profilé, matériaux en plastique armé et même le contreplaqué.

Les métaux les plus utilisés sont l'acier galvanisé ou galvanisé pré laqué et les alliages d'aluminium. On rencontre deux structures de boîtier :

1- Le boîtier simple

Il est constitué d'une seule épaisseur de matériau en forme de bac dans lequel sont montés l'isolation et l'absorbeur.

2- Le boîtier double

Possède une structure en caisson qui lui confère une plus grande rigidité et permet une meilleure intégration de l'isolation [9].

II .4. 3 Principe de fonctionnement d'un capteur Plan

Le rôle d'un capteur solaire thermique est de transformer le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie calorifique utilisable, le plus souvent par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (eau, air, ...).

Le schéma de principe d'un capteur solaire plan est donné sur la figure II.11. [10].

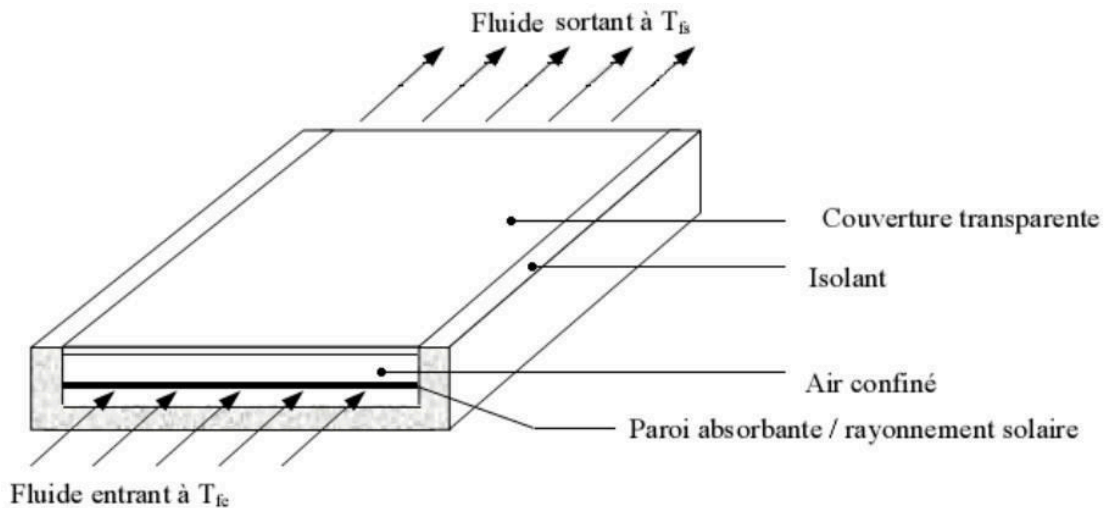


Figure II.11: Schéma de principe d'un capteur solaire plan [10].

La paroi absorbante s'échauffe sous l'effet de l'absorption du rayonnement solaire incident. Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température $T_{fs} - T_{fe}$ à la traversée du capteur. [10]

II .5 Définition des différentes caractéristiques des capteurs solaires

La puissance d'un capteur dépend du mode de fonctionnement. Plus la différence entre la température intérieure du capteur et la température extérieure est élevée, plus ses déperditions thermiques sont importantes. Le rendement diminue également [21].

Les capteurs sont caractérisés par :

- Leurs pertes optiques:
- Leurs pertes thermiques

Ces pertes permettent par ailleurs de calculer le rendement global du capteur, pour une situation de fonctionnement donnée.

✓ Les pertes optiques

En premier lieu, les capteurs sont caractérisés par leur rendement optique (coefficient β). Le rendement optique du capteur représente le pourcentage de la puissance radiative du soleil qui sera réellement absorbée par le capteur.

✓ Les pertes thermiques

Lorsque le fluide caloporteur qui circule dans le capteur s'échauffe, une partie de la chaleur reçue est perdue par conduction et par convection vers l'extérieur. Ces pertes sont caractérisées par un coefficient k exprimé en $[\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}]$.

$$P_{th} = K \times S \times \Delta T \quad (\text{II.1})[21]$$

k : Coefficient de déperdition du capteur ($\text{W}/\text{m}^2/^\circ\text{C}$).

Tableau II.5: la valeur du facteur k pour les différents capteurs solaires plans [21].

Type de capteur	Valeur du coefficient k
Capteur sans vitre	Entre 20 et 25
Capteur vitré simple	Entre 4 et 6
Capteur vitré sélectif	Entre 3 et 5
Capteur sous vide	Entre 1 et 3

II.6 Le rendement global

Le rendement global d'un capteur se calcule à partir des rendements optiques et thermiques dans des conditions données de fonctionnement du capteur.

C'est le rapport entre l'énergie récupérée et l'énergie solaire reçue par le capteur pendant le même intervalle de temps, dans des conditions données de fonctionnement stable. La méthode Française du rendement global (norme NF P50-501) [21]:

L'énergie utile est donc égale à la partie de l'énergie incidente traversant le vitrage moins les déperditions thermiques (proportionnelles à l'écart de température entre le capteur et l'ambiance).

$$\eta_g = B - \frac{k \times (T_{mf} - T_{ext})}{G} \quad (\text{II.2})[21]$$

Avec :

- k : coefficient de pertes thermiques en $[\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}]$.
- B : le rendement optique.
- T_{mf} : température moyenne du fluide caloporteur en $[\text{°C}]$.
- T_{ext} : température extérieure en $[\text{°C}]$.

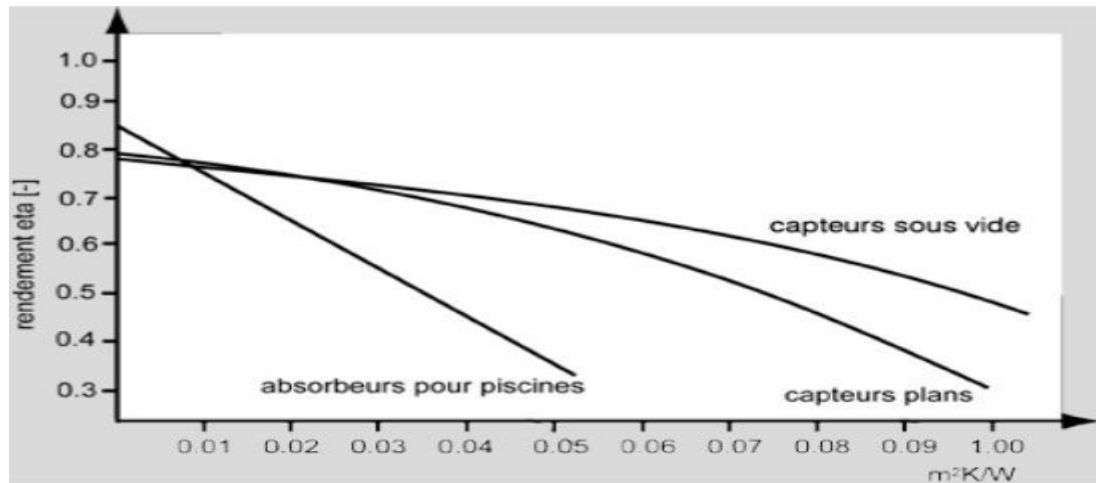


Figure II.12: Courbes caractéristiques de rendement de différents types de capteurs [24].

II.7 Paramètres et caractéristiques de fonctionnement des capteurs solaires

Elles peuvent être classées en deux catégories : paramètres externes et paramètres internes :

II.7.1 Paramètres externes: les paramètres externes sont représentés par:

- Paramètre d'ensoleillement : éclairement énergétique du au rayonnement global a la position du soleil et a La durée d'insolation.
- la température extérieure sèche.
- la vitesse du vent sur le capteur.

II.7.2 Paramètres internes: les paramètres internes sont représentés par :

- paramètre de position : l'inclinaison et l'orientation
- dimensions de capteur: épaisseur, longueur, la largeur et la surface réceptrice.
- la section de passage du fluide.

II.7.3 Paramètres de fonctionnements : les paramètres de fonctionnement sont représentés par:

- la température d'entrée du fluide dans le capteur.
- les températures des différentes parties du capteur.
- le débit du fluide caloporteur.

Ces caractéristiques sont très importantes car elles permettent, en tenant compte du coût, d'effectuer un choix parmi les différents types de capteur, dont entre autres : la température de sortie du fluide et la puissance thermique utile du capteur. [21]

II.8 Les différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire

Un capteur solaire met en jeu simultanément les trois modes de transfert thermique, conduction, convection et rayonnement (figure II.13). [25]

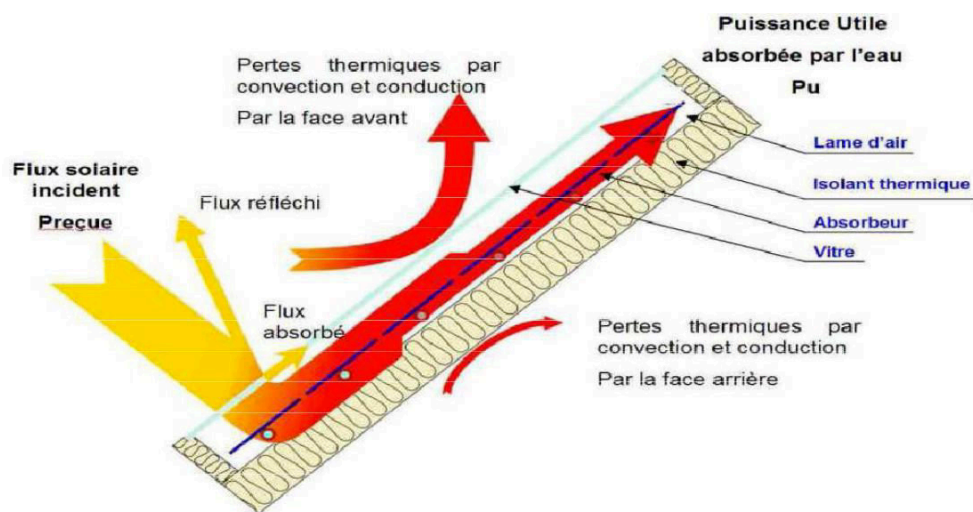


Figure II.13: Les différents échanges thermiques dans un capteur plan [25].

II.8.1. La conduction

La conduction est le mode de transfert de chaleur caractérisé par la propagation de l'énergie thermique dans un milieu matériel sans déplacement de la matière. La loi correspondant à ce processus de diffusion thermique est la loi de Fourier donnée par la relation [25]

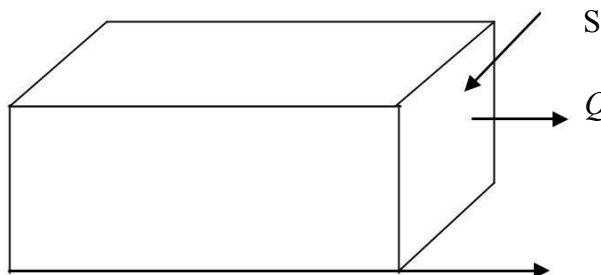


Figure II.14: Schéma du transfert de chaleur par conduction[21]

$$Q = -\lambda S \cdot \text{grad}T \quad (\text{II.3})[21]$$

Q : flux de chaleur (W).

λ : coefficient de conductivité thermique (W/m.°C).

S : surface d'échange (m²)..

Dans le capteur plan les échanges par conduction existent principalement entre :

- Les faces supérieures et inférieures de la vitre.
- Les faces supérieures et inférieures de l'isolant.

- L'absorbeur et l'isolant.

II.8.2. La convection

La convection est un transport d'énergie dû à des mouvements macroscopiques. On distingue deux types de convection :

a. La convection forcée : le mouvement du milieu est engendré par un dispositif externe (le vent, une pompe, un ventilateur...etc.)

b. La convection naturelle : le mouvement du fluide est engendré par les variations de densité causées par des variations de température au sein du fluide, tel est le cas de la thermocirculation. Le transfert thermique convectif est régi par la loi de Newton:

$$Q = h.S.(T_p - T_f) \quad (\text{II.4})[21]$$

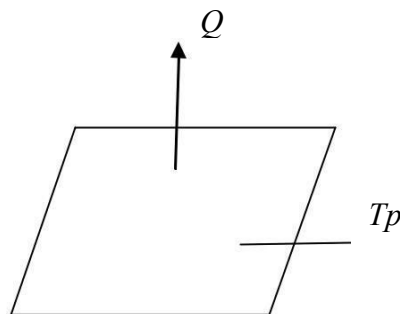


Figure II.15 : Schéma du transfert de chaleur par convection[9]

Q : le flux échangé par convection (W).

h : coefficient de convection ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$).

S : surface de la paroi solide en contact avec le fluide (m^2).

T_p : température de la paroi solide ($^\circ\text{C}$).

T_f : température du fluide ($^\circ\text{C}$).

• Régime d'écoulement

Du fait que le transfert se fait dans un milieu fluide il est nécessaire de rappeler quelque notion de mécanique de fluides et surtout les deux régimes d'écoulements: [30]

• Régime laminaire

L'écoulement s'effectue en lames (couches) superposées pratiquement indépendantes ; les échanges qui s'effectuent entre eux sont d'origine moléculaire. [26]

• Régime turbulent

L'écoulement n'est pas unidimensionnel ; les particules fluides sont en mouvement aléatoire, dans ce cas la diffusion transversale est très importante. [26]

Dans un capteur plan, l'échange par convection s'effectue entre :

Chapitre II: Étude théorique d'un capteur solaire thermique

- La vitre et l'ambiance, par convection libre ou forcée par le vent.
- La vitre et la plaque de l'absorbeur par convection libre.
- Le tube et le fluide par convection libre.
- Entre le fluide et l'isolant par convection libre.
- Entre l'isolant et l'ambiance par convection libre ou forcée par le vent.

A- Calcule le coefficient d'échange par convection

- En convection forcée

En l'absence de convection naturelle, le coefficient d'échange h_c par convection est indépendant de la différence de la température de la paroi et le fluide mais il dépend des 6 grandeurs suivantes [9]:

U_m vitesse moyenne du fluide

ρ masse volumique du fluide

C_p chaleur spécifique du fluide

μ viscosité thermique du fluide

λ conductivité thermique du fluide

D dimension caractéristique de la surface d'échange

A partir de ces grandeurs, on définit les nombres sans dimension suivants [8]:

$$Nu = h_c \frac{D}{\lambda} \quad \text{nombre de Nusselt} \quad (\text{II.5})[9]$$

$$Re = \frac{\rho U_m \cdot D}{\mu} \quad \text{nombre de Reynolds} \quad (\text{II.6})[9]$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\rho} \quad \text{nombre de Prandtl} \quad (\text{II.7})[9]$$

$$G_r = \frac{\beta \cdot g \cdot \Delta T \cdot \rho^2 \cdot L^3}{\mu^2} \quad \text{nombre de Grashof} \quad (\text{II.8})[9]$$

Les travaux expérimentaux étudiant le transfert de chaleur par convection dans une situation Donnée fournissent leurs résultats sous forme de corrélation mathématiques $Nu=f(Re,Pr)$ qui permettent de calculer h_c par :

$$h_c = Nu \frac{D}{\lambda} \quad (\text{II.9})[9]$$

Re : le nombre de Reynolds caractérise le régime d'écoulement du fluide

Chapitre II: Étude théorique d'un capteur solaire thermique

Pr : le nombre de Prandtl caractérise l'échange thermique entre le fluide et la paroi.

Nu : le nombre de Nusselt caractérise l'échange thermique entre le fluide et le paroi.

- En convection naturelle

Dans la convection naturelle, le mouvement du fluide est dû aux variations de la masse volumique du fluide provenant des échanges de chaleur entre le fluide et la paroi. Le fluide est mis en mouvement sous l'effet des forces d'Archimède car sa masse volumique est fonction de sa température[9].

La convection forcée est négligeable si:

$$Gr/Pr^2 > 100$$

$$Nu = C (Gr.Pr)^n \quad (II.10)[9]$$

Convection laminaire $Gr.Pr < 109 \Rightarrow n=1/4$

Convection turbulente $Gr.Pr > 109 \Rightarrow n=1/3$

II.8.3. Le rayonnement

Le transfert de chaleur par rayonnement a lieu lorsque de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques est émise par une surface et absorbée par une autre. Cet échange peut avoir lieu lorsque les corps sont séparés par le vide ou par n'importe quel milieu intermédiaire suffisamment transparent pour les ondes électromagnétiques. La loi fondamentale du rayonnement est celle de Stefan-Boltzmann [25]:

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma T^4 \quad (II.11)[25]$$

Q : densité de flux de chaleur émis par le corps.

ε : émissivité thermique du matériau.

σ : constante de Stefan-Boltzmann évaluée à $5,6 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^{-4}$

T : température absolue du corps.

Dans un capteur solaire plan le transfert par rayonnement s'effectue entre :

- La vitre et le ciel.
- La vitre et la plaque chauffante.
- L'isolant et le sol.

II.9 rappel de l'effet thermosiphon

Soit un circuit fermé parcouru par un fluide de température T_1 dans une branche et T_2 dans l'autre ($T_1 > T_2$) ; h est la distance entre les points A et B (voir figure II.13).

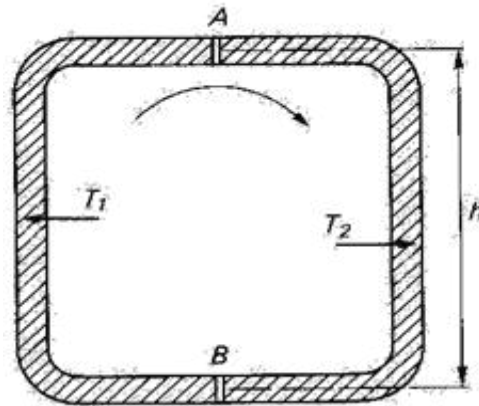


Figure II.16: Effet thermosiphon [26].

On montre très simplement que le fluide se met en mouvement des particules les plus chaudes vers celles les plus froides (dans le sens montré sur la figure) ; c'est la circulation dite par gravité ou par thermosiphon.

La charge ΔP créée par la différence de température des deux branches est donnée par :

$$\Delta P = h(\rho T_2 - \rho T_1) \quad \text{(II.12)[26]}$$

Avec ρ : masse volumique du fluide.

La vitesse de circulation du fluide est obtenue par l'écriture que ΔP est la somme des pertes de charges linéaires et locales dans le circuit considéré.

Un système comprenant un capteur solaire et un réservoir surélevé par rapport au capteur fonctionne s'apparente au schéma précédent. (Voir figure II.14).

Plus la température départ capteurs sera élevée, plus la différence de masse volumique le sera aussi ce qui augmentera la pression hydro-motrice et donc le débit. Le volume d'échange thermique au niveau du ballon étant proportionnel à l'écart moyen des températures entre la température moyenne du fluide caloporteur et la température moyenne de l'eau chaude sanitaire, ce volume d'échange augmentera avec le débit car l'augmentation de ce dernier va induire une chute de température plus faible et donc augmenter l'écart moyen. [26]

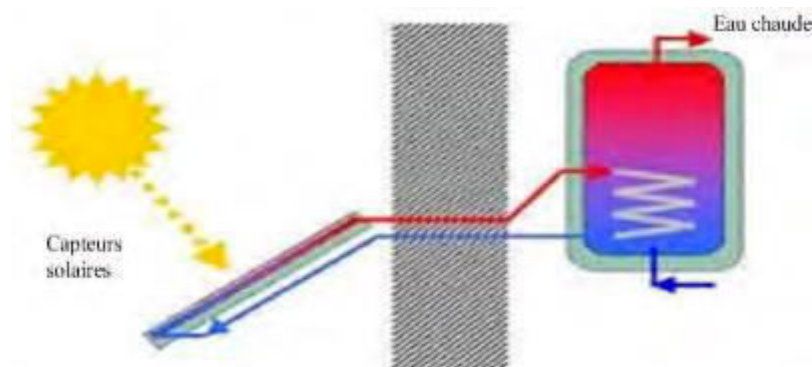


Figure II.17 : Système à thermosiphon[27].

II.9.1 principe du thermosiphon

Thermosiphon veut dire que la circulation de la chaleur passe des capteurs au ballon naturellement sans pompe ou autre dispositif, grâce à la différence de température. Pour ce faire, le ballon doit impérativement être placé plus haut que les capteurs [28].

II.9.2 les chauffe-eau thermosiphon monoblocs

Les systèmes monobloc possèdent le ballon de stockage directement à côté du ou des panneaux. Ils fonctionnent en thermosiphon (donc pas de pompe de circulation). C'est une solution peu performante puisque le ballon est à l'extérieur et les pertes thermiques du stockage sont donc plus importantes qu'avec un ballon situé à l'intérieur du bâtiment[22].

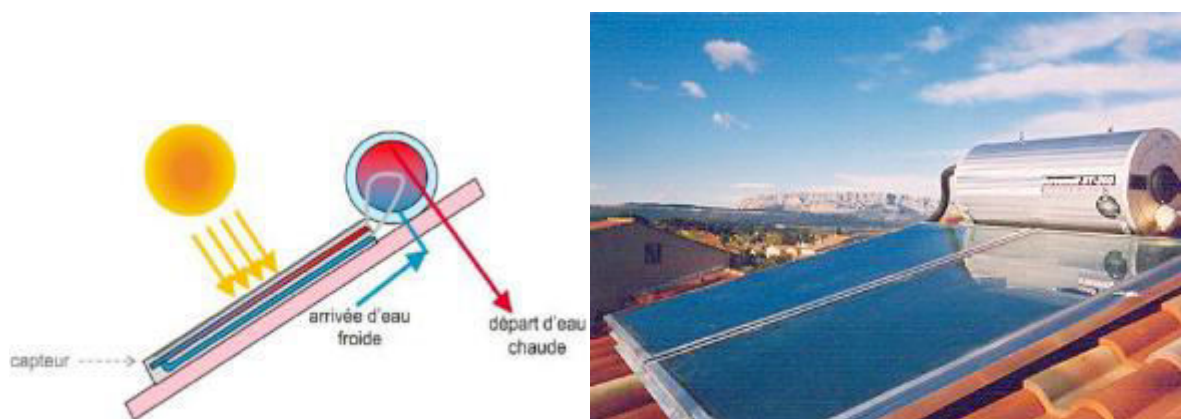


Figure II.18: chauffe-eau solaire monobloc [27].

II.9.3 les chauffe-eau thermosiphon à éléments séparés

Dans un système à éléments séparés, le ballon de stockage est situé à l'intérieur du bâtiment. Cela permet notamment de limiter les pertes par stockage. Cela diminue les contraintes architecturales supplémentaires de l'installation d'un ballon sur le toit [22].



Figure II.19: chauffe-eau thermosiphon à éléments séparés [11].

a- Avantages

- ✓ Système monobloc (capteurs et ballon intégrés sur un même châssis rigide)
- ✓ Pose facile, coût réduit
- ✓ Système autorégulé
- ✓ Continuité de la production d'ECS solaire en cas de coupure d'alimentation électrique
- ✓ Fiabilité

b- Inconvénients

- ✓ Inesthétique
- ✓ N'est pas adapté aux régions froides (surtout le fonctionnement en eau)
- ✓ Stockage soumis directement aux actions extérieures
- ✓ Poids important (ne convient pas à la pose en toiture)
- ✓ Limitation de la température de stockage à l'aide de soupapes à commande thermique [26].

II .10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une étude descriptive sur le capteur solaire, ses composants, les caractéristiques et les paramètres de fonctionnement influant sur leur efficacité et Les différents échanges thermiques dans un capteur plan(conduction, convection et rayonnement)etc. Et Les chauffe-eau solaires thermosiphon et leur type d'un installation.

Chapitre III

III.1 introduction

Le rôle d'un capteur solaire thermique est de transformer le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie calorifique utilisable, le plus souvent par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (eau, air,.....) La paroi absorbante s'échauffe sous l'effet de l'absorption du rayonnement solaire incident, Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température $T_{fs} - T_{fe}$ à la traversée du capteur Dans ce qui suit on regroupera les équations mathématiques gouvernant le fonctionnement du capteur à air après le bilan thermique de celle-ci [19].

La puissance reçue par le capteur solaire plan est apportée essentiellement par le rayonnement solaire incident qui vient frapper la surface vitré.

La puissance perdue est emportée par l'eau qui circule au niveau de l'absorbeur et cédée à l'environnement ambiant par des pertes de part et d'autre du capteur (un transfert modélisé par un échange conducto-convectif). Ces échanges sont engendrés par des bilans thermiques au niveau de chaque constituant [26]:

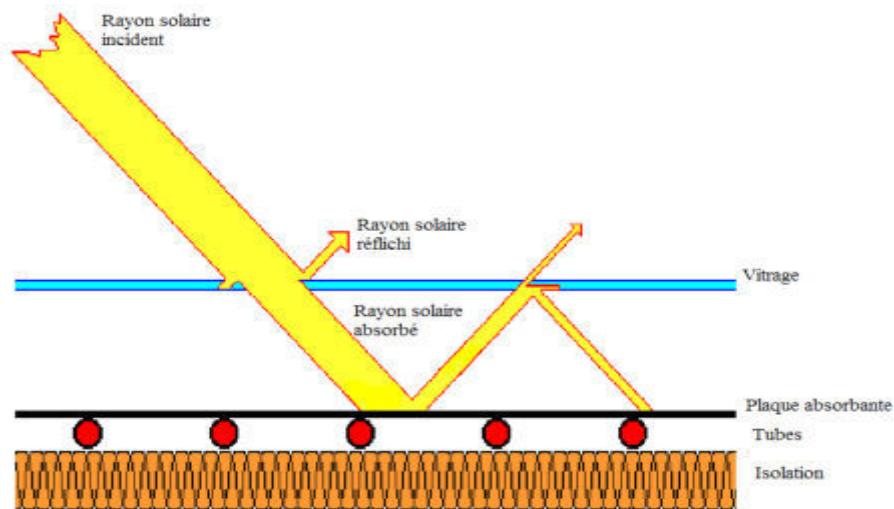


Figure III.1: Schéma de principe d'un capteur solaire thermique [28]

Dans ce qui suit, nous exprimerons les puissances absorbées par les composants d'un capteur solaire plan à simple vitrage pour dresser le bilan énergétique de ce système en régimes transitoire.

III.2 Puissances absorbées par un capteur solaire plan

1. La puissance absorbée par la vitre

$$Q_v = \alpha_v \cdot G \cdot S \quad (\text{III.1})$$

Où :

Q_v : puissance absorbée par la vitre.

α_v : absorptivité de la vitre.

S : surface de la vitre.

2. Puissance absorbée par l'absorbeur

$$Q_{abs} = \alpha_p \cdot \tau_v \cdot G \cdot S \quad (III.2)$$

Où :

Q_{abs} : puissance absorbée par l'absorbeur.

S : surface de l'absorbeur.

α_p : absorptivité de l'absorbeur.

τ_v : transmissivité de la vitre.

III.3 Bilan thermique global du capteur plan en régime transitoire

Les équations qui caractérisent le fonctionnement d'un capteur solaire en régimes transitoire sont données respectivement par:

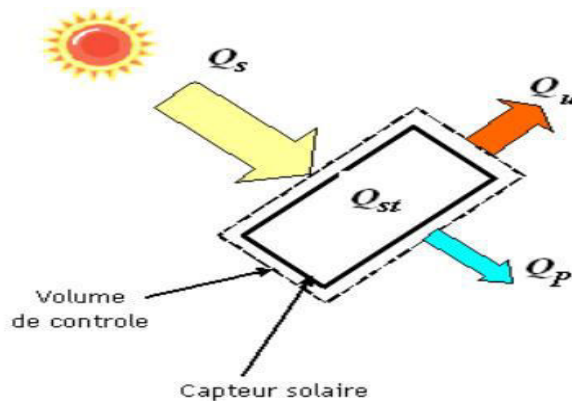


Figure III.2: Schéma représentatif du bilan thermique d'un capteur solaire [2]

$$Q_{ab} = Q_u + Q_p + Q_{st} \quad (III.3)$$

Où :

Q_{ab} : puissance incidente du rayonnement absorbé par unité de surface.

Q_u : pertes thermiques.

Q_p : puissance utile récupérée par le fluide caloporteur.

Q_{st} : puissance stockée sous forme de chaleur dans les différents éléments du capteur lorsque le régime est transitoire.

Nous nous proposons dans ce qui suit d'établir les bilans thermiques du capteur solaire en régimes transitoire. Pour cela nous considérerons que chaque partie du capteur constitue un nœud, sur lequel nous établirons un bilan thermique (figure III.3). [2]

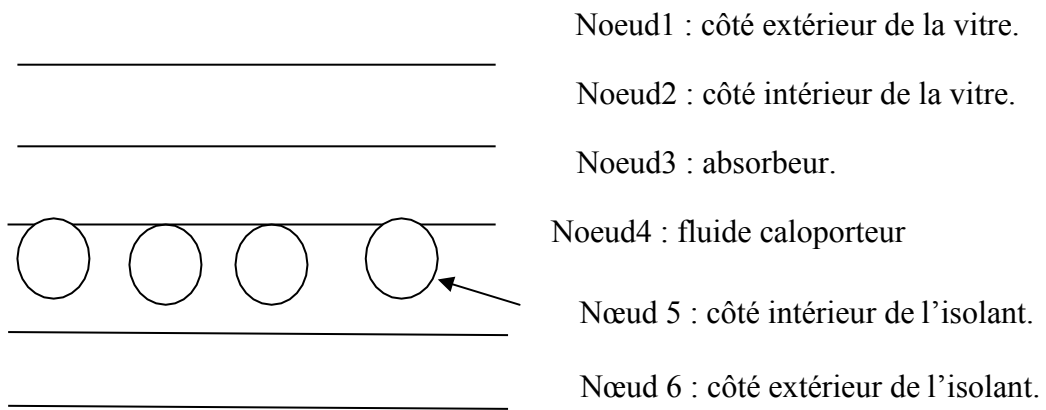


Figure III.3: Schématisation des différents nœuds du capteur [3]

Soit une section quelconque du système à l'instant t , soit i un des milieux représentés dans cette section, m_i sa masse, cp_i sa chaleur spécifique et T_i sa température.

Le bilan au nœud i donne :

$$m_i C_{p_i} \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1}^n Q_{ij} \quad (\text{III.4})[3]$$

1- Hypothèses

Il est nécessaire d'avancer certaines hypothèses afin d'avoir une simulation approchée du système étudié en régime transitoire :

- * Le soleil est assimilé à un corps noir.
- * Le régime d'écoulement est permanent.
- * Les propriétés des matériaux sont supposées constantes.
- * La température du sol est prise égale à la température de l'ambiance.
- * Le vent est supposé soufflant parallèlement aux faces du système.
- * Les surfaces d'échange de chaleur sont supposées grises et diffusantes.
- * Le rayonnement diffus atmosphérique est supposé isotrope.
- * La température de la plaque absorbante est supposée égale à celle des tubes.
- * Les différents milieux solides ont une température uniforme dans un plan normal au sens de l'écoulement.
- * Les flux de chaleur sont unidimensionnels.
- * La couverture transparente est propre.
- * Les parois latérales sont supposées à des températures constantes.
- * Le fluide caloporteur utilisé est de l'eau pure.

2- Equations de transfert thermique en régime transitoire

Le bilan énergétique général est donnée par :

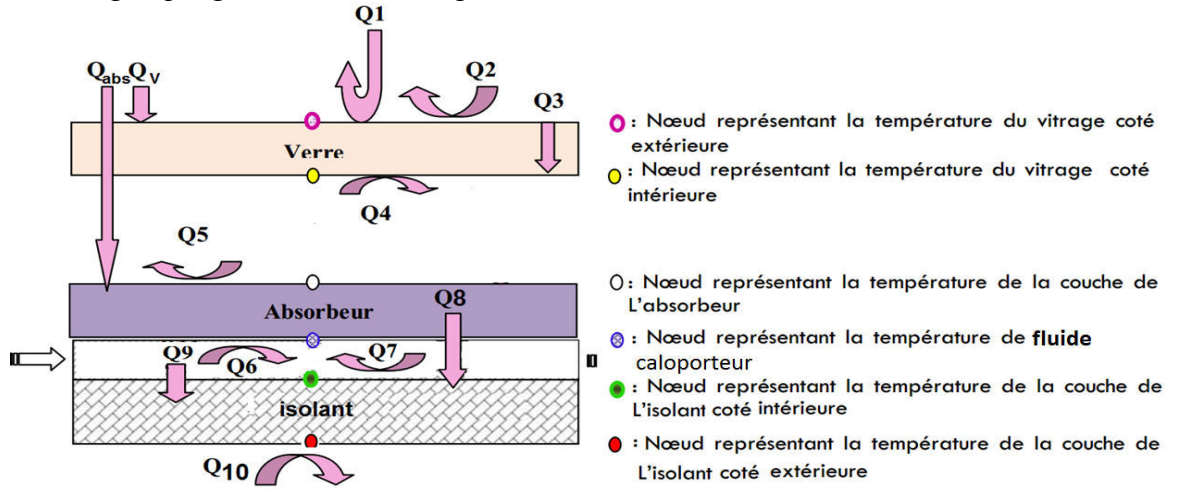


Figure III.4: Mécanisme des échanges de chaleur détaillé[30]

- Au niveau du vitrage (coté extérieur):

la surface haute de la couche du verre, l'énergie reçue par la vitre étant celle des irradiations solaires plus une quantité de chaleur transmise à partir du ciel (à une certaine longueur d'onde) par rayonnement et à partir de l'air ambiant par convection, on a aussi, l'échange par convection à partir de la couche d'air et le vitrage: [30]

$$M_V C_V \frac{dT_{V_{ext}}}{dt} = Q_V + Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (III.5)$$

$$\rho_V V_V C_V \frac{dT_{V_{ext}}}{dt} = \alpha_V S G - h_{ciel}^r S (T_{ciel} - T_{V_{ext}}) - h_{am}^c S (T_{am} - T_{V_{ext}}) - U_V S (T_{V_{ext}} - T_{V_{int}}) \quad (III.6)$$

- Au niveau du vitrage (coté lame d'air):

$$M_V C_V \frac{dT_{V_{int}}}{dt} = Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad (III.7)$$

$$\rho_V V_V C_V \frac{dT_{V_{int}}}{dt} = U_V S (T_{V_{ext}} - T_{V_{int}}) - h_{abs}^r S (T_{V_{int}} - T_{abs}) + h_{abs}^c S (T_{V_{int}} - T_{abs}) \quad (III.8)$$

- Au niveau de l'absorbeur:

$$M_{abs} C_{abs} \frac{dT_{abs}}{dt} = Q_{abs} + Q_4 + Q_5 - Q_6 - Q_8 \quad (III.9)$$

$$\rho_{abs} V_{abs} C_{abs} \frac{dT_{abs}}{dt} = \alpha_{abs} \tau_V S G - S (h_{V_{abs}}^r + h_{V_{abs}}^c) (T_{V_{int}} - T_{abs}) - h_f^c S_f (T_f - T_{abs}) - U_{abs_{isol}} S (T_{abs} - T_{isol}) \quad (III.10)$$

- **Au niveau du fluide caloporteur**

$$M_f C_f \frac{dT_f}{dt} = Q_6 - Q_7 \quad (\text{III.11})$$

$$\rho_f V_f C_f \frac{dT_f}{dt} = h_f^c S_f (T_f - T_{abs}) - h_f^c S_f (T_f - T_{isol}) \quad (\text{III.12})$$

- **Au niveau la face intérieure de l'isolant**

$$M_{isol} C_{isol} \frac{dT_{isol\ int}}{dt} = Q_7 + Q_8 - Q_9 \quad (\text{III.13})$$

$$\rho_{isol} V_{isol} C_{isol} \frac{dT_{isol\ int}}{dt} = U_{abs_isol} S (T_{abs} - T_{isol}) + h_f^c S_f (T_f - T_{isol}) - U_{isol} S (T_{isol\ int} - T_{isol\ ext}) \quad (\text{III.14})$$

- **Au niveau la face extérieure de l'isolant**

$$M_{isol} C_{isol} \frac{dT_{isol\ ext}}{dt} = Q_9 - Q_{10} \quad (\text{III.15})$$

$$\rho_{isol} V_{isol} C_{isol} \frac{dT_{isol\ ext}}{dt} = U_{isol} S (T_{isol\ int} - T_{isol\ ext}) - h_{isol_am}^c S (T_{isol} - T_{am}) \quad (\text{III.16})$$

3- Expressions des coefficients de transfert

L'utilisation de la notion de coefficient d'échange radiatif et convectif est fort pratique, parce qu'elle simplifie la formulation mathématique des équations de transfert thermique dans le capteur.

En effet, Les échanges s'effectuent selon les trois modes connus ; convectifs, radiatif et par conduction. Il faut considérer l'architecture et le mode d'écoulement du fluide dans le capteur pour dresser un inventaire complet des transferts qui s'y manifestent[30]

- **Coefficient de transfert radiatif entre la vitre et le ciel**

$$h_{ciel}^r = \varepsilon_v \sigma (T_{ciel} - T_2) (T_2^2 + T_{ciel}^2) (T_{ciel} + T_2) \quad (\text{III.17})$$

Par la relation de SWINBANK:

$$T_{ciel} = 0.0552 T_{am}^{1.5} \quad (\text{III.18})$$

T_{ciel} : température du ciel (°K).

- **Coefficient de transfert radiatif entre la vitre et la plaque absorbante**

$$h_{V_abs}^r = \frac{\sigma (T_{V\ int} + T_{abs}) (T_{V\ int}^2 + T_{abs}^2)}{\frac{1}{\varepsilon_{abs}} + \frac{1}{\varepsilon_v} - 1} \quad (\text{III.19})$$

$\varepsilon_{abs}, \varepsilon_v$: sont respectivement les émissivités de l'absorbeur et du vitrage.

σ : constante de Stéphane Boltzmann ; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ w/m}^2 \cdot \text{°K}^4$.

- **Coefficient de transfert convectif entre la vitre et l'air ambiant**

D'après la relation de **HOTTEL and WOERTZ**:

$$h_{v_am}^c = 5.67 + 3.86V_{vent} \quad (III.20)$$

V_{vent} : vitesse du vent (m/s).

- **Coefficient de transfert convectif entre la vitre et la plaque absorbante**

$$h_{v_abs}^c = Nu \frac{\lambda_{air}}{e_{air}} \quad (III.21)$$

λ_{air} : conductivité thermique de l'air (W/ (°K m)).

e_{air} : épaisseur de la lame d'air séparant la vitre de la plaque absorbante (m).

D'après la relation de **GLOBE and DROPKIN (1959)**

$$Nu = 0.069Ra^{1/3} Pr^{0.074} \quad (III.22)$$

Pr: nombre de Prandtl.

Ra: Le nombre de Rayleigh.

La formule de **Hollands and al (1976)**

$$Nu = 1 + 1.44 \left(1 - \frac{1708}{Ra \cos \beta} \right) \left(1 - \frac{1708(1.8 \sin \beta)^{1.6}}{Ra \cos \beta} \right) + \left(\frac{(Ra \cos \beta)^{0.66}}{5830} - 1 \right) \quad (III.23)$$

β : angle d'inclinaison du capteur.

Dans cette étude, on applique la formule de **GLOBE and DROPKIN**.

- **Coefficient de transfert convectif de fluide**

$$h_f^c = \frac{\lambda_{eau} Nu}{D_i} \quad (III.24)$$

λ_{eau} : conductivité thermique de l'eau (W m⁻¹ °K⁻¹).

D_i : diamètre du tube intérieur (m).

$$Re = \frac{\rho V . D_H}{\mu} \quad (III.25)$$

μ : viscosité dynamique de l'eau.

V: vitesse moyenne du fluide (m/s).

D_H : diamètre hydraulique du tube.

$$D_H = \frac{4S}{P} \quad (III.26)$$

Pour $Re < 2200$:

$$Nu = 3.66 \quad (III.27)$$

Pour $10^4 \leq Re \leq 2.10^5$

Formule de COLBURN:

$$Nu = 0.023R_e^{0.8}P_r^{\frac{1}{3}} \quad (III.28)$$

- coefficient de pertes thermiques du vitrage

$$U_v = \frac{\lambda_v}{e_v} \quad (III.29)$$

- coefficient de pertes thermiques vers l'arrière du capteur

$$U_{isol} = \frac{\lambda_{isol}}{e_{isol}} \quad (III.30)$$

- Coefficient de transfert conductif entre la plaque absorbante et l'isolant

$$U_{abs_isol} = \frac{T_{abs} - T_{isol\ int}}{\frac{e_{abs}}{S \lambda_{isol}} + \frac{e_{isol}}{S \lambda_{abs}}} \quad (III.31)$$

$T_{isol\ int}$: température face intérieure de l'isolant (°K).

T_{abs} : température de la plaque absorbante (°K).

λ_{isol} : conductivité thermique de l'isolant (laine de roche). ($W\ m^{-1}\ ^\circ K^{-1}$).

λ_{abs} : conductivité thermique de l'absorbeur ($W\ m^{-1}\ ^\circ K^{-1}$).

e_{abs} : épaisseur de l'absorbeur (m).

e_{isol} : épaisseur de l'isolant(m).

- Coefficient de transfert convectif entre l'isolant et l'air ambiant

$$h_{isol_am}^c = h_v^c_{am} = 5.67 + 3.86V_{vent} \quad (III.32)$$

III.4 Perte globale d'énergie

Les pertes thermiques sont dues à la différence de température entre l'absorbeur et le milieu ambiant. Elles se manifestent selon les trois modes de transfert de chaleur. Elles se divisent en trois catégories: les pertes vers l'avant, les pertes vers l'arrière et les pertes latérales

[9] On définit:

R 1 : résistance thermique entre le milieu ambiant et la vitre.

R 2 : résistance thermique entre la vitre et l'absorbeur.

R 3 : résistance thermique entre l'absorbeur et l'isolant.

R 4 : résistance thermique entre l'isolant et le milieu ambiant.

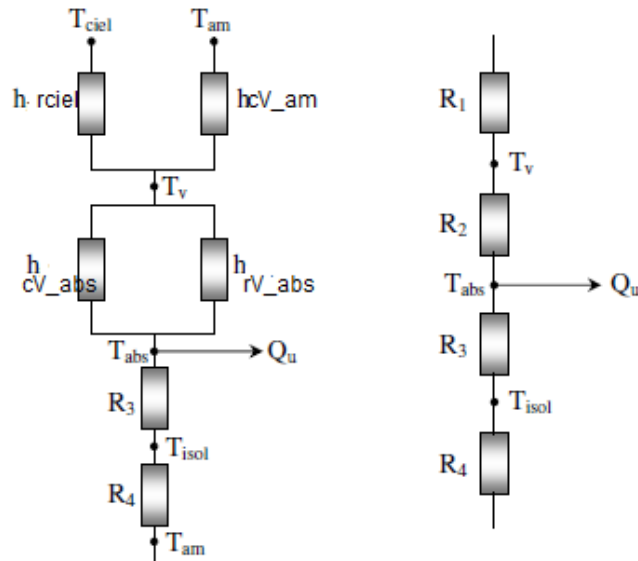


Figure III.5 : Circuit électrique équivalent relative à un capteur solaire plan [4].

a- Coefficient de pertes thermiques vers l'avant du capteur

Le coefficient de pertes thermiques global vers l'avant du capteur sera donné par la relation suivante:

$$U_{av} = \frac{1}{R_1 + R_2} = \frac{1}{\frac{1}{h_{rciel} + h_{V_am}^c} + \frac{1}{h_{V_abs}^r + h_{V_abs}^c}} \quad (III.33)$$

b- Coefficient de pertes thermiques vers l'arrière du capteur

Ce coefficient est peu important que celui d'avant, vue le capteur est très bien isolé à l'arrière. L'expression évaluant ce coefficient est donné par:

$$U_{ar} = \frac{1}{\frac{e_{isol}}{\lambda_{isol}} + \frac{1}{h_{isol_am}^c}} = \frac{1}{R_3 + R_4} \quad (III.34)$$

λ_{isol} : coefficient de conductivité thermique de l'isolant (W/ (°K m)).

e_{isol} : épaisseur de l'isolant (m).

Le coefficient de pertes thermiques global vers l'extérieur est la somme des deux coefficients.[31]

$$U_T = U_{av} + U_{ar} \quad (III.35)$$

III.5 Rendement instantané du capteur solaire

L'analyse faite dans ce domaine par **Hottel, Willier, Wortz et Bliss** permet d'aboutir à une équation unique donnant le rendement instantané du capteur que l'on définit par le rapport suivant [31]:

$$\text{Puissance de sortie} = \text{Puissance captée} - \text{Pertes} \quad (\text{III.36})$$

$$\eta = \frac{\text{la puissance thermique utile par m}^2 \text{ du capteur}}{\text{flux solaire incident sur le plan du capteur}} \quad (\text{III.37})$$

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c G} = \frac{A_c [(\alpha\tau)_{\text{eff}} G - U_T (T_{\text{abs}} - T_{\text{am}})]}{A_c G} \quad (\text{III.38})$$

Q_u : puissance utile récupérée par le fluide caloporteur (W).

$\alpha\tau_{\text{eff}}$: sont respectivement coefficient d'absorption de l'absorbeur et transparence de vitrage.

III.6 Principe de simulation en régime transitoire

En régime transitoire, on va utiliser une simulation « pas à pas », qui rend compte de l'évolution des températures de tous les éléments du capteur dans le temps.

Cette méthode nécessite des calculs numériques qui rendent indispensable l'usage de l'ordinateur [3].

- **La première étape** : le calcul des différents échanges thermiques indépendants de la température.
- **La deuxième étape** : on choisit un intervalle de temps pour effectuer les calculs (entre 7h00 du matin et 18h00) et on calcule pour chaque pas de temps les paramètres suivants :
 - ✓ Le rayonnement solaire frappant un plan incliné.
 - ✓ La puissance solaire absorbée par l'absorbeur et la vitre du capteur.
 - ✓ La température ambiante et la température du ciel.
- **La troisième étape** : On calcule la température ambiante, et on suppose qu'initialement les températures des différents composants du capteur sont à la température ambiante à l'exception des températures de l'absorbeur et du fluide caloporteur qui sont à des températures légèrement supérieures, et on calcule pour les températures initiales :
 - ✓ Les propriétés thermophysiques du fluide caloporteur à savoir :

La masse volumique.

La conductivité thermique.

La viscosité cinématique.

La chaleur massique.

Le nombre de Prandtl.

✓ Les coefficients d'échange thermique, à savoir :

Le coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et la voute céleste.

Le coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et l'absorbeur.

Le coefficient d'échange par convection entre la vitre et l'absorbeur.

Le coefficient d'échange par convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur.

Le coefficient d'échange par rayonnement entre l'isolant et la voute céleste.

Résolution du système d'équations par la méthode de RK4.

• **La quatrième étape** : la troisième étape est reprise avec les températures obtenues.

• **La cinquième étape** : calcul du rendement instantané du capteur pour chaque pas de temps.

A la fin, nous avons obtenu un système de six équations qui peut être résolu par La méthode de Runge-Kutta d'ordre 4, où il faut mettre le système d'équations précédent sous la forme suivante :

$$\frac{dT_{V_{ext}}}{dt} = \frac{S}{M_V C_V} (\alpha_V G - h_{ciel}^r (T_{ciel} - T_{V_{ext}}) - h_{V_{am}}^c (T_{am} - T_{V_{ext}}) - U_V (T_{V_{ext}} - T_{V_{int}})) \quad (III.39)$$

$$\frac{dT_{V_{int}}}{dt} = \frac{S}{M_V C_V} (U_V (T_{V_{ext}} - T_{V_{int}}) - h_{V_{abs}}^r (T_{V_{int}} - T_{abs}) + h_{V_{abs}}^c (T_{V_{int}} - T_{abs})) \quad (III.40)$$

$$\frac{dT_{abs}}{dt} = \frac{S}{M_{abs} C_{abs}} \left(\alpha_{abs} \tau_V G - (h_{V_{abs}}^r + h_{V_{abs}}^c) (T_{V_{int}} - T_{abs}) \right) - \frac{S_f}{M_{abs} C_{abs}} h_f^c (T_f - T_{abs}) - U_{abs_{isol}} (T_{abs} - T_{isol}) \quad (III.41)$$

$$\frac{dT_f}{dt} = \frac{S_f}{M_f C_f} (h_f^c (T_f - T_{abs}) - h_f^c (T_f - T_{isol})) \quad (III.42)$$

$$\frac{dT_{isol_{int}}}{dt} = \frac{S}{M_{isol} C_{isol}} (U_{abs_{isol}} (T_{abs} - T_{isol}) - U_{isol} (T_{isol_{int}} - T_{isol_{ext}})) + \frac{S_f}{M_{isol} C_{isol}} h_f^c (T_f - T_{isol}) \quad (III.43)$$

$$\frac{dT_{isol_{ext}}}{dt} = \frac{S}{M_{isol} C_{isol}} (U_{isol} (T_{isol_{int}} - T_{isol_{ext}}) - h_{isol_{am}}^c (T_{isol} - T_{am})) \quad (III.44)$$

1. Intégration numérique

Le système d'équation régissant le fonctionnement du capteur solaire se compose de six équations différentielles du premier ordre. Pour sa résolution nous avons choisi la méthode numérique de Runge-Kutta dont Nous rappellerons brièvement dans ce qui suit son principe.

2. Méthode de Runge Kutta 4

Les méthodes de Runge-Kutta sont des méthodes numériques d'approximation de solution des équations différentielles. Elles ont été ainsi nommées en l'honneur des mathématiciens Carl Runge et Martin Wilhem Kutta qui élaborèrent cette méthode en 1901.

La méthode de Runge-Kutta d'ordre 4 (RK4) est très couramment utilisée pour la résolution des équations différentielles ordinaires (EDO), et très stable pour les fonctions courantes de la physique.

La méthode de RK4 est dérivée de la méthode d'Euler, elle utilise trois points intermédiaires pour progresser du point (x_i, y_i) au point (x_{i+1}, y_{i+1}) suivant les calculs suivants:

$$T_1 = hf(x_i, y_i) \quad (\text{III.45})$$

$$T_2 = hf\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{T_1}{2}\right) \quad (\text{III.46})$$

$$T_3 = hf\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{T_2}{2}\right) \quad (\text{III.47})$$

$$T_4 = hf(x_i + h, y_i + T_3) \quad (\text{III.48})$$

$$y_{i+1} = \frac{h}{6}(T_1 + 2T_2 + 2T_3 + T_4) \quad (\text{III.49})$$

Avec: $h = x_{i+1} - x_i$ (III.50)

Les méthodes de Runge-Kutta présentent les avantages et les inconvénients suivants :

- **Les avantages**

- Elles sont des méthodes à mise en route autonome grâce à l'utilisation des conditions initiales dès le début du calcul.
- Ce sont des méthodes pas à pas : pour obtenir y_{i+1} on n'a besoin que de l'information obtenue au point précédent (x_i, y_i) .
- Elles ne nécessitent pas le calcul des dérivées de $f(x, y)$.

- **Les inconvénients**

- Elles sont assez longues, exigeant à chaque pas plusieurs calculs de $f(x, y)$.

III.7 les différents modèles

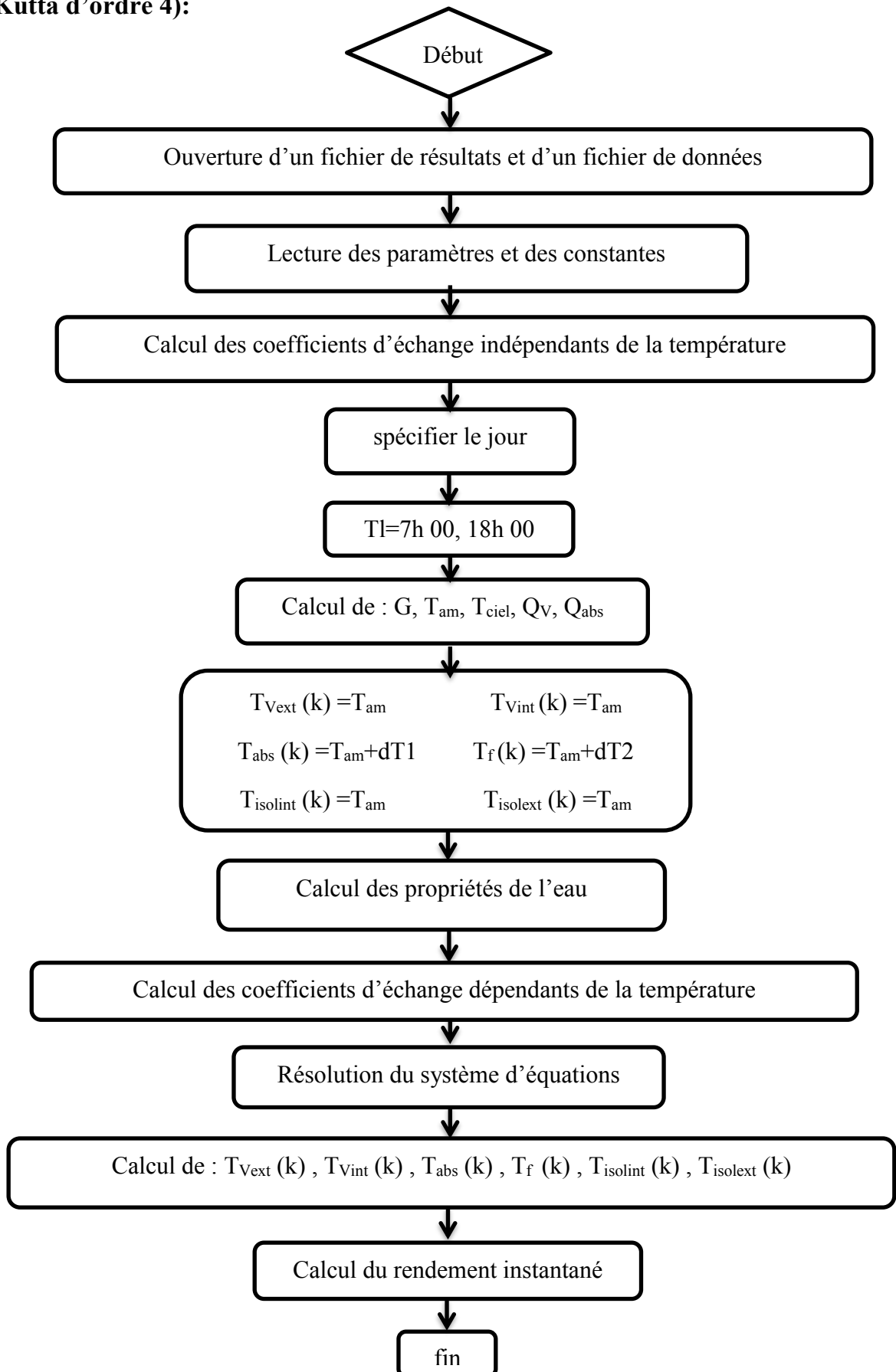
Il existe plusieurs modèles régissant le comportement des capteurs solaires, Dave et ses collaborateurs décomposent l'atmosphère en couches horizontales et étudient successivement les phénomènes d'absorption et de diffusion auxquels est soumis le rayonnement solaire. D'autres modèles donnent le rayonnement solaire en fonction de paramètres atmosphériques et astronomiques. Citons quelques exemples de ces modèles:

- Modèle de Perrin de Brichambaut: c'est un modèle qui estime la moyenne quotidienne de l'irradiation reçue sur un plan horizontal par ciel clair.
- Modèle de Cole-Barbaro et al: ce modèle donne la puissance moyenne reçue sur une surface perpendiculaire aux rayons solaires au niveau du sol.
- Modèle de Capderou: la modélisation du facteur de trouble atmosphérique de Linke

TL par ciel clair en fonction des seuls paramètres géo-astronomiques a permis à Capderou de proposer les expressions précédentes.

- Modèle de Kasten: le modèle d'estimation du trouble atmosphérique le plus récent est celui présenté par Kasten en 1996. Il exprime le trouble de Linke à partir de l'irradiation directe reçue sur plan normal par journée de ciel clair. [26].

III.8 L'organigramme général pour le régime transitoire (méthode de Runge Kutta d'ordre 4):



III.9 conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude numérique du capteur. Nous avons présentés les différents paramètres de fonctionnement, les puissances absorbées par le capteur ainsi qu'un état de l'art du capteur. Nous avons établi les bilans thermiques globaux et au niveau de chaque partie en régime transitoire, les systèmes obtenus seront résolus par approche numérique.

Chapitre IV

IV.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, on a étudié le capteur solaire, La résolution du système d'équations des bilans thermiques au niveau de chaque partie du capteur par la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4, en plus, on a élaboré un code de calcul en langage MATLAB.

Dans ce chapitre, on va donner les résultats calculés issus de la simulation. Ces résultats concernent essentiellement la variation des différentes températures au cours du temps. Les résultats sont présentés sous forme de graphes.

Le capteur solaire plan étudié présente les caractéristiques suivantes:

Tableau IV.1: Caractéristiques du capteur plan étudié

Dimensions (m)	1.3 *0.3 *0.1						
	δ (m)	λ (w/mk)	Cp (J/kg)	P (kg/m ³)	ε	α	τ
Vitre (verre)	3.10^{-3}	1	840	2500	0.88	0.05	0.9
Isolant	5.10^{-4}	0.035	1000	1.127	0.1	/	/
Fluide (eau)	/	0.64	4180	1000	/	/	/
Air	2.10^{-3}	0.026	1003	1.18	/	/	/
absorbeur	4.10^{-3}	65	400	7800	0.1	0.9	/

Diamètre interne de tube 0.012 m

Diamètre externe de tube 0.014 m

Débit massique : 0.002 kg/s

$V_{vent}=1\text{m/s}$

$T_{en}=25^{\circ}\text{C}$

L'expérience a été faite le 6 Mai 2017 à Ghardaïa de coordonnées géographiques:

Latitude 32.48° nord.

Longitude 3.66° .

Altitude 500 m.

IV.2 L'évolution temporelle du rayonnement solaire incident

- Le 06/05/2017 au Ghardaïa

La figure IV.1 montre la variation temporelle du rayonnement solaire qui a augmenté pour atteindre son maximum entre 12 h 00 et 13 h 00.

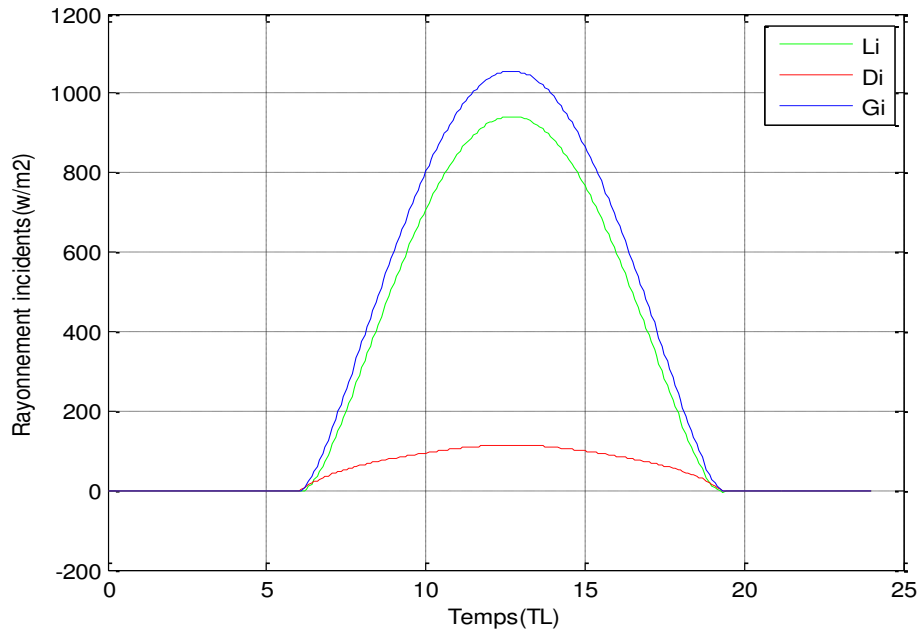


Figure IV.1: L'évolution temporelle du rayonnement solaire

IV.3 Variation temporelle des puissances solaires reçues et absorbées

La figure IV.5 montre l'évolution temporelle du rayonnement solaire global (G), reçue par mètre carré de surface plane horizontale et des puissances absorbées par la vitre (Pv) et par l'absorbeur (p_{ab}). On peut remarquer que la puissance atteint son maximum entre 12h00 et 14h00.

La puissance absorbée par la vitre n'est pas considérable et reste toujours inférieure à celle absorbée par l'absorbeur. Ceci est dû à ses caractéristiques : géométriques (épaisseur faible $e_v=3\text{mm}$) et optiques (coefficient d'absorption faible et coefficient de transmission élevé).

La puissance absorbée par l'absorbeur est très importante, elle (prendre la grande partie du rayonnement global absorbée (G)).

Les courbes de variation des puissances absorbées par la vitre et l'absorbeur suivent la même loi que la variation temporelle du rayonnement global car ces puissances sont reliées au rayonnement global par des lois linéaires.

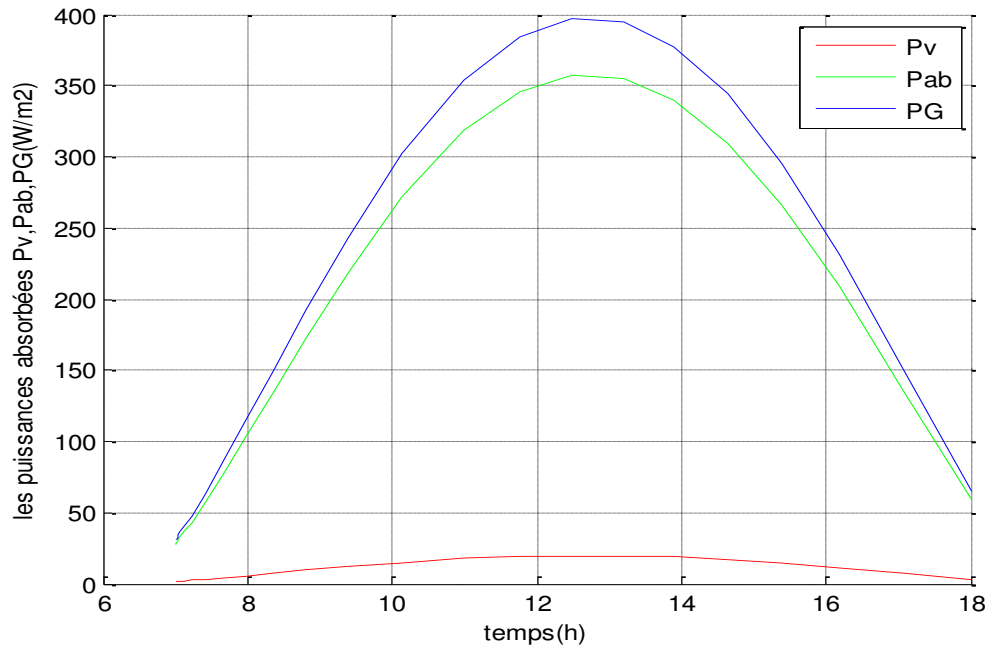


Figure IV.2: Variation temporelle des puissances solaires reçues et absorbées

IV.4 Variation temporelle des températures de l'ambiance et du ciel

La température du ciel varie en fonction de celle de l'ambiance (figure IV.3), il s'ensuit que les courbes représentatives de l'évolution temporelle des températures de l'ambiance et du ciel ont la même allure, elles atteignent leurs valeurs maximales entre 13h00 et 17h00 tout comme le rayonnement global, cela s'explique par l'effet de serre :

En effet, une partie du rayonnement solaire incident est absorbée par la surface de la terre et ensuite réémise vers l'atmosphère sous forme d'un rayonnement I.R lequel va être partiellement absorbé par les gaz à effet de serre qui va augmenter la température de l'atmosphère terrestre, et s'accroît d'autant plus que le rayonnement solaire augmente, d'où l'accroissement de la température de l'atmosphère.

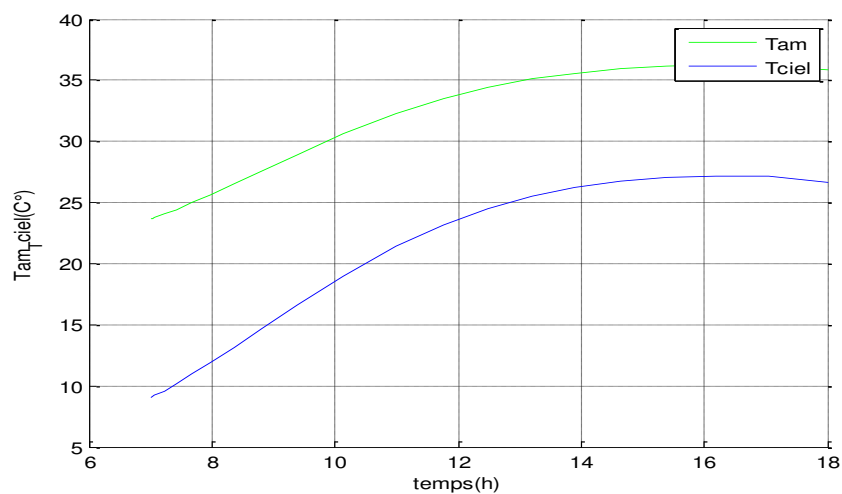


Figure IV.3: Variation temporelle des températures de l'ambiance et du ciel

IV.5 Variation temporelles des températures des différentes parties du capteur

D'après la figure IV.4, on remarque que la température la plus élevée est celle de l'absorbeur, résultant de la puissance importante qu'il absorbe. Un faible écart sépare les températures de l'absorbeur et du fluide caloporteur, cela est dû principalement au coefficient de convection entre ces derniers qui présente des valeurs importantes.

On trouve dans un ordre décroissant la température de la face intérieure de l'isolant, du fait de son emplacement directement sous l'absorbeur qui a une conductivité thermique élevée, puis vient la température de la face intérieure de la vitre, ceci s'explique par l'absorption du rayonnement incident d'une part, et la chaleur cédée par l'absorbeur sous forme de rayonnement et de convection d'autre part. Puis, la température de la vitre extérieure qui est légèrement inférieure à celle de la face intérieure, ceci est dû à son affectation par l'action du vent qui cause des déperditions thermiques par convection avec l'air ambiant. D'une autre part, la température du côté intérieur de la vitre est supérieure à son côté extérieur à cause de l'emprisonnement du rayonnement I.R entre l'absorbeur et la face intérieure de la vitre. La température la moins importante est celle de la face extérieure de l'isolant résultant de sa faible conductivité thermique ainsi que sa soumission à l'action du vent.

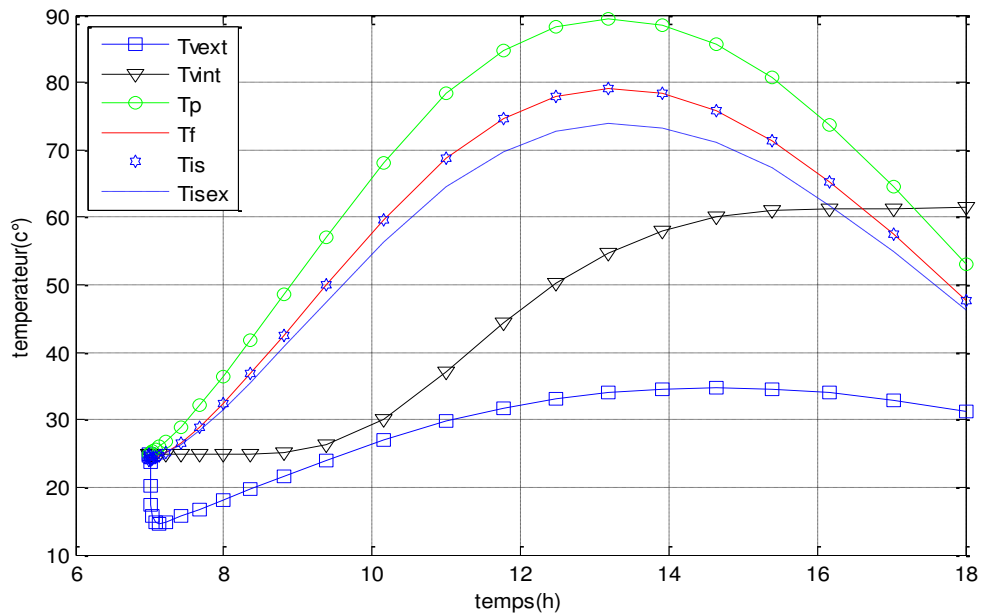


Figure IV.4: Evolution temporelle des températures des différentes parties du capteur

IV.6 Variation temporelle du rendement instantané

L'analyse du comportement d'un capteur au cours d'une journée (figure IV.5) montre que le rendement augmente par des valeurs maximales entre 13 h 00 et 15 h 00, bien que l'irradiation solaire commence à décroître à partir de 13 h 00. La valeur moyenne est égale entre (0.5- 0.6).

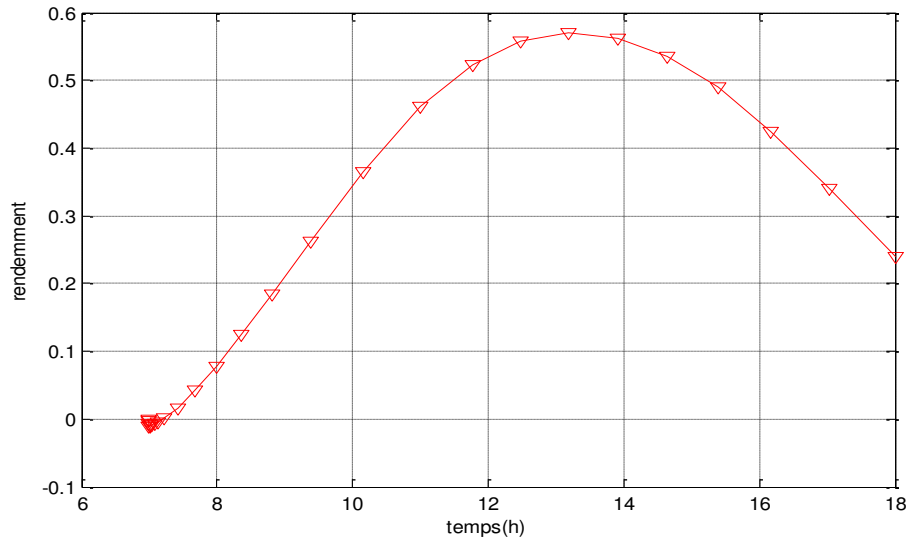


Figure IV.5: Evolution temporelle du rendement instantané du capteur

IV.7 Variation temporelle de la puissance utile du capteur

Il est évident que la puissance utile récupérée par le fluide dépend étroitement du rayonnement solaire global. Ainsi et comme le montre la figure IV.6, la puissance utile est comprise entre 200 et 250 watts.

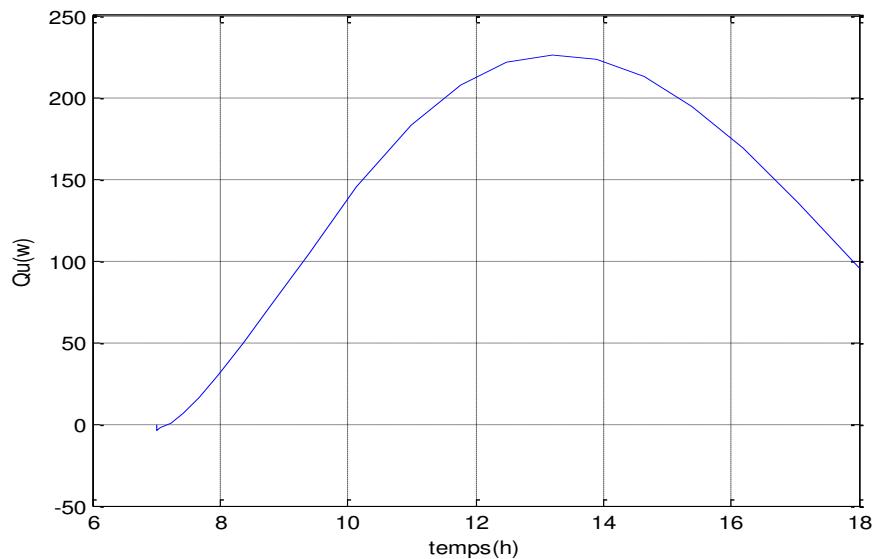


Figure IV.6: Variation temporelle de la puissance utile du capteur

IV.8 Variation temporelle de température sortie du fluide caloporteur

La figure IV.7 présentée ci-dessous montre la variation temporelle de température sortie de fluide caloporteur à partir de ces résultats, on constate que la température du fluide caloporteur en sortie du capteur atteint les 50°C aux environs de midi solaire. Elle peut facilement dépasser les 55°C si on avait un bon contact entre les tubes véhiculant le fluide de travail (l'eau) et la plaque absorbante.

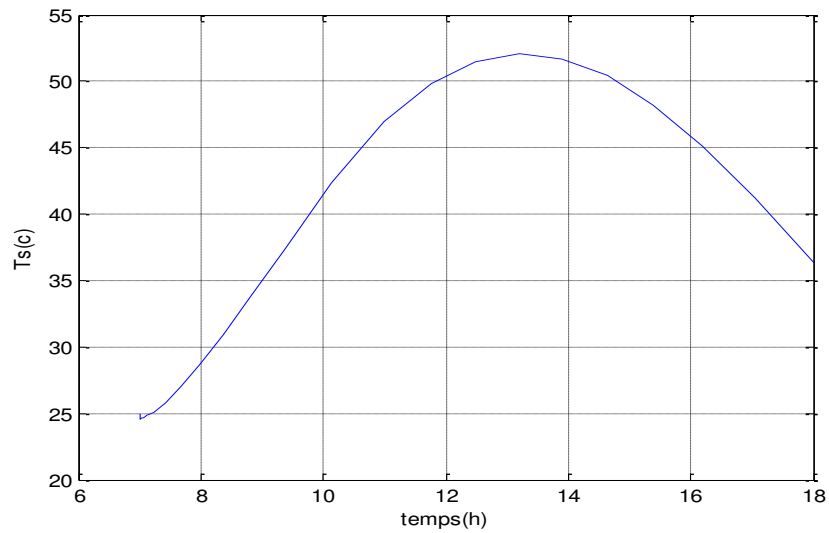


Figure IV.7 : Variation temporelle de température sortie du fluide caloporteur

IV.9 Effet des paramètres externes sur le rendement instantané du capteur

L'influence de nombreux paramètres sur les caractéristiques de fonctionnement du capteur solaire plan à eau fonctionnent en régime transitoire.

IV.9.1 Effet de la vitesse du vent

Les figures (IV.8) à(IV.10) montre l'effet de l'accroissement de la vitesse du vent sur le rendement instantané du capteur, est défavorable. On constate que les faibles vitesses sont plus favorables.

En effet, pour une même valeur de l'éclairement solaire reçue par le capteur solaire, l'accroissement de la vitesse du vent provoque une baisse des températures des éléments du capteur notamment de sa couverture (vitre) en conséquence une augmentation des déperditions thermique vers l'avant du capteur ce qui conduit à un rendement moindre.

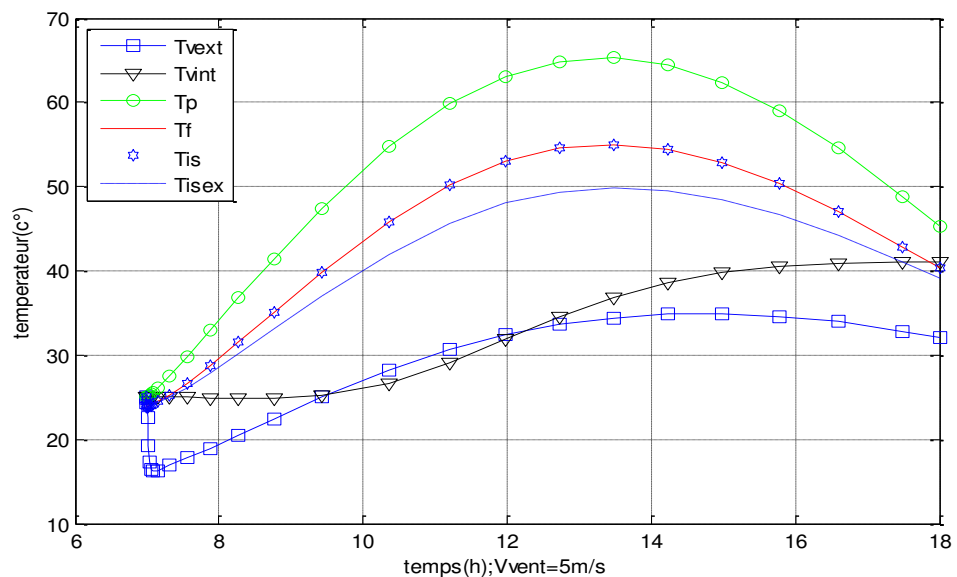


Figure IV.8: Evolution temporelle des températures des différentes parties du capteur

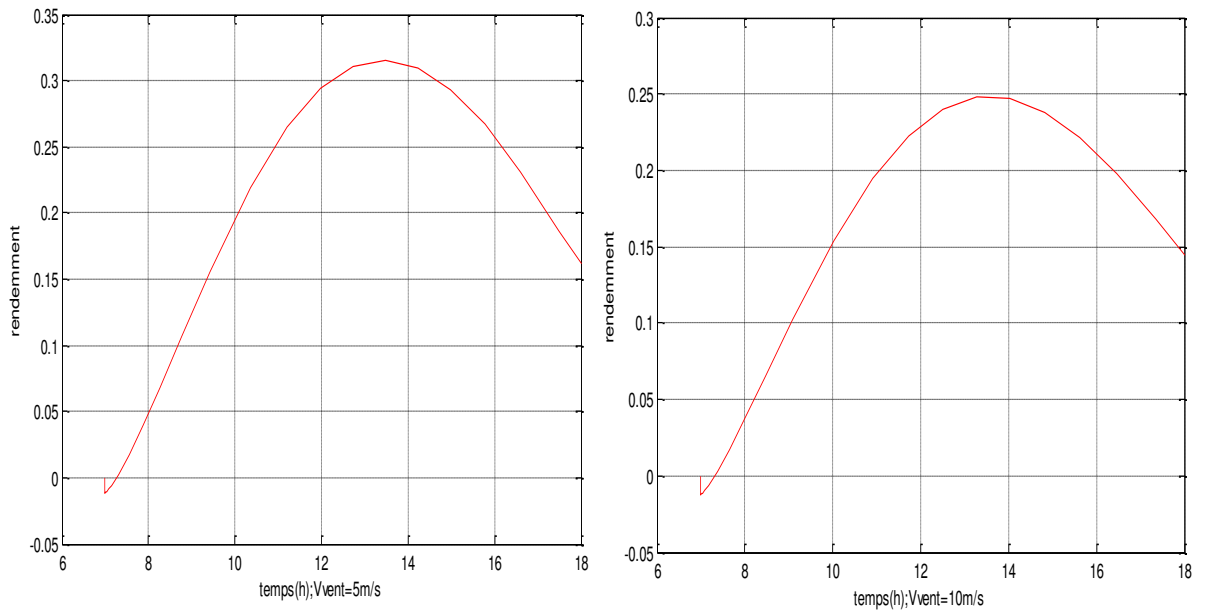


Figure IV.9: Evolution temporelle du rendement instantané du capteur

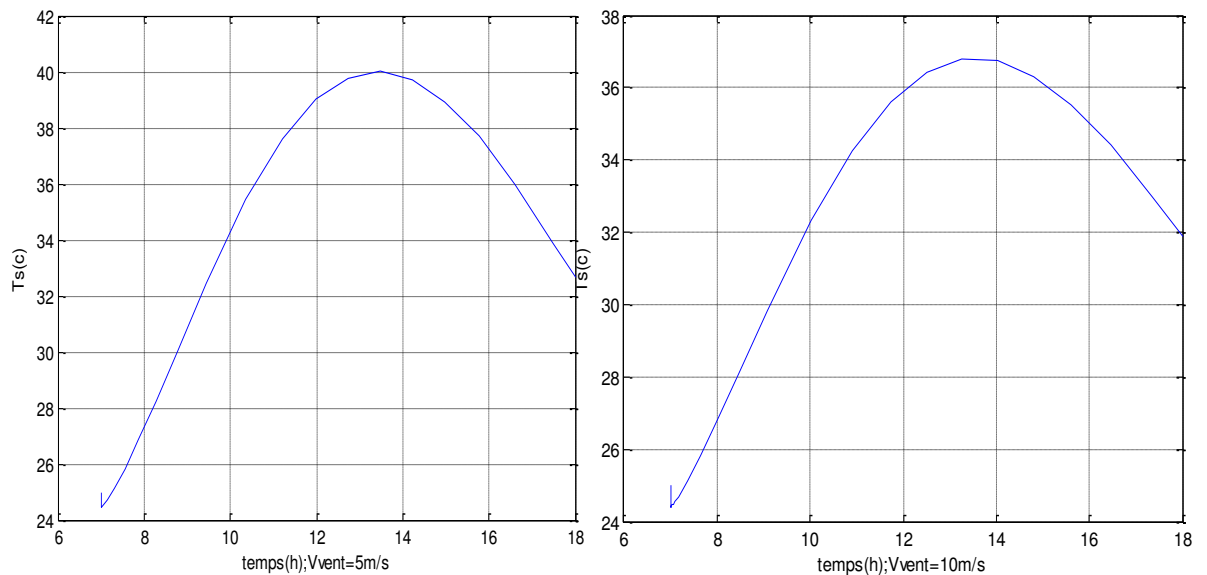


Figure IV.10 : Variation temporelle de température sortie du fluide caloporteur

IV.9.2 Effet de la température de l'ambiance

Les figures (IV.11) à (IV.31) montrer que La diminution de la température ambiante conduit à une baisse de la température au niveau des différentes composants du capteur (vitre, absorbeur, fluide) et par conséquent à une décroissance du rendement du capteur et l'inverse pour l'augmentation.

a- Le 10/01/2016 (T=12C°, période hivernale)

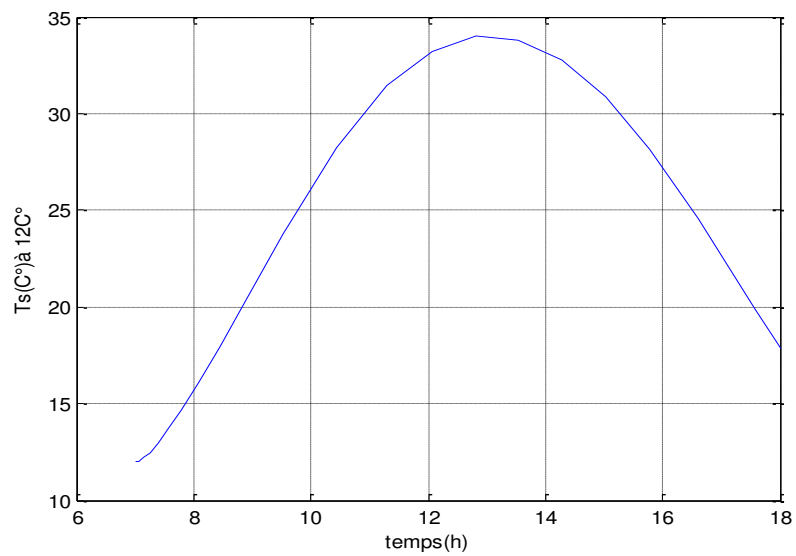


Figure IV.11 : Evolution de température sortie du fluide au cours de la journée

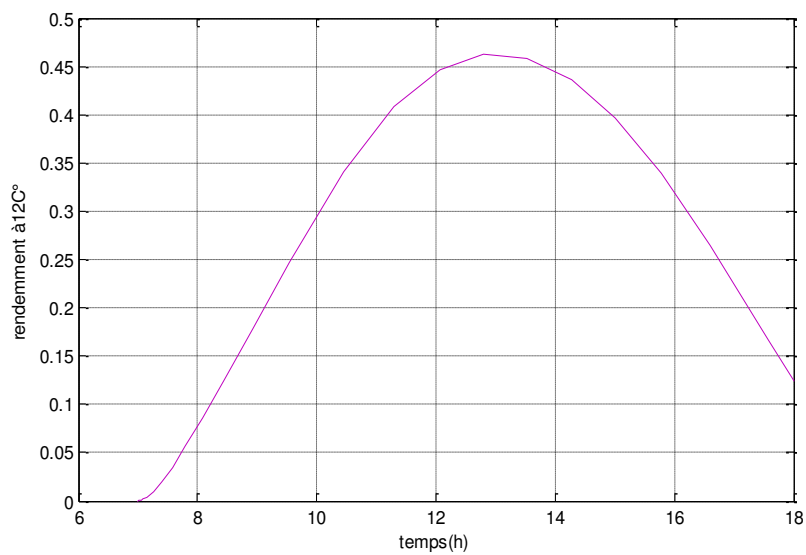


Figure IV.12: Evolution temporelle du rendement instantané du capteur

b- Le 10/01/2016 (T=23C°)

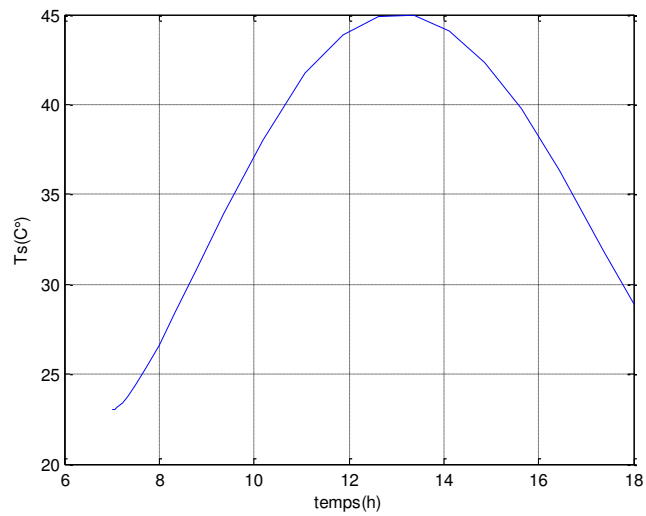


Figure IV.13 : Evolution de température sortie du fluide

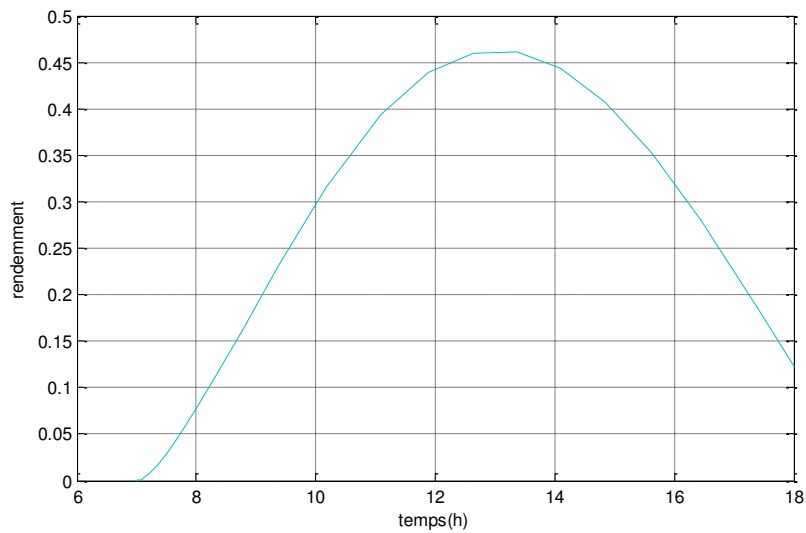


Figure IV.14: Evolution temporelle du rendement instantané du capteur

c- Le 20/01/2016(T=5C°)

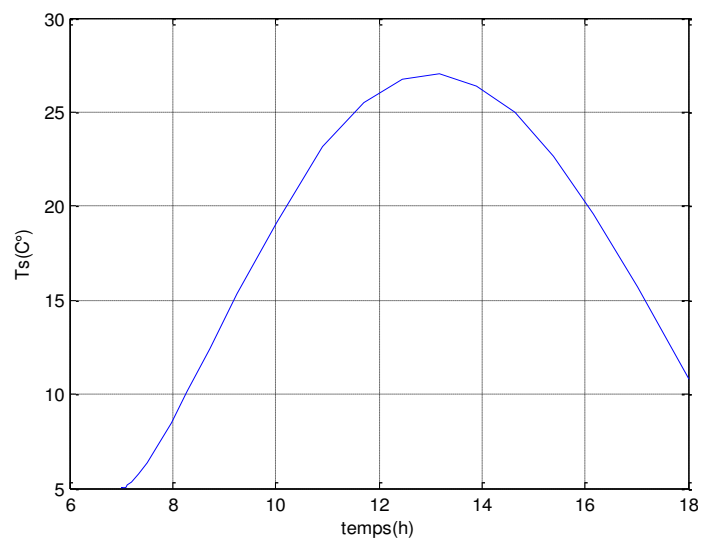


Figure IV.15 : Evolution de température sortie du fluide

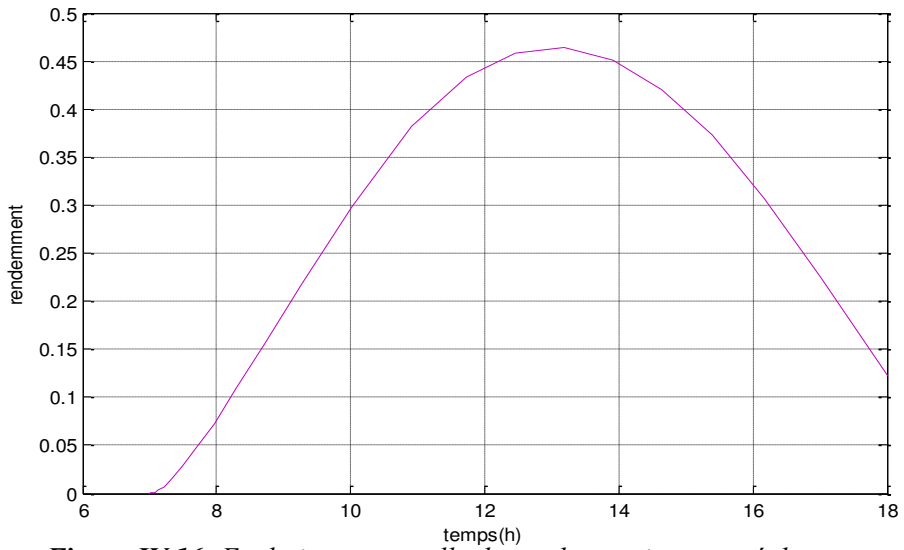


Figure IV.16: Evolution temporelle du rendement instantané du capteur

d- Le 05/04/2016 (T=15C°, vernal)

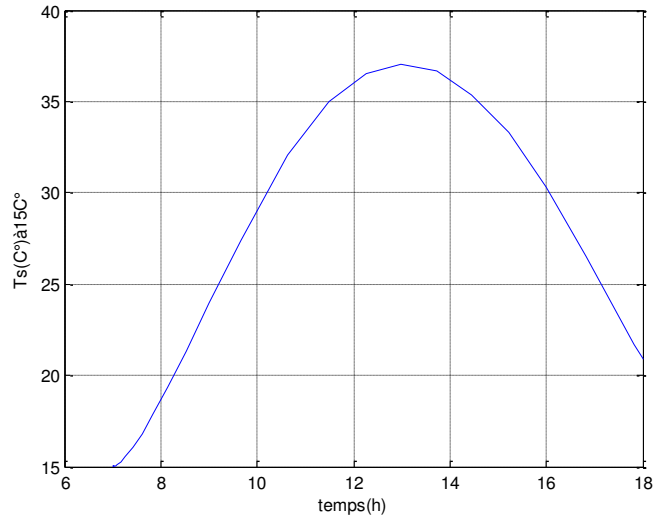


Figure IV.17 : Evolution de température sortie du fluide

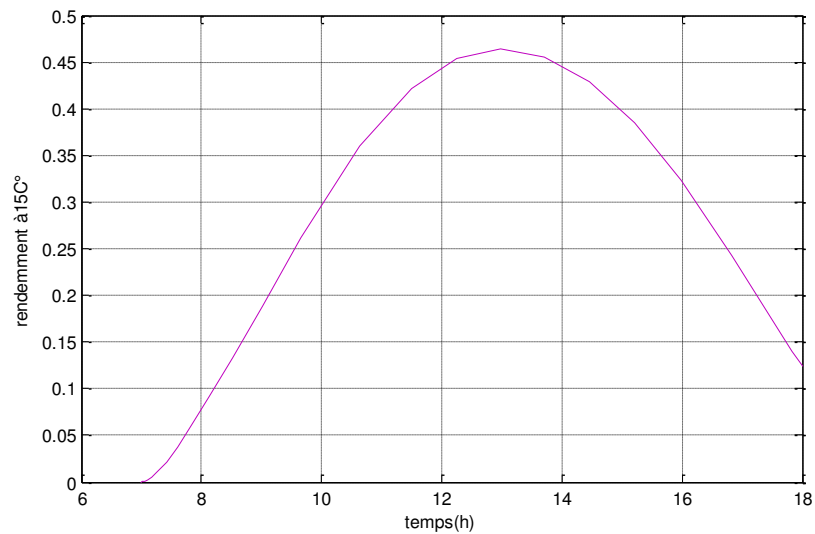


Figure IV.18: Evolution temporelle du rendement instantané du capteur

e- Le 22/04/2016 (T=18C°)

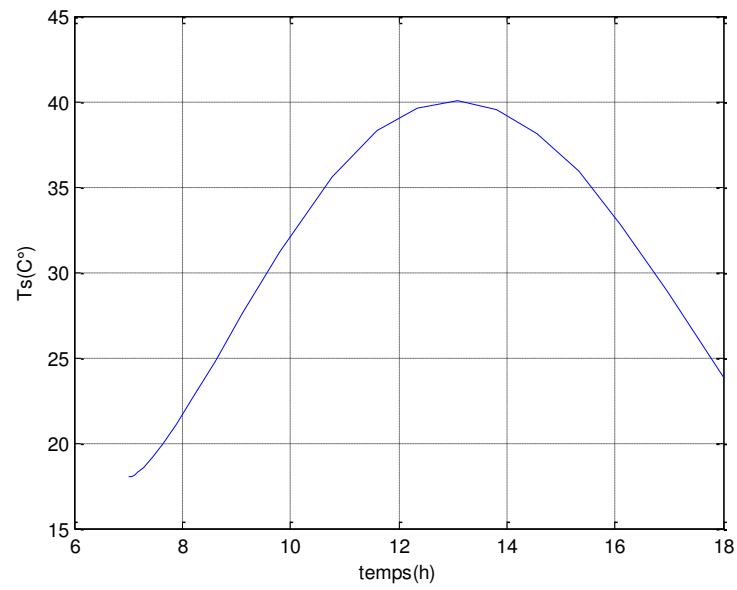


Figure IV.19: Evolution de température sortie du fluide

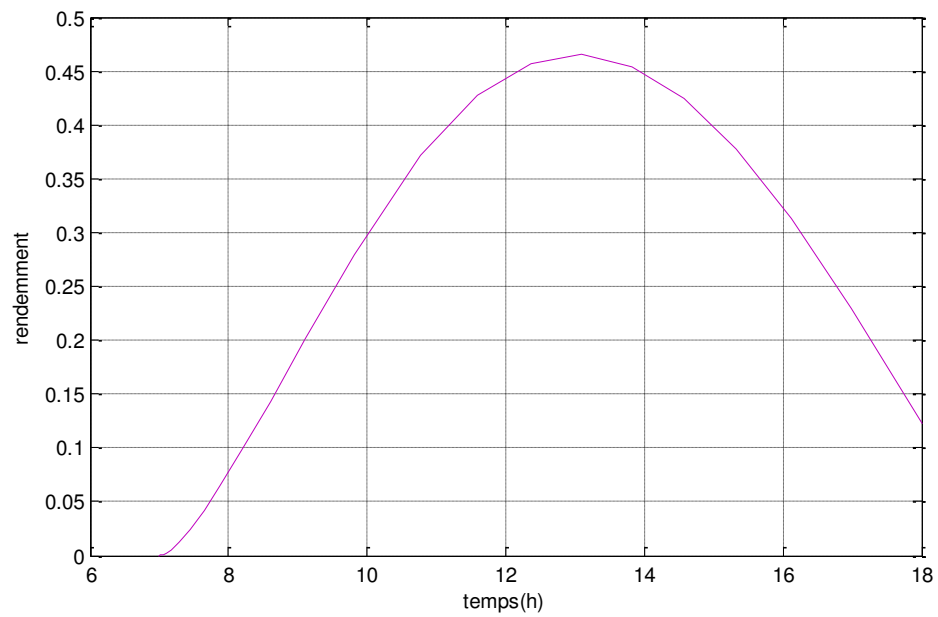


Figure IV.20: Evolution temporelle du rendement instantané du capteur

f- Le 10/07/2016 (T=27C°, estivale)

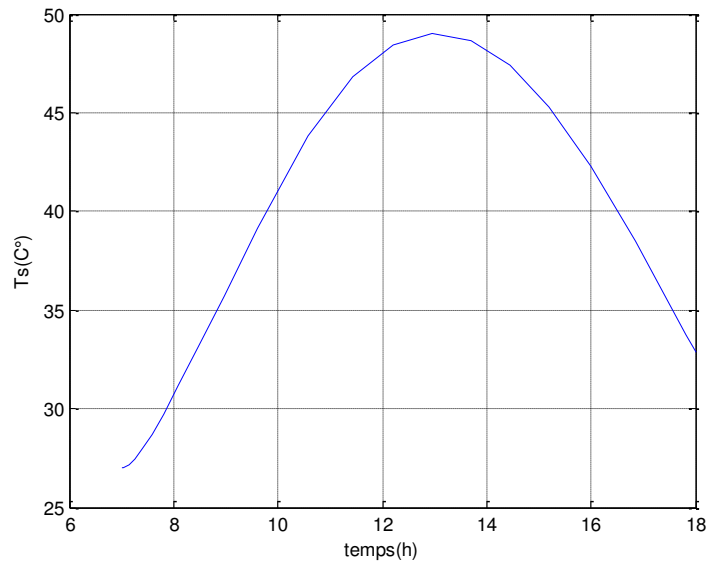


Figure IV.21: Evolution de température sortie du fluide

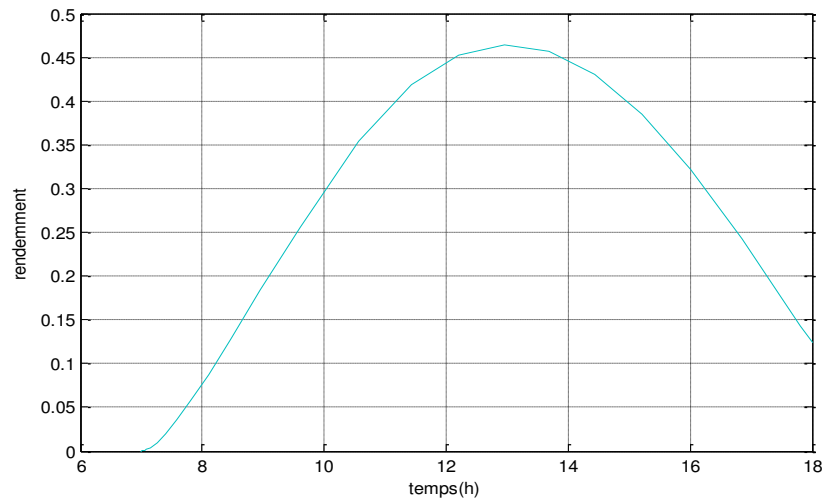


Figure IV.22: Evolution temporelle du rendement instantané du capteur

g- Le 30/07/2016 (T=43C°)

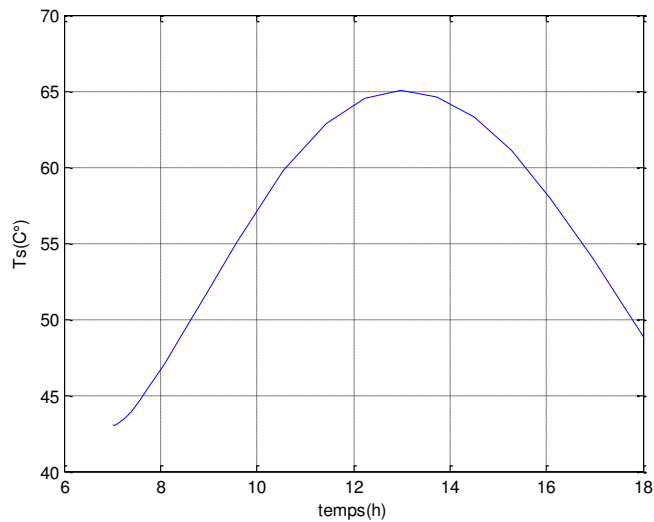


Figure IV.23: Evolution de température sortie du fluide

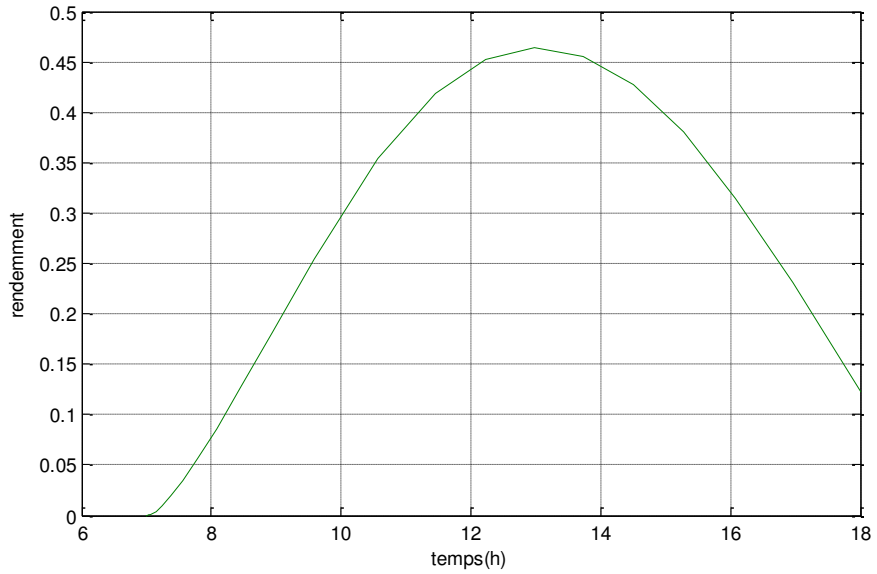


Figure IV.24: Evolution temporelle du rendement instantané du capteur

h- Le 15/10/2016 (T=30C°, automnal)

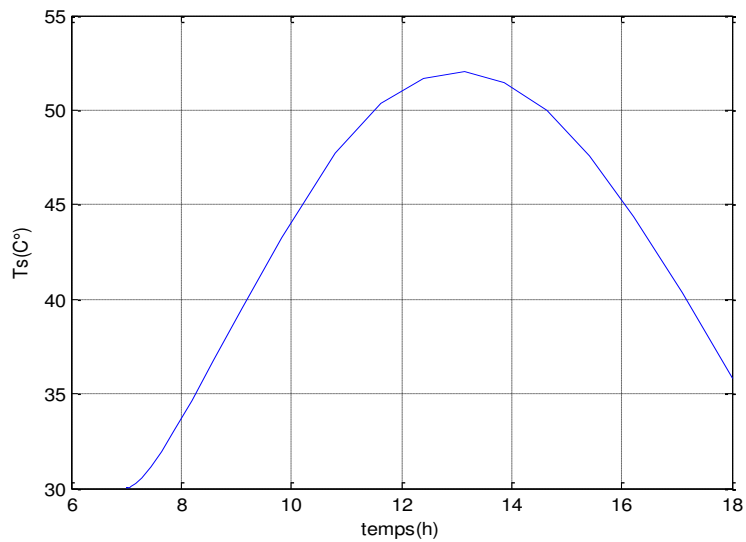


Figure IV.25: Evolution de température sortie du fluide

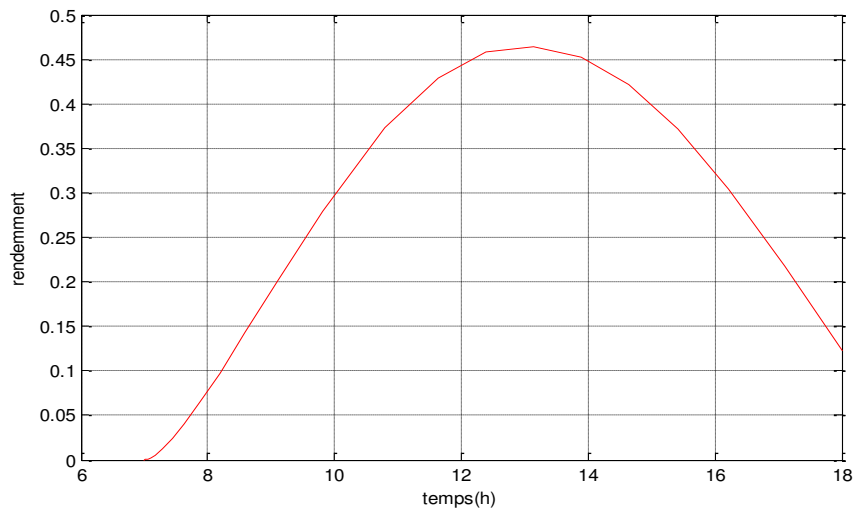


Figure IV.26: Evolution temporelle du rendement instantané du capteur

i- Le 24/10/2016 (T=20C°)

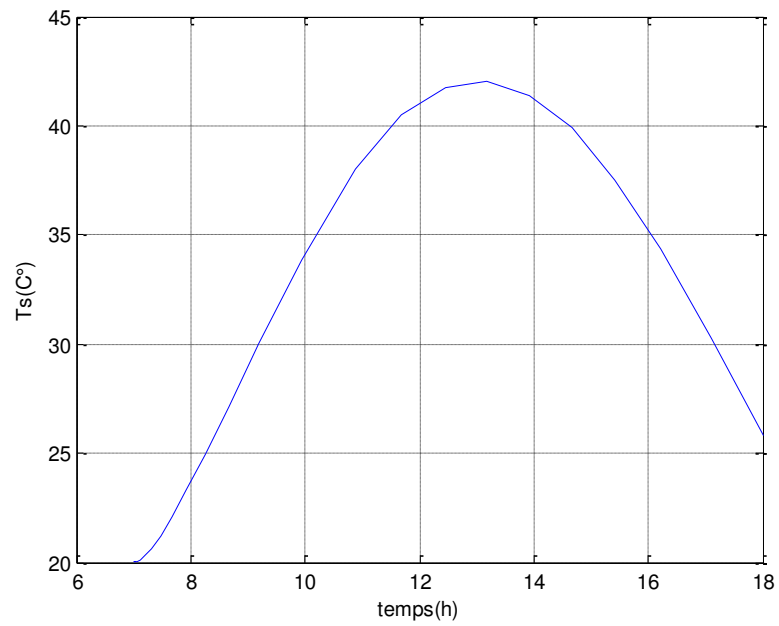


Figure IV.27: Evolution de température sortie du fluide

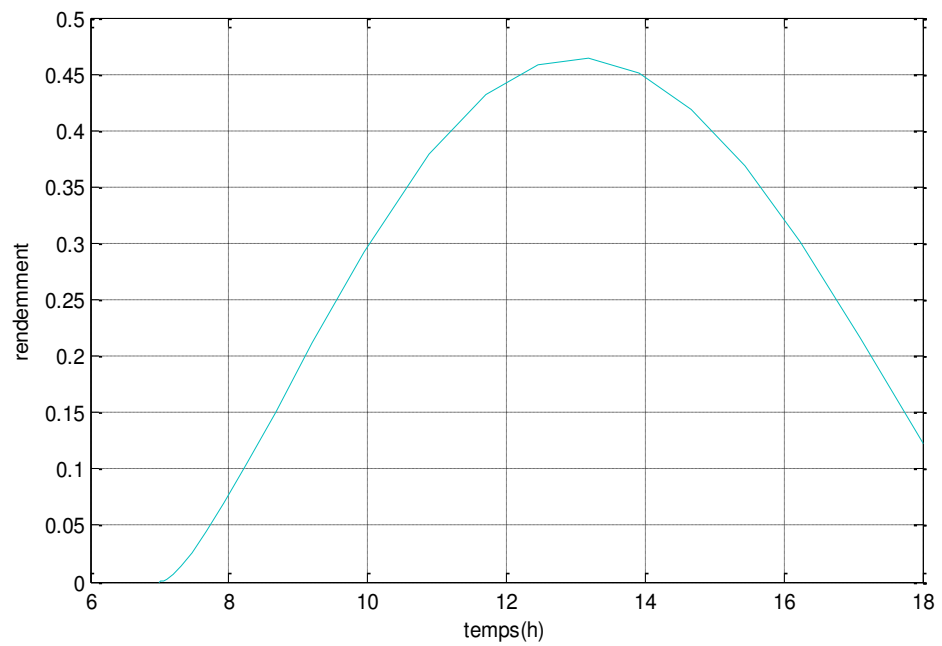


Figure IV.28: Evolution temporelle du rendement instantané du capteur

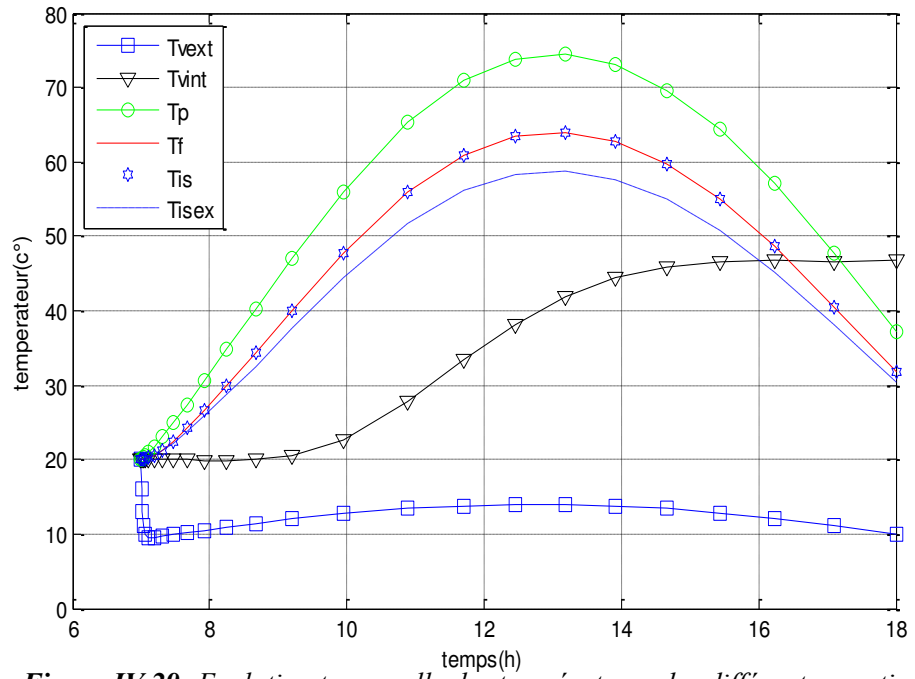


Figure IV.29: Evolution temporelle des températures des différentes parties du capteur($T=20C^{\circ}$)

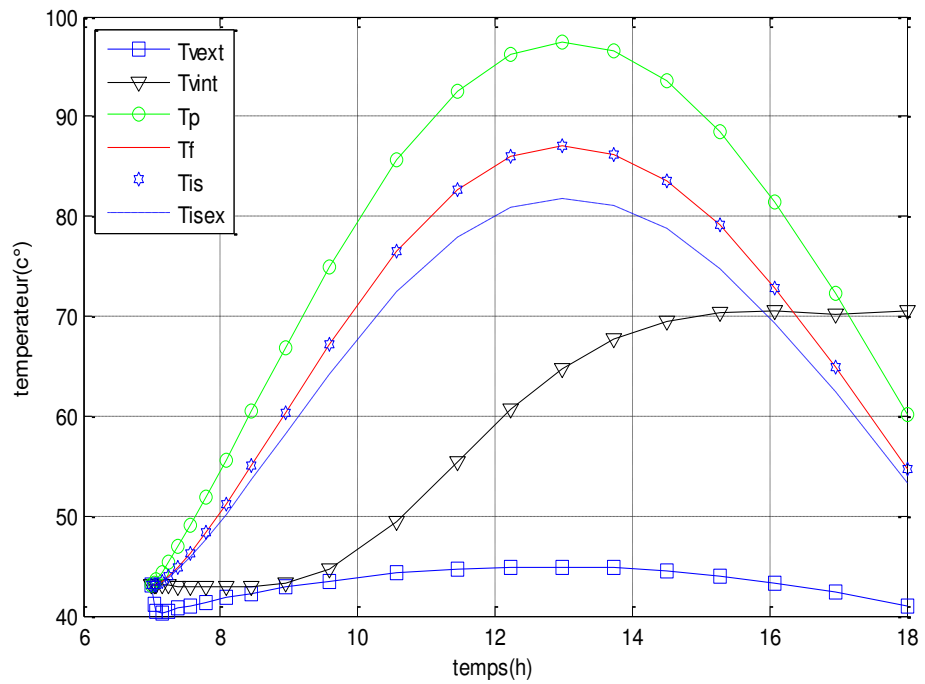


Figure IV.30: Evolution temporelle des températures des différentes parties du capteur($T=43C^{\circ}$)

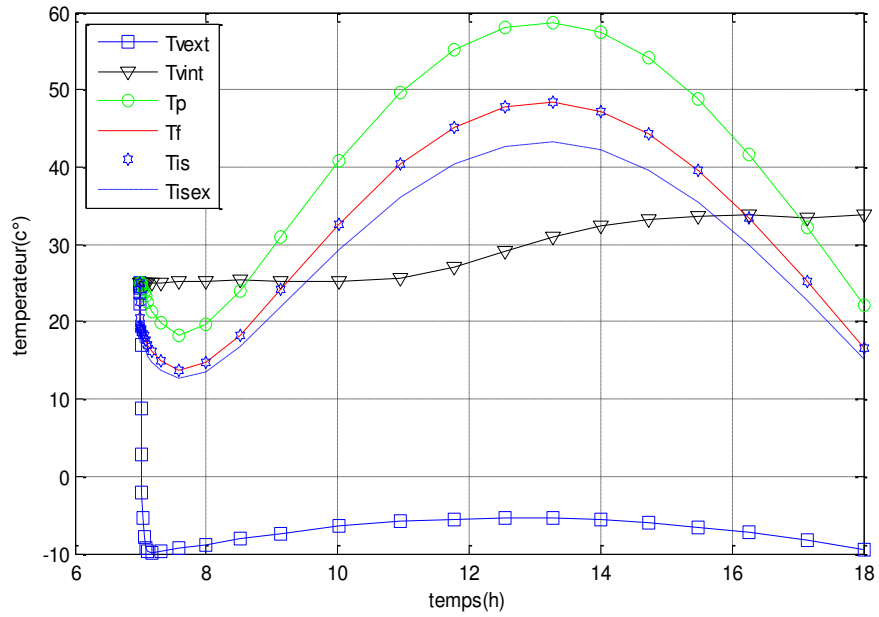


Figure IV.31: Evolution temporelle des températures des différentes parties du capteur ($T=5C^{\circ}$)

IV.9.3 Effet de surface d'échange

Le figure (IV.32) montre que le surface d'échange de capteur trop importante donnera un bon rendement qu'avec une surface plus petite.

Mais si la surface de capteur augmente le rendement instantané augmente.

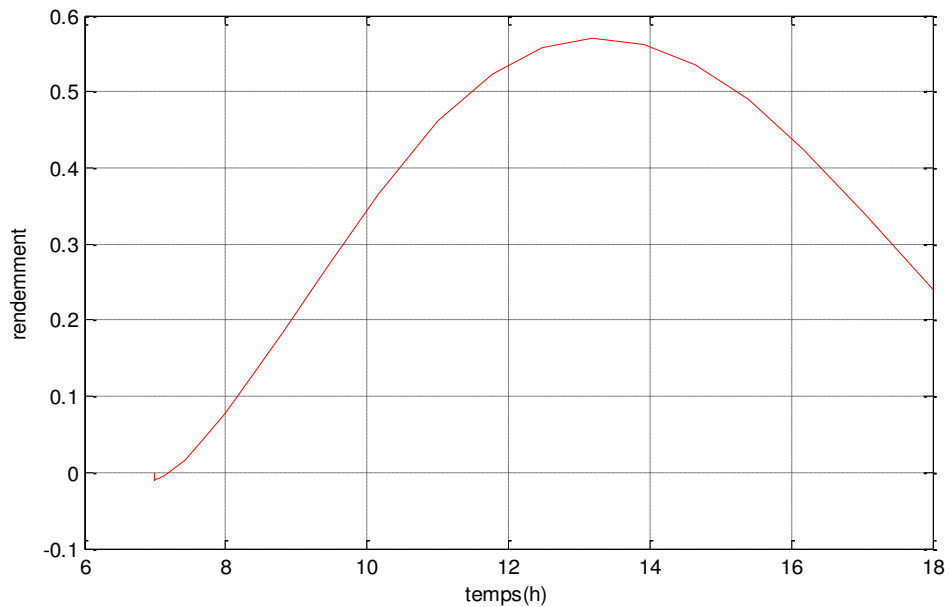


Figure IV.32: Evolution temporelle du rendement instantané du capteur ($S=2m^2$)

IV.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'effet des paramètres opérationnels externes sur le rendement instantané du capteur solaire en régimes transitoire, à ce dernier nous accorderons un intérêt particulier à cause de son caractère réaliste.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'énergie solaire propre non polluante, disponible sur l'ensemble du globe terrestre évidemment à différente intensité, durable et inépuisable (si l'on compte le temps en millions d'années), n'a pas besoins d'une technologie de pointe pour son utilisation.

La production de l'énergie thermique à partir de l'énergie solaire par les capteurs plans connaît de nos jours de nombreuses applications vue leurs innombrables intérêts économiques et environnementaux. Le capteur solaire est l'élément essentiel pour l'exploitation de l'énergie solaire, il capte le rayonnement solaire et le transforme sous forme de chaleur par effet de serre par des matériaux qui ont des grands coefficients d'absorption.

Dans le cadre de ce travail, nous avons entrepris une étude théorique et numérique d'un capteur solaire plan à eau en régime transitoire.

Après une présentation succincte de quelques données astronomiques, nous avons dressé un état de l'art des capteurs solaires plans. Notre intérêt a porté par la suite sur les différents échanges thermiques mis en jeu à l'intérieur d'un capteur afin d'établir les équations gouvernants le comportement thermique de ce dispositif en régime transitoire. La résolution du système d'équations discrétisées par la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4.

Les capteurs solaires plans à eau « en thermosiphon »: le liquide caloporteur circule grâce à la différence de densité entre ce liquide et l'eau du ballon. Tant qu'il est plus chaud, donc moins dense que l'eau stockée, le liquide primaire s'élève en effet naturellement, par thermo-circulation.

Ce travail propose une simulation numérique du chauffage l'eau circulant à l'intérieur d'un tube absorbeur d'un capteur solaire plan thermosiphon.

Ce système présente de très nombreux avantages :

- il ne comporte pas de pompes ni de régulation, et ne nécessite pas de raccordement au réseau électrique.
- les risques de panne et de dysfonctionnement sont, par conséquent, très réduits.

Le programme informatique utilisé pour la simulation de la température de sortie du fluide caloporteur en comparaison avec celle de l'absorbeur et de la vitre et l'isolant en fonction du temps, la température ambiante et de la position géographique du lieu, a été développé en langage Matlab, La température de la plaque absorbante est la plus élevée. Ceci peut être justifié par son pouvoir d'absorption qui est important pour le rayonnement solaire. La modélisation mathématique, basée sur la méthode des bilans globaux des énergies, prend en compte les conditions initiales associées au capteur.

Les résultats de simulation obtenus mettent en évidence l'influence des paramètres externes sur le rendement instantané et les différentes températures du capteur plan. Il

Conclusion générale

apparaît clairement que le rendement instantané est une fonction proportionnelle de l'irradiation solaire globale qui joue un rôle prépondérant. En outre, l'augmentation de la température de l'ambiance favorise l'amélioration du rendement instantané du capteur dans le régime transitoire.

L'étude numérique montre que la température du fluide dépasse le seuil de 65°C est particulièrement obtenue au midi solaire pour la période d'été au Ghardaïa, Même en période hivernale cette température reste plus ou moins bonne et atteint 40°C , Ces résultats sont très encourageants pour des applications de ce type de capteur pour des utilisations domestiques du chauffage de l'eau.

Par ailleurs, pour avoir un bon rendement il faut :

- Maintenir une faible différence de température entre l'absorbeur et la couverture transparente afin de diminuer les pertes thermiques convectifs vers l'avant du capteur.
- Choisir une température d'entrée du fluide caloporteur assez faible.
- Avoir un débit élevé pour améliorer l'énergie utile récupérée.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

[1]	A. Bidart et L. Dubois , «Les énergies fossiles et renouvelables », Dossier Pédagogique de la Fondation Polaire Internationale, Mai 2003.
[2]	BOURAGBI Lakhdar , Etude et amélioration du rendement de la conversion photothermique du capteur solaire.
[3]	SAADI Souad , effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan.
[4]	BENKHELIFA Abdelaziz , Modélisation et expérimentation d'un capteur solaire plan à eau Influence de l'intensité de l'éclairement solaire et de l'inclinaison du capteur solaire sur le rendement du capteur.
[5]	AGHILAS BRAHIMI , Etude de performances d'un capteur solaire plan à eau.
[6]	Saoussen KHALFALLAOUI, Dominique Seguin, Moulay Ahmed ABDELGHANI-Idrissi , Étude d'un système solaire thermique : Effet de l'orientation des panneaux solaires.
[7]	TABET Ismail , Étude, Réalisation et simulation d'un capteur solaire.
[8]	CHIBA YOUNES , Etude de l'utilisation d'un bassin d'eau comme capteur solaire.
[9]	BOUHEDIBA Malika , Simulation thermique d'une maison solaire pour la Production d'eau chaude sanitaire (ECS).
[10]	AMRAOUI Mohammed Amine , Etude numérique d'un capteur solaire plan à air Influence de la forme de la rugosité.
[11]	Foued CHABANE , Modélisation des paramètres de la conversion thermique de l'énergie solaire.
[12]	M.SIDIYAKOUB Ahmed Amin , Conception et Modélisation d'un four solaire multifibres sphérique et cylindrique.
[13]	CHERIER Mohamed Kamel , Etude Théorique et Expérimentale de l'Isolation Thermique Intérieure d'une Pièce d'un Habitat dans la région de Ghardaïa.
[14]	HADJ BELKACEMI Mohammed , Modélisation et Etude Expérimentation d'un Capteur Solaire non Vitré et Perforé.
[15]	KARROUTE Salima , Etude théorique et numérique des systèmes couples : distillateur plan-capteur et distillateur hot box – capteur.
[16]	MISSOUM Mohammed , Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie.
[17]	SANDALI Messaoud , Etude dynamique et thermique d'un capteur solaire à air à double passe avec milieu poreux.

Références bibliographiques

[18]	Chafika ZIDANI ,Conception et modélisation des systèmes photothermiques. Applications aux systèmes photothermiques alimentés par fibres optiques.
[19]	Ferdjani Ahmed Taha , Développement d'un logiciel de simulation des performances thermiques des capteurs solaires plans .
[20]	karima cherifi , optimisation d'un système de réfrigération solaire a absorption à usage domestique.
[21]	Gherib Lazhar ,Etude et calcul des capteurs solaires plans "Application au chauffe - eau".
[22]	http://conseils-thermiques.org/contenu/panneau_solaire_thermique.php .
[23]	BENBOUZA CHAOUKI , Production et performance des capteurs hybrides (PV / T) à eau intégrés dans le bâtiment-cas de l'Algérie.
[24]	PENTA PROJECT , module « capteurs solaires » cours de base m 31.1, Edition 2009.
[25]	Tahir SEDDIK . Etude numérique d'un capteur solaire plan à air à double passe.
[26]	AKERMI MUSTAPHA , Contribution à l'étude d'un capteur solaire thermodynamique thermosiphon à eau et application aux sites de TIARET et ADRAR.
[27]	http://www.solaire-diffusion.eu/solaire-thermique/chauffe-eau-solaire/kits-chauffe-eau-solaires/kit-chauffe-eau-thermosiphon.html .
[28]	F. Yettou. A. Gama , C. Hamouda et A. Malek . Etude et réalisation d'un banc d'essai pour un chauffe-eau solaire à circulation forcée dans la région des Hauts Plateaux.
[29]	Najoua ZARAI , Maher CHAABANE and Slimane GABSI . Outil de planification de la production thermique des capteurs solaires.
[30]	Rabéa Kaoulal; Sidi Med ElAmine Bekkouche ;Tayeb Benouaz; Sofiane Kherrou , Modélisation numérique d'un capteur solaire plan à air fonctionnant en régime transitoire en vue d'intégration au bâtiment.
[31]	Mr BEKKOUCHE Sidi Mohammed El Amine . Modélisation du Comportement Thermique de Quelques Dispositifs Solaires.

Résumé

Le travail présent concerne la simulation d'un capteur solaire thermodynamique thermosiphon à eau application au site de Ghardaïa.

L'objectif de ce travail il est d'étudier le comportement thermique d'un capteur solaire plan à eau en régime transitoire, en développant un programme de calcul utilise le logiciel matlab. La résolution du système d'équations obtenu est abordée par la méthode de Runge Kutta d'ordre 4.

Les résultats que nous avons obtenus ont permis de préciser l'effet des paramètres externes sur le rendement instantané du capteur sont données sous formes de graphes traduisant les différentes variations de chaque paramètre.

Mots clefs: capteur solaire plan, thermosiphon, régime transitoire, rendement instantané, simulation sous MATLAB.

Abstract

The present work concerns the simulation of a thermosyphon solar thermodynamic solar collector at the Ghardaïa site.

The objective of this work is studied the thermal behavior of a of the flat plat collector transient, developing a calculation program uses the matlab software. The solution of the system of equations obtained is approached by the method Runge Kutta of order 4.

The results obtained have made it possible to specify the effect of the external parameters on the instantaneous efficiency of the sensor. They are given in the form of graphs representing the different variations of each parameter.

Key words: flat plat collector- transient regime- thermosyphon - efficiency- MATLAB simulation

ملخص

هذه المذكرة تتعلق بمحاكاة للملقط الحراري المائي الديناميكي لطاقة الشمسية العاملة بفعل الكثافة مطبقة في موقع غرداية. الهدف من هذا العمل هو دراسة التصرف الحراري للملقط في حالة النظام الانتقالي وذلك بتطوير برنامج حسابي باستخدام برنامج MATLAB. حل جملة المعادلات التي تحكم التصرف الحراري للملقط تم بطريقة Runge Kutta من درجة 4.

سمحت النتائج المتحصل عليها بتعيين تأثير العوامل الخارجية على الفعالية اللحظية للملقط الحراري وبتبيين الفعل الهام للإشعاع الشمسي, وتعطى النتائج على شكل رسوم بيانية تعكس التغيرات المختلفة لكل متغير .

الكلمات المفتاحية: ملقط حراري نظام انتقالي – thermosyphon فعالية لحظية- المحاكاة MATLAB