

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ahmed Draia - Adrar
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Sciences de la Matière



**Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme de Master en Physique
Energétique et Energies Renouvelables**

Thème :

*Etude expérimentale et numérique d'un système hybride
combiné photovoltaïque/thermique*

Préparés par :

SLIMANI Zahia

BENZIDE Zohra

Le jury composé de :

Mr OMARI Boumediene	MAA	Université ADRAR	Président
Mr.MOUNGAR Houcine	MRB	URERMS	Examineur
Mr HARROZ Abd el-kader	MCA	Université ADRAR	Encadreur
Mr SLIMANI Mohamed El-Amine	MCA	Université d'Alger 'USTHB'	Co-encadreur

Année Universitaire 2019/2020

DIDICAS

"إِفْرَأْ بِأَسْمِ رَّبِّكَ الَّذِي خَلَقَ" سورة العلق [01]

Sur le chemin de l'accomplissement d'un commandement divin...

En route pour satisfaire notre soif de science ... rien n'est impossible...

Quand il y a un intérêt à atteindre un but ... tout devient facile...

Malgré tous les obstacles auxquels nous sommes confrontés ... nous n'abandonnerons pas...

Et de la même route nous regardons nos rêves ... nous construisons nos espoirs ... et nourrissons nos ambitions...

Nous regardons le monde maintenant avec un regard différent ...

Fabriqué en nous quelque chose qui recherche toujours le meilleur ...

17 ans n'ont pas été vains...

17 ans nous ont laissé maintenant en transe avec un rêve héroïque ... changement progrès évolution...

17 ans n'étaient rien d'autre qu'un grand saut pour nous mettre au début d'un chemin qui commence maintenant ... le vrai chemin vers la science...

Aux deux ailes qui lève moi ... je dédie cette mémoire...

A ceux qui m'ont accompagné tout au long de mon parcours, pas à pas ... avec un soutien ... un sacrifice ... et avec fierté.

Le nombre de papiers dans ce mémoire ne me suffit pas pour vous remercier ... à vous, ma mère "LAKBIRA" et mon père "LAKBIR"...

Et à mes frères et sœurs, et en particulier à ceux qui m'ont soutenu et soulagé la pression du travail, mon cher frère "SLIMANE". ma cher soeur "OUM ELKHIR"

"وَمَا تَوْفِيقِي إِلَّا بِاللَّهِ عَلَيْهِ تَوَكَّلْتُ وَإِلَيْهِ أُنِيبُ" سورة هود [88]

zahia

DIDICAS

Je dédie ce modeste travail dans un premier lieu à la première école qui m'a donné la vie et qui fait encore,

à la source d'amour et de compassion... ma chère mère.

Au premier enseignant dans ma vie: à celui qui m'a donné son nom et son âge, à la source de paix et de sécurité, mon cher père...

À ceux qui partagent cette école et cet enseignant avec moi, à ceux qui sont mon soutien dans la vie, mes frères bien-aimés, chacun en son nom...

À qui a partagé ce travail avec moi, et à qui a partagé tous les beaux moments de cette vie avec moi, à mon chère amie et ma collègue "Zahia"...

À ceux qui ne nous ont pas épargné son temps ni leurs efforts pour accomplir ce travail, au père de ma collègue Zahia , monsieur"SLIMANI LAKBIR"...

À qui s'incarne en lui la parole de « bénédiction sous la forme d'un être humain », "Abd al-Rahim"...

À celui que les mots de remerciement n'accomplissent pas, "Shoaiib"...

A mes compagnons de ce voyage, qui ont partagé avec nous la fleur de nos vies dans cette université, je mentionne particulièrement "Sara Aban" et "Sarah Regragui"...

zohra

REMERCIEMENT

Tous remerciements et louanges à Dieu Tout-Puissant, qui nous a donné volonté et détermination et a mis sur notre chemin des personnes qui nous ont fait avancer

Nous remercions « Dr. SLIMANI Mohamed El-Amine » pour son soutien, pour l'attention qu'il a porté à notre travail et sa contribution tout au long de cette étude.

Nous remercions également « Dr. HARROUZ Abdelkader », directeur de ce mémoire pour le soutien et ses conseils pendant les travaux.

Un grand merci et une grande gratitude au « Dr. MOUNGAR Houcine » pour son aide et ses efforts considérables, et pour son soutien durant ce travail du début à la fin Merci encore.

Nous remercions également « Dr. MEDIANI Ahmed » pour ses services et pour les facilités qu'il nous a accordées au sein de l'unité de recherche.

Nous remercions également monsieur « TIGANI Cherif » Et monsieur « AL-ZAWI Abdel Ali », qui a tenu à achever la dernière étape de l'installation dans un court laps de temps.

Nous remercions également « Dr. DAHBI Abd el-djalil » pour son précieux temps et son aide.

Nous remercions aussi le professeur « OMARI Boumediene » d'avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Enfin, merci à tous les enseignants et professeurs qui nous ont accompagnés dans le difficile voyage scientifique jusqu'à ce que, grâce à Dieu, nous atteignions ce jalon dans notre vie.

ملخص

يقترح هذا الموضوع دراسة نموذج مبتكر لنظام شمسي هجين كهروضوئي وحراري مشترك (PV/T) ثنائي السوائل، حيث يعمل سائلا نقل الحرارة (الهواء والماء) على الحمل القسري. هذا النظام الشمسي الهجين PV/T ثنائي السوائل مناسب لتطبيقات درجات الحرارة المتوسطة ويمكن دمجه في الأسطح السكنية. يتكون من مجمعين للطاقة الشمسية؛ مجمع حراري شمسي مزود بلوح معدني مموج مزود بأنابيب (على شكل سربنتين)، ومجمع هجين PV/T مع لاقط كهروضوئي وقناة هواء. يوجد داخل الترموجات المعدنية أنابيب نحاسية لتدوير المياه. يتم دمج مجمعات الطاقة الشمسية مع نوعين من تخزين الطاقة؛ بطارية متصلة بمجمع PV/T لتخزين الكهرباء، وخزان ماء ساخن متصل بالمجمع الحراري مزدوج السوائل.

تم إجراء التحليل النظري للنظام الشمسي الهجين PV/T ثنائي السوائل استنادًا إلى مبدأ نقل الحرارة للعناصر المختلفة التي تشكل الأجهزة الشمسية مع الأخذ في الاعتبار التغير الحراري الديناميكي للمجمعات الشمسية.

لقد قمنا بتصميم المكونات الرئيسية (مجمع الطاقة الشمسية الهجين PV/T، والمجمع الحراري ثنائي السوائل)، وتم تطوير برنامج محاكاة رقمي يعتمد على معادلات نقل الطاقة لاختبار أداء الطاقة في النظام. تم تنفيذ العمل التجريبي، بالتعاون مع وحدة أبحاث الطاقات المتجددة (URER-MS) بأدرار، لتنفيذ وإختبار النظام موضوع هذا العمل بشكل تجريبي.

تم الحصول على نتائج مثيرة للاهتمام والتي تثبت الكفاءة الطاقوية للنموذج المقترح للنظام الشمسي المدمج وفائدته للتطبيقات الطاقوية في القطاع السكني وأيضا في القطاع الفلاحي في المواقع الريفية المعزولة.

Résumé

Le présent sujet propose une étude d'une configuration innovante d'un système solaire combiné et hybride thermique - Photovoltaïque/Thermique (PV/T) bi-fluides, où les deux fluides caloporteurs (air et eau) circulent en convection forcée. Ce système solaire hybride PV/T bi-fluides est adapté à des applications à moyennes températures et peut être intégré en toiture d'habitations. Il est constitué de deux capteurs solaires ; un capteur solaire thermique d'un absorbeur métallique nervuré et muni de tubes (de forme serpentin), et un capteur hybride PV/T module photovoltaïque et d'une conduite d'air. A l'intérieur des nervures, sont disposés des tubes en cuivre pour la circulation de l'eau. Les capteurs solaires sont intégrés avec deux type de stockage d'énergie ; une batterie reliée avec le capteur PV/T pour le stockage de l'électricité, et un ballon de stockage d'eau chaude relié avec le capteur solaire thermique bi-fluide.

L'analyse théorique de système solaire combiné hybride PV/T bi-fluide a été effectuée en se basant sur un bilan des transferts thermiques des différents éléments constituant les dispositifs solaires considérant le mode dynamique de fonctionnement du capteur.

La modélisation des principaux composants (capteur solaire hybride PV/T, Capteur bi-fluide) a été effectuée, et un programme de simulation numérique basé sur les équations du bilan énergétique a été développé pour tester les performances énergétiques du système. Un travail expérimental a été mené, en collaboration avec l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables (URER-MS), pour réaliser et tester expérimentalement le système objet de ce travail.

Des résultats intéressants ont été obtenus qui valident l'efficacité énergétique de la configuration proposée du système solaire combiné et son utilité pour des applications au secteur résidentiel et ainsi au secteur agricole dans des sites rurales isolés.

Abstract

This subject proposes a study of an innovative configuration of a combined solar and thermal hybrid system - Photovoltaic / Thermal (PV / T) bi-fluids, where the two heat transfer fluids (air and water) circulate in forced convection. This bi-fluid PV / T hybrid solar system is suitable for medium temperature applications and can be integrated into residential roofs. It consists of two solar collectors; a solar thermal collector with a ribbed metal absorber fitted with tubes (serpentine shaped), and a hybrid PV / T collector with photovoltaic module and an air duct. Inside the ribs are copper tubes for the circulation of water. Solar collectors are integrated with two types of energy storage; a battery connected with the PV / T collector for the storage of electricity, and a hot water storage tank connected with the dual-fluid solar thermal collector.

The theoretical analysis of a hybrid PV / T bi-fluid solar system was carried out based on a balance of heat transfers of the different elements constituting the solar devices considering the dynamic mode of operation of the collector.

The main components (PV / T hybrid solar collector, bi-fluid collector) were modeled, and a numerical simulation program based on energy balance equations was developed to test the energy performance of the system. Experimental work was carried out, in collaboration with the Renewable Energies Research Unit (URER-MS), to carry out and experimentally test the system that is the subject of this work.

Interesting results have been obtained which validate the energy efficiency of the proposed configuration of the combined solar system and its utility for applications in the residential sector and thus in the agricultural sector in isolated rural sites.

Sommaire

Résumé	i
Dédicaces	iv
Remerciements	vi
Sommaire	vii
Nomenclature	xi
Liste des abréviations	xv
Liste des figures	xvi
Liste des tableaux	xix
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralité et étude bibliographique	
I.1 Introduction	4
I.2 le soleil	4
I.3 L'énergie solaire	5
I.4 L'utilisation de l'énergie solaire	5
I.4.1 L'utilisation directe	5
I.4.2 Utilisation indirecte	6
I.5 les capteurs solaires	7
I.5.1 Capteur solaire photovoltaïque	7
I.5.2 capteur solaire thermique	10
I.6 Généralité sur l'hybridation	11
I.6.1.1 types des systèmes hybrides	12
I.7 Capteur solaire hybride	13
I.7.1 Les types des capteurs hybrides plans	14
I.8 Synthèse bibliographique	17
I.8.1 Capteurs solaires hybrides à air sans chicanes	17
I.8.2 Les capteurs thermiques bi-fluides	19
I.9 L'objectif de travail	21
I.10 Conclusion	21
Chapitre II : Etude théorique et modélisation	
II.1 Introduction	22
II.2 Étude électrique	22
II.2.1 Facteur de forme	23
II.2.2 Rendement de conversion	23

II.2.3 Influence des conditions météorologiques sur les caractéristiques d'un module PV	24
II.2.4 Variation des différentes caractéristiques électriques	25
II.3 Etude thermique	28
II.3.1 Hypothèses simplificatrices	28
II.3.2 Capteur solaire hybride PVT	29
II.3.3 Capteur thermique bi-fluide	34
II.3.4 Expressions d'échange thermique	38
II.3.5 Calcul des pertes thermiques	44
II.4 Conclusion	45
Chapitre III : Modèle numérique	
III.1 Introduction	46
III.2 Hypothèses simplificatrices pour la résolution	46
III.3 Modèle de résolution numérique	46
III.3.1 Simulation en utilisant le logiciel de programmation MATLAB	46
III.3.2 Modèle électrique	47
III.3.3 Modèle thermique	48
III.4 Les étapes générales du calcul	51
III.5 Les équations discrétisé	53
III.6 Conclusion	54
Chapitre IV : conception et réalisation expérimentale	
IV.1.Introduction	55
IV.2.Conception du système	55
IV.2.1. Le capteur solaire hybride PV/T	56
IV.2.2. Le capteur solaire thermique	56
IV.2.3. Batterie	57
IV.2.4. Ballon de stockage	57
IV.2.5. Une pompe	57
IV.2.6. Un ventilateur	57
IV.3. Montage expérimental	59
IV.3.1. Réalisation d'un capteur hybride	59
IV.3.2. Réalisation de capteur bi-fluide	59
IV.4. Instruments de mesures	64
IV.4.1. Mesure de la température	64

IV.4.2. Mesure du débit d'air	64
IV.4.3. Mesure du rayonnement solaire global	64
IV.4.4. Acquisition de données	65
IV.5. Conclusion	65
Chapitre V : Résultats & discussions	
V.1 Introduction	66
VI.2 Paramètres de conception	66
VI.3 Conditions opératoires	66
VI.4 Partie I : Validation du modèle numérique	70
V.4.1. Capteur hybride PV/T	70
V.4.2. Capteur thermique bi-fluide	73
VI.5 Partie II : Exploitation du modèle numérique	74
V.5.1. Capteur hybride	74
V.5.1.1. Partie thermique	74
V.5.1.2. Partie électrique	79
V.5.2. Capteur thermique bi-fluide	81
V.5.2.1. Capteur thermique bi-fluide combinée	81
V.5.2.2. Comparaison de performances entre un capteur bi-fluide combinée et individuel	83
VI.6. Partie III : évaluation expérimentale du système	84
V.6.1. Capteur hybride PV/T	84
V.6.2. Système combiné en Mode forcé et naturel	85
V.7. Conclusion	89
Conclusion générale	90
Références bibliographique	I
ANNEXES	i

Nomenclature

Caractères	Signification	unités
Caractères latins minuscules		
e_i	Épaisseur du composant i	m
h, e	Épaisseur de conduite	m
$h_{r,i-j}$	Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement entre deux composants i et j	W/m ² .K
$h_{c,i-j}$	Coefficient de transfert de chaleur par conduction entre deux composants i et j	W/m ² .K
$h_{v,i-j}$	Coefficient de transfert de chaleur par convection entre deux composants i et j	W/m ² .K
h_v	Coefficient de transfert par convection dû au vent	W/m ² .K
h_i, e_i	Épaisseur du composant i	m
k_i ou λ_i	Conductivité thermique du composant i	W/m.K
\dot{m}	Débit massique	kg/s
n	Facteur d'idéalité de la diode	-
np	Nombre de cellules montées en parallèle	-
ns	Nombre de cellules montées en série	-
q	Charge d'un électron	eV
r	Facteur de remplissage du module	-
t	Temps	s
Caractère latins majuscule		
A	Surface occupée par les cellules solaires sur le module PV	m ²
A_0	Constante pour calculer le courant de saturation de la diode	A/K ³
C_f	Coefficient de conversion	-
C_i	Chaleur spécifique du composant i	J/kg.k
C_p	Chaleur massique	J/kg.k
D_H	Le diamètre hydraulique	m
E_g	Energie de gap	eV

<i>ER</i>	Erreur relative	-
<i>FF</i>	Facteur de Forme	-
<i>G, G_i</i>	Flux solaire incident	W/m ²
<i>G_{ref}</i>	Éclairement de référence	W/m ²
<i>G_{NOCT}</i>	Éclairement qui est utilisé dans la notion NOCT	W/m ²
<i>I, I_{max}</i>	Intensité du courant électrique (intensité du courant électrique)	A
<i>I_{cc,ref}</i>	Intensité du courant de court-circuit de référence (intensité)	A
<i>I₀</i>	Intensité du courant de saturation de diode (intensité)	A
<i>I_D</i>	Intensité de flux solaire direct reçu à la surface de la Terre	W/m ²
<i>I_{cc}, I_{scc}</i>	Courant de court-circuit (intensité électrique)	A
<i>K</i>	Constante de Boltzmann	J/K
<i>M_i</i>	Masse du composant i	kg
<i>NOCT</i>	Température nominale de fonctionnement de la cellule solaire	°C
<i>P, P_{max}</i>	Puissance électrique	W
<i>R_i</i>	Résistance thermique du composant i	m ² .K/W
<i>R_{shunt}</i>	Résistance parallèle (résistance électrique)	Ω
<i>R_s</i>	Résistance série (résistance électrique)	Ω
<i>R_{s,ref}</i>	Résistance série de référence (résistance électrique)	Ω
<i>Q_i</i>	Puissance reçue ou perdue par composant i	W
<i>Q_{u,éle}</i>	Puissance électrique produite par le module PV	W
<i>Q_{u,ther}</i>	Puissance thermique produite par le capteur PV/T	W
<i>Q_p</i>	Puissance thermique perdue	W
<i>Q_{p,av}</i>	Puissance thermique perdue par l'avant du capteur	W
<i>Q_{p,ar}</i>	Puissance thermique perdue par l'arrière du capteur	W
<i>Q_{ther}</i>	Puissance thermique absorbé par le module photovoltaïque	W
<i>S_i</i>	Surface de composant i	m ²
<i>T</i>	Température	°C
<i>T_{max}</i>	Température maximale journalière	°C

T_{min}	Température minimale journalière	°C
T_{moy}	Température moyenne	°C
T_i	Température du composant i	°C
$T_{c,ref}$	Température de cellule de référence	°C
U_{av}	Coefficient de pertes thermiques sur la surface avant du capteur	W/m.K
U_{ar}	Coefficient de pertes thermiques sur la surface arrière du capteur	W/m.K
V, V_{max}	Tension électrique	V
$V_{co,ref}$	Tension électrique de référence	V
V_{co}, V_{sco}	Tension électrique de circuit ouvert	V
V_f	Vitesse du fluide	m/s
V_v	Vitesse du vent	m/s
Caractères grecs minuscules		
α_i	Absorptivité du composant i	-
τ_i	Transitivité du composant i	-
Caractères	Signification	unités
ε_i	Émissivité du composant i	-
ε	Critère de convergence	-
β_v	Coefficient de variation de la tension électrique de circuit ouvert en fonction de la température	V/°C
β_T	Coefficient de température	K ⁻¹
α_I	Coefficient de variation du courant de court-circuit en fonction de la température	A/°C
γ	Coefficient de rayonnement solaire	-
φ	Angle d'inclinaison du capteur	°
σ	Constante de STEFAN-BOLTZMANN	$\frac{W}{m^2} \cdot K^{-4}$
$\Delta\lambda$	Largeur de bande	nm
λ	Longueur d'onde	nm

ρ_i	Masse volumique	kg/m ³
$\eta_{\acute{e}le}$	Rendement de conversion électrique	-
η_{ther}	Rendement de conversion thermique	-
η_g	Rendement de conversion global	-
$\eta_{eq,g}$	Rendement équivalent thermique global	-
μ_f	Viscosité dynamique du fluide	kg/ (m.s)
Nombre adimensionnels		
P_r	Nombre de Prandtl	-
G_z	Nombre de Graetz	-
N_u	Nombre de Nusselt	-
R_e	Nombre de Reynolds	-

ABREVIATION ET INDICE

<i>av</i>	avant
<i>ar</i>	arrière
<i>amb</i>	ambient
<i>c</i>	cellule
<i>v</i>	vitre
<i>se</i>	serpentine
<i>pm</i>	Plaque métallique
<i>is</i>	isolant
<i>p, sh</i>	Parallèle, shunt
<i>éle</i>	électrique
<i>ther</i>	thermique
<i>g</i>	global
<i>f,e</i>	Fluide entrée
<i>f,s</i>	Fluide sortie
<i>Tmoy</i>	Température moyenne
<i>ab</i>	absorbeur

Liste des figures
Chapitre I : Généralité et étude bibliographique

Figure. I.1	Carte du monde de l'irradiation moyenne annuelle sur un plan horizontal	4
Figure. I.2	Organigramme représentant les différents procédés de l'exploitation de l'énergie solaire	6
Figure. I.3	représentation schématique de l'utilisation d'énergie solaire	7
Figure. I.4	Représentation schématique d'un panneau photovoltaïque	8
Figure. I.5	Principe de fonctionnement d'un capteur PV	8
Figure. I.6	représentation schématique de Différentes technologies	9
Figure. I.7	(a) Capteur solaire thermique à air, (b) capteur solaire thermique à eau	10
Figure. I.8	Coupe transversale d'un capteur solaire.	10
Figure. I.9	représentation schématique des types de capteur solaire	11
Figure. I.10	Capteur solaire hybride PV/T à air sans chicane	14
Figure. I.11	Capteur solaire hybride PV/T à air avec chicane	15
Figure. I.12	Schéma représente un capteur solaire hybride PV/T type sheet and tube	15
Figure. I.13	Schéma représente un capteur PV avec canal	16
Figure. I.14	Schéma représente un capteur solaire hybride libre circulation.	16
Figure. I.15	Schéma représente un Capteur solaire hybride PV/T à eau avec deux absorbeurs.	17
Figure. I.16	Capteur solaire hybride PV/T à triple fonction	17
Figure. I.17	Image de l'installation expérimentale du capteur hybride PV/T à air, réalisé à New Delhi (Inde)	18
Figure. I.18	séchoir solaire agricole réalisé par M.E.A. SLIMANI.	19
Figure. I.19	Configuration expérimentale développé par Chao Guo et al. [9] : (a) mode PV/air ; (b) mode PV/eau.	20
Figure. I.20	Conception d'un capteur hybride bi-fluide PV/T en plusieurs modes pour déterminer la configuration optimale.	20
Figure. I.21	Banc d'essai du capteur solaire bi-fluide (PV/T) utilisé par Y.B. Assoa et al.	20

Chapitre II : Modélisation et étude théorique

Figure II.1	Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque	22
Figure II.2	la caractéristique $I(v)$ d'un panneau photovoltaïque.	23
Figure II.3	l'influence de l'irradiation sur le courant et la puissance en fonction de la tension.	24
Figure II.4	Influence de la température sur les caractéristiques.	25
Figure II.5	Répartition énergétique dans le capteur hybride.	29
Figure II.6	Figure descriptive des différents composants de notre capteur bi-fluide.	34
Figure II.7	Les échanges thermiques dans le capteur bi-fluide.	35
Figure II.8	Schéma équivalent des résistances thermiques pour le capteur hybride.	39
Figure II.9	Schéma équivalent des résistances thermiques pour le capteur bi-fluide.	40

Chapitre III : Modèle numérique

Figure III.1	Organigramme des étapes de calcul suivies pour la résolution électrique du capteur PV-T	47
Figure III.2	Organigramme des étapes de calcul suivies pour la résolution des équations de bilan thermique du capteur PV/T.	49
Figure III.3	Organigramme des étapes de calcul suivies pour la résolution du problème du capteur bi-fluide.	50

Chapitre IV : conceptions et réalisation expérimentale

Figure IV.1	Un schéma d'illustration du système étudié.	55
Figure IV.2	Représentation schématique de notre capteur hybride PV/T à double écoulement.	56
Figure IV.3	descriptive des différents composants de notre capteur bi-fluide	56
Figure IV.4	Image de batterie utilisé.	57
Figure IV.5	Image de ballon de stockage.	57
Figure IV.6	Image de la pompe.	57
Figure IV.7	Image du ventilateur.	57
Figure IV.8	Image représentant la plaque absorbante et la serpentine.	59
Figure IV.9	Image représente (a) Ajoutassions la silicone pour éviter les fuites d'air, (b) Installation un serpentine sur l'absorbeur.	60
Figure IV.10	Image représentant les outils utilisés dans l'installation.	60
Figure IV.11	Le capteur bi-fluide après avoir terminé la peinture.	61
Figure IV.12	Des images de quelques points où les thermocouples sont installés.	61
Figure IV.13	image représente Installation le verre sur les capteurs solaire.	62
Figure IV.14	Une image montrant l'angle d'inclinaison du support métallique.	62
Figure IV.15	Image représente le ballon de stockage et son support métallique.	63
Figure IV.16	image représentant le système solaire étudié dans sa dernière forme.	63
Figure IV.17	les thermocouples.	65
Figure IV.18	anémomètre à fil chaud.	65
Figure IV.19	Pyranomètre.	65
Figure IV.20	Acquisition de données.	65

Chapitre V : Résultats & discussions

Figure V.1	Variation temporelle l'éclairement solaire (a) et de la température ambiant (b) pour la journée du 11/09/2020 .	68
Figure V.2	Variation temporelle l'éclairement solaire (a) et de la température ambiant (b) pour la journée du 17/09/2020 .	69
Figure V.3	L'évolution simulée et expérimentale de la température du vitre du capteur PVT.	70
Figure V.4	L'évolution simulée et expérimentale de la température des cellules du capteur PVT	71
Figure V.5	L'évolution simulée et expérimentale de la température de Tedlar du capteur PVT	71
Figure V.6	L'évolution temporelle de la puissance électrique simulée et expérimentale	72
Figure V.7	L'évolution temporelle du rendement électrique simulé et expérimentale.	72
Figure V.8	L'évolution temporelle du rendement global simulé et expérimentale	73
Figure V.9	L'évolution temporelle de la puissance thermique simulée et expérimentale.	73
Figure V.10	L'évolution temporelle du rendement thermique global simulé et expérimentale.	74
Figure V.11	Évolution temporelle de températures des différents composants du capteur hybride à double écoulement.	75
Figure V.12	Variation temporelle comparative de température des cellules pour un module PV et le capteur hybride PV-T.	76
Figure V.13	Variations temporelle des températures d'air en sortie des deux canaux du capteur hybride.	76
Figure V.14	Evolution de la puissance thermique en fonction de temps pour le module PV et le capteur PV-T.	77
Figure V.15	Évolution du rendement thermique du capteur hybride en fonction du temps.	77
Figure V.16	Variations temporelle du rendement thermique global pour le module PV et le capteur PV/T.	78
Figure V.17	Variations temporelle du courant au point MPP.	79

Figure V.18	Variations temporelle de la tension au point MPP.	79
Figure V.19	L'évolution horaire comparative de la puissance électrique du module PV et du capteur PV-T	80
Figure V.20	L'évolution horaire comparative du rendement électrique du module PV et du capteur PV-T	80
Figure V.21	Variation horaire de température du vitre, plaque absorbante, plaque métallique, et serpentin de capteur bi-fluide.	81
Figure V.22	Variation horaire de la température de l'air en sortie du canal supérieur et du canal inférieur, et la température ambiante.	82
Figure V.23	Variation horaire de la température de l'eau à l'entrée et à la sortie du capteur.	82
Figure V.24	L'évolution temporelle de la puissance thermique dans les deux cas.	83
Figure V.25	Évolution temporelle du rendement thermique dans les deux cas.	83
Figure V.26	Évolutions horaire des différentes températures du capteur hybride PV/T.	84
Figure V.27	Évolutions horaire des températures d'air en sortie du système combiné pour les deux canaux.	84
Figure V.28	Évolutions horaire des températures des différents composants du capteur bi-fluide, en mode naturel.	85
Figure.V.29	Évolutions horaire de la température d'eau en entrée et en sortie du système combiné en mode forcé.	86
Figure.V.30	Évolutions horaire de la température d'eau en entrée et en sortie du système combiné en mode naturel	86
Figure V.31	variation horaire de la puissance thermique globale en mode naturel	87
Figure V.32	Variation horaire de puissance thermique en mode forcé.	87
Figure.V.33	Variation horaire du rendement thermique global en mode naturel	88
Figure.V.34	Variation horaire du rendement thermique global en mode forcé.	88

Liste des tableaux

Chapitre IV

Tableau IV.1	Les différents paramètres géométriques et de design du capteur solaire hybride et bi-fluide.	58
---------------------	--	----

Chapitre V

Tableau V.1	Paramètres et caractéristiques électriques d'un module PV monocristallin UDTS50.	66
Tableau V.2	Paramètres et propriétés thermo-physiques de différents composants du système étudié.	67
Tableau V.3	Les conditions opératoires de débit et de vitesse des fluides	70

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Actuellement, l'électricité et la chaleur sont les deux formes d'énergie finale les plus consommées par l'être humain, pour lesquels d'énormes projets et un budget énorme ont été mobilisés pour soutenir les infrastructures et les fournir en permanence.

Néanmoins, nous souffrons toujours de certains problèmes liés à ce secteur, notamment dans le désert et les zones reculées. Compte tenu des vastes zones et de l'espacement des zones de population, il est difficile d'étendre le réseau électrique de toutes les parties. Surtout dans les régions éloignées, car les coûts de connexion des services d'infrastructure d'énergie électrique sont chers, et compte tenu des normes de planification, il n'est pas pratique de transférer les réseaux électriques vers des zones éloignées et petites par des lignes à haute tension, et leur fourniture nécessite une capacité technique, financière et temporelle suffisante.

D'un autre côté, les besoins énergétiques des sociétés ne cessent d'augmenter. De plus, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour assurer leur développement.

L'orientation vers des énergies propres dans diverses sources nouvelle et renouvelables est devenue impérative, en particulier l'énergie solaire, étant les énergies renouvelables les plus abondantes. L'Algérie occupe une position privilégiée pour l'exploitation de l'énergie solaire grâce à sa position géographique stratégique. Avec une durée d'ensoleillement dépassant les 2000 heures par an, elle a un gisement solaire parmi les plus élevés au monde (près de 5 milliards GWh). De ce fait, l'énergie solaire demeure une solution incontournable pour l'Algérie pour faire face aux déficits énergétiques. Parmi les procédés technologiques basés sur le principe de la conversion de l'énergie solaire, on trouve le capteur solaire thermique qui consiste à absorber le rayonnement solaire et ensuite le convertir en chaleur.

Les recherches scientifiques sur les capteurs solaires s'accroissent surtout ces dernières années où le monde est en pleine transition énergétique afin d'améliorer l'efficacité énergétique de ces capteurs et optimiser leurs performances par l'amélioration de leurs géométries, l'utilisation de matériaux plus performants et la réduction des déperditions thermiques vers l'environnement extérieur.

Pour suivre les progrès technologiques dans ce domaine, on propose de faire une étude, dans le cadre de ce mémoire de master, d'un système solaire combiné composé de deux capteurs « un capteur solaire hybride Photovoltaïque/Thermique (PV/T) et un capteur solaire bi-fluide (eau/air) » fonctionnant en convection forcée.

- ✚ Un capteur solaire hybride PV/T, présente une technologie qui combine le solaire photovoltaïque et le solaire thermique. Le capteur solaire hybride PV/T est donc un dispositif qui consiste à superposée les deux fonctions énergétiques (électrique et thermique) pour produire simultanément de l'énergie électrique et de la chaleur, et ce dans un seul cadre.
- ✚ Les capteurs solaires bi-fluides ont commencé à faire leurs apparitions comme une solution énergétique intéressante dans le secteur des énergies renouvelables. Ils permettent de produire simultanément de l'eau et l'air chaud. Le rendement de conversion thermique global d'un capteur solaire bi-fluide étant supérieur à celui du capteur solaire classique, il demeure une solution incontournable.

Afin d'augmenter l'efficacité énergétique d'un système de capteur solaire pour des applications élargies, l'idée est venue à proposer une configuration innovante qui repose sur l'association entre un capteur thermique bi-fluide et un capteur hybride PV/T. Cette configuration est pour, à la fois, produire de l'électricité et la stocker pour la fonction autonome des différents composants électriques associés (ventilateur, pompe...) et produire de la chaleur à l'aide de deux moyens de transport thermique (l'eau et l'air) pour des utilisations réclamants de la chaleur (séchage solaire, stockage d'eau chaude).

L'architecture du mémoire suivra donc le déroulement du travail tel qu'il est mené. On y trouve ainsi :

- Un premier chapitre regroupant quelques généralités sur le soleil, les capteurs solaires (photovoltaïques et thermiques) et sur l'hybridation/combinaison et une synthèse bibliographique sur les principales recherches effectuées sur les capteurs hybrides à air et sur les capteurs thermiques bi-fluides.
- Deuxième chapitre comprend une étude théorique des différentes caractéristiques électriques d'un capteur solaire, et des bilans thermiques qui résument les différents échanges thermiques dans chaque dispositif.
- Le troisième chapitre sera consacré au modèle de simulation numérique réalisé et l'algorithme de calcul.
- Le quatrième chapitre sera dédié à donner un aperçu introductif de tous les composants de la configuration étudiée avec leurs caractéristiques géométriques et thermo-physiques, et à l'investigation pratique du système solaire qui fait l'objet de notre étude.

- Le dernier chapitre réservé aux résultats de simulation numérique et les résultats expérimentaux obtenus à partir de plusieurs essais et mesures.

Ce manuscrit se terminera par une conclusion générale résumant l'ensemble des résultats trouvés, et ainsi des perspectives qui vont faire l'objet de la suite de ce travail dans le cadre d'un éventuel doctorat.

Chapitre I

Généralité et étude bibliographique

I.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous donnerons un aperçu inductif sur l'énergie solaire et les divers moyens de l'exploiter par les différents types de capteurs solaires. Plus tard nous introduisons le concept d'hybridation et combinaison qui nous le considérons comme une solution au problème de l'efficacité de conversion. Une synthèse bibliographique basée sur les travaux de recherches récentes menés dans le cadre de cette thématique est présenté à la dernière partie de ce chapitre.

Partie I : Généralités et conceptions

I.2. Le soleil

Le soleil est une sphère avec une matière extrêmement chaude et gazeuse avec un diamètre de $1,39 \cdot 10^9 m$, et est à distance moyenne de $1,49 \cdot 10^{11} m$ de la terre. Comme vu de la terre, le soleil tourne autour de son axe une fois toutes les quatre semaines, cependant il ne tourne pas comme un corps solide ; une rotation est faite en 27 jours à l'équateur et en 30 jours aux régions polaires. Il est considéré comme un corps noir avec une température effective de $5777^{\circ}K$, et rayonne principalement dans le visible et le proche infra-rouge (de 300 nm à 1200 nm) avec un maximum aux environs de 500 nm.

Cette énergie est produite par les réactions de fusion dans le soleil et est filtrée par l'atmosphère. Le rayonnement solaire apporte sur terre une énergie de 2000 à 2500 KWh/m^2 par an, ce qui est supérieur à la totalité des ressources fossiles jamais découvertes (Voir Figure I.1).

La quantité d'énergie exploitable de ces ressources malheureusement "non renouvelables" ne représente que 0,5 % de ce que nous recevons chaque année par rayonnement solaire [1].

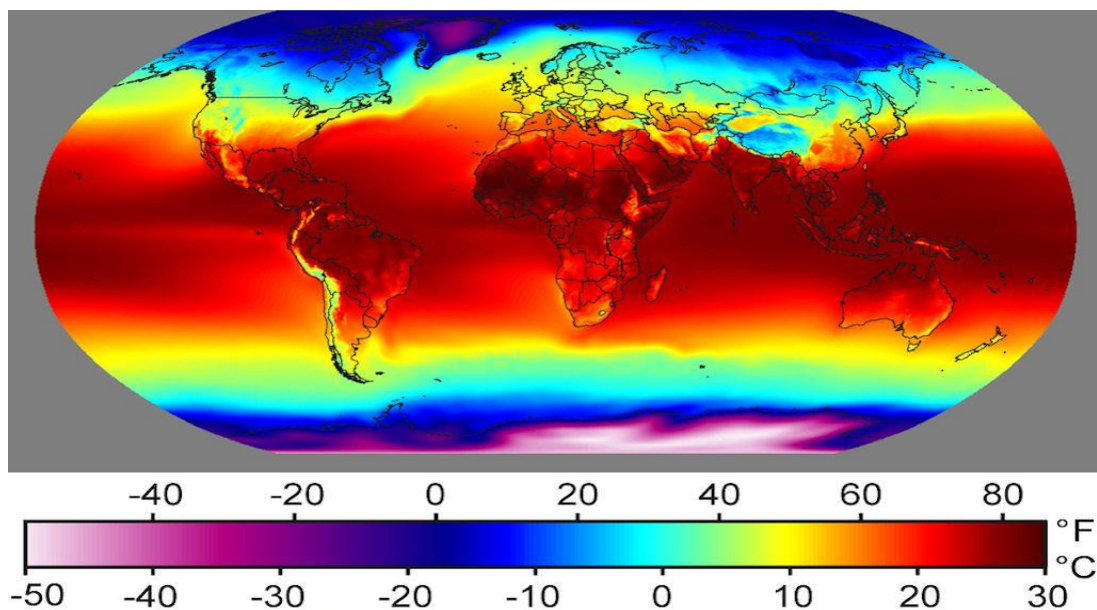


Figure I.1. Carte du monde de l'irradiation moyenne annuelle sur un plan horizontal. [2]

I.3. L'énergie solaire

Le soleil représente la source d'énergie la plus abondante sur terre. Elle est à l'origine de la majorité des énergies renouvelables Soit d'une façon direct ou indirect.

L'irradiation solaire peut être utilisée pour produire soit directement de l'électricité à l'aide de panneau photovoltaïque, soit de la chaleur solaire calorifique pour le chauffage ou la production électrique. [1] On peut exploiter L'énergie solaire reçue sur la Terre en utilisant trois types de convertisseur solaire :

- Les convertisseurs solaires photovoltaïques (Modules photovoltaïques).
- Les convertisseurs solaires thermiques (Capteurs solaires thermiques).
- Les convertisseurs solaires thermodynamique.

I.4. L'utilisation de l'énergie solaire

I.4.1. L'utilisation directe

Il y a trois manières de transformer l'énergie solaire "directement" : thermodynamique, thermique et photovoltaïque figureI.4.

- **L'électricité solaire thermodynamique**

Cette technique basée sur l'échauffement d'un fluide caloporteur à haute température par l'irradiation solaire pour la production d'électricité ou l'alimentation en énergie de procédés industriels. On distingue les capteurs paraboliques ou cylindro-paraboliques, et des centrales dites "à tour". La technologie de réflecteurs cylindro-paraboliques est la plus fréquente. Elle nécessite un ensoleillement très fort, une grande température et une surface au sol importante. De ce fait, les centrales utilisant cette technologie, sont souvent construites dans les déserts ou autres zones arides du globe.

- **L'énergie solaire thermique**

L'énergie solaire calorifique est utilisée essentiellement pour le chauffage de l'eau chaude sanitaire et le chauffage des habitations des piscines encore au séchage des récoltes. Cette application basée sur l'utilisation des capteurs solaires thermique installés qui absorbent le flux solaire et le converti directement en chaleur et le transmettre à un ballon de stockage destiné à atténuer la discontinuité de l'ensoleillement et à alimenter les systèmes de production d'eau chaud.

- **L'électricité solaire photovoltaïque**

L'effet photovoltaïque (PV) est la base de la conversion de l'énergie lumineuse en électricité. Lorsque le rayonnement solaire, atteint une cellule PV, donne assez d'énergie pour certains électrons pour élever leur niveau d'énergie et donc les libérer. Une barrière potentielle intégré

dans la cellule agit sur ces électrons pour produire une tension, qui à son tour est utilisée pour entraîner un courant à travers un circuit. Il existe deux façons d'exploiter l'électricité solaire photovoltaïque : par sa fourniture en sites isolés ou par son injection dans un réseau électrique

I.4.2. L'utilisation indirecte

Les processus naturels transforment l'énergie solaire indirectement en d'autres types d'énergie (figure I.4).

- **Energie hydraulique.**
- **Energie éolienne.**
- **Biomasse.**

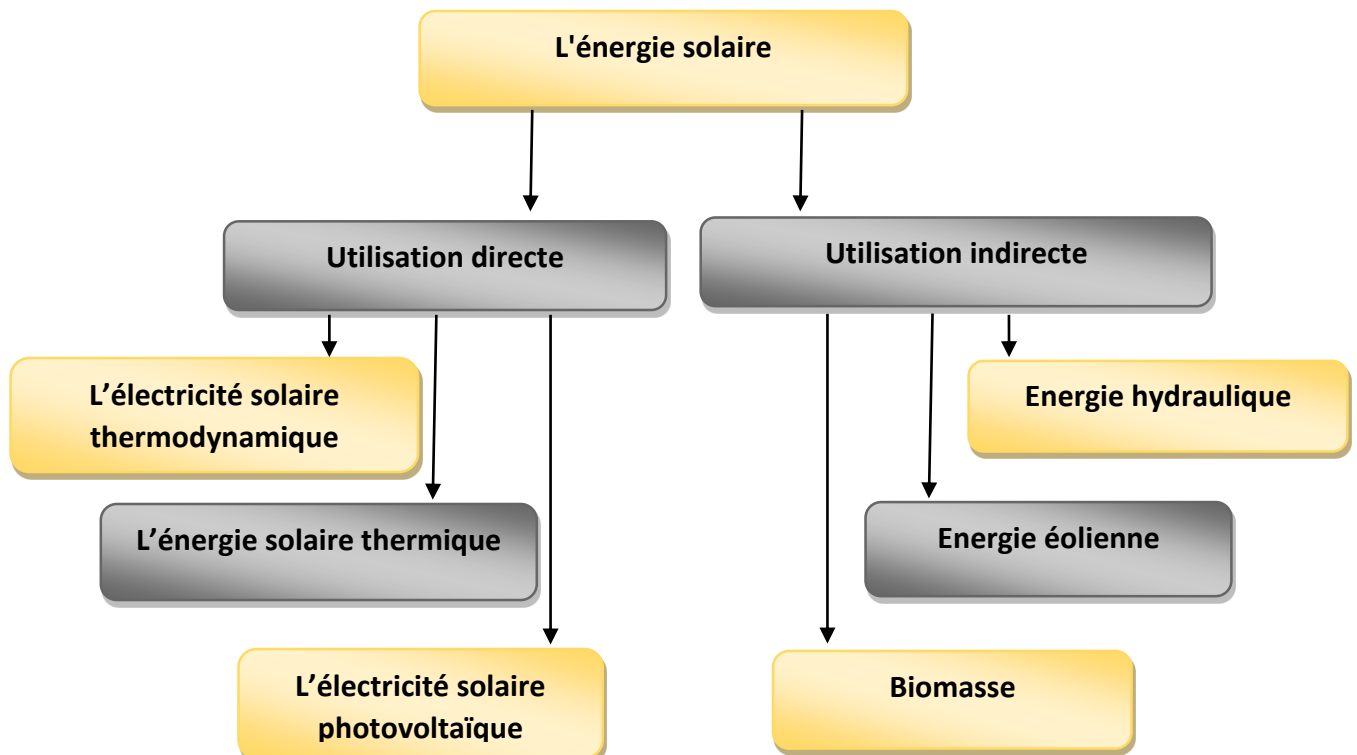


Figure I.2. Représentation schématique de l'utilisation d'énergie solaire.

L'énergie solaire peut être exploitée directement soit pour la production d'électricité à travers les panneaux PV ou l'utilisation directe de l'énergie calorifique solaire à travers les capteurs thermiques, ou la production simultanément des deux types d'énergies par la technologie d'hybridation, comme le résume la figure suivante :

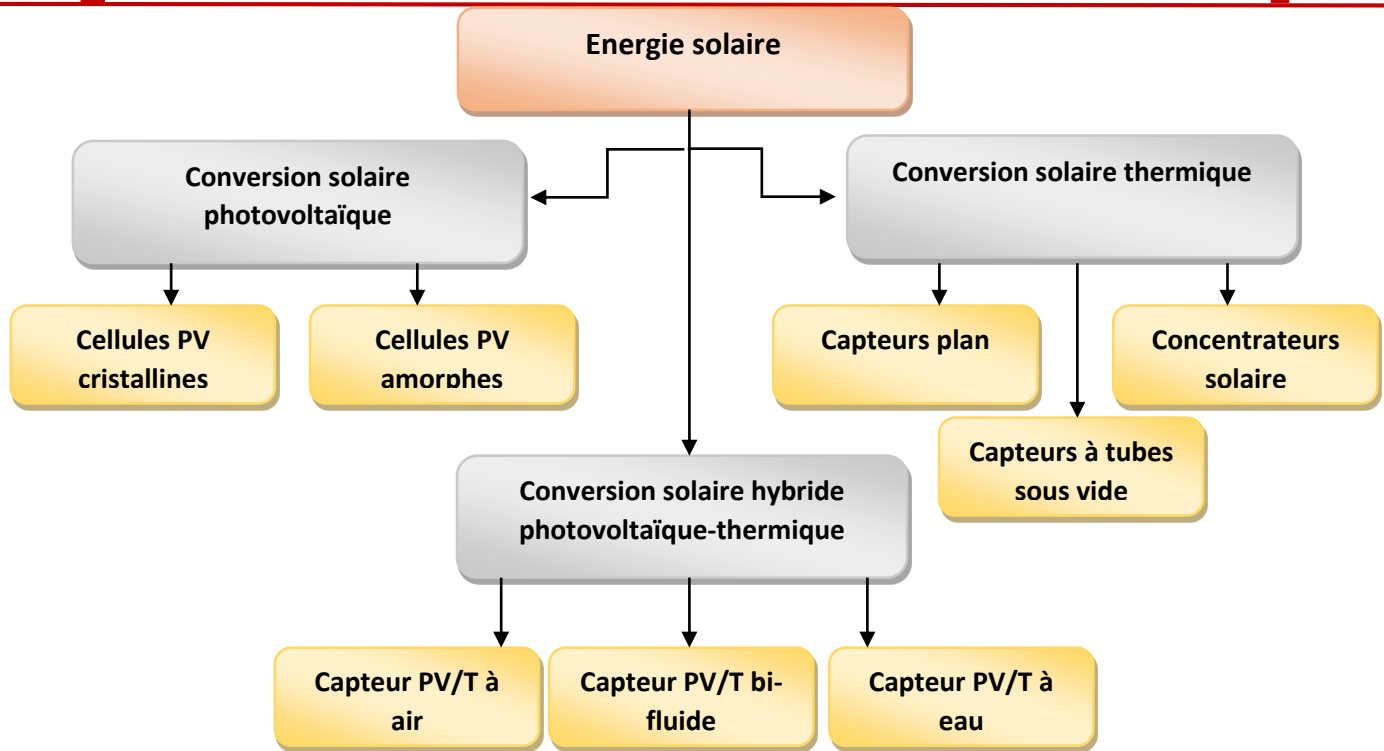


Figure I.3. Organigramme représentant les différents procédés de l'exploitation de l'énergie solaire.

- ✓ Étant donné que notre étude tourne autour de l'utilisation directe de l'énergie solaire par les capteurs solaires, un aperçu de ces panneaux doit être fourni.

I.5. Capteurs solaires

I.5.1. Capteur solaire photovoltaïque

Le principe de fonctionnement d'un capteur solaire photovoltaïque (PV) est basé sur le phénomène de l'effet photoélectrique à travers l'interaction directe du rayonnement (photons) solaire avec les électrons en produisant de l'électricité (**Figure. I.5**). Un module PV conventionnel absorbe entre 80 % et 90% du rayonnement incident pour produire 12% à 18% d'énergie électrique. La grande partie de l'énergie solaire absorbée ne transforme pas et dissipe sous forme de chaleur. Cette dissipation augmente la température du panneau photovoltaïque et réduit les performances électriques. [3]

Un module photovoltaïque se compose de :

- Une couche protectrice de verre.
- Une couche d'EVA de polymère éthylène-vinyl- acétate.
- Les cellules photovoltaïques à base du matériau de silicium mono ou poly-cristallin, amorphe d'autre matériau semi-conducteur.
- Les grilles collectes qui relient les cellules entre elle, en série ou en parallèle.
- Une couche de matériau de Tedlar en dessous des cellules photovoltaïques pour protéger l'arrière de ces dernières contre l'humidité.

- Un couvert métallique qui regroupe la structure.

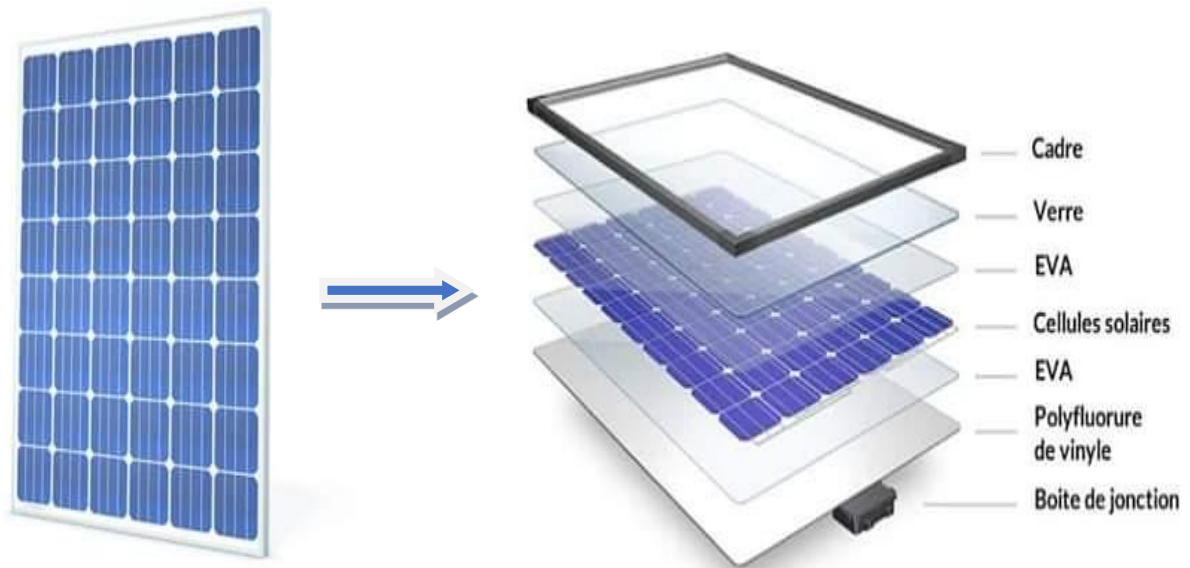


Figure I.4. Représentation schématique d'un panneau photovoltaïque. [15]

❖ Principe de fonctionnement d'une cellule PV

Une cellule PV est l'élément de la base de conversion photopile elle réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée **P** (dopée au bore) et l'autre dopée **N** (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction **PN** avec une barrière de potentiel (**figure I.5**).

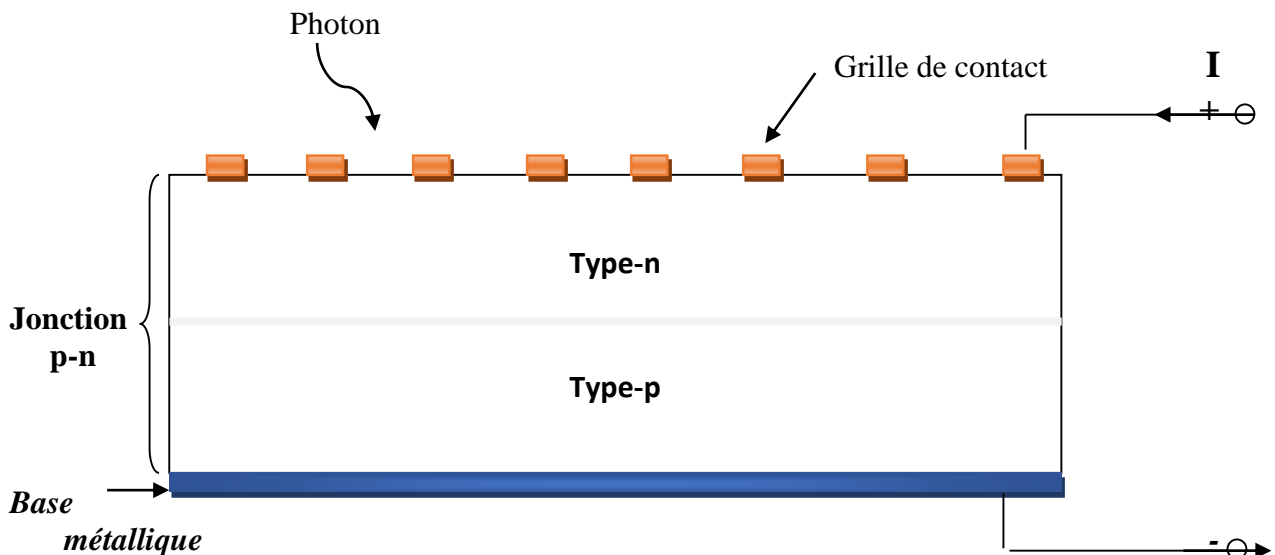


Figure I.5. Principe de fonctionnement d'un capteur PV

Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux Atomes de la jonction **PN** de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charge **N**) et des trous (charge **P**). Ceci crée alors une différence de potentiel électrique entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule.

La tension électrique maximale de la cellule est d'environ **0,6 V** pour un courant nul.

Cette tension est nommée tension de circuit ouvert.

Le courant électrique maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit et dépend fortement du niveau d'éclairement.

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module.

La connections en série de plusieurs cellules augmente la tension électrique pour un même courant, tandis que la mise en parallèle de cellules accroît l'intensité électrique du courant en conservant la tension électrique. Les cellules sont protégées de l'humidité par une encapsulation dans un polymère EVA (Ethylène-Vynil- Acétate), et protégées sur la surface avant par une couche de verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une couche de polyéthylène. [4]

❖ Différentes technologique

Il existe différent type de cellule photovoltaïque suivant leurs caractéristiques (le rendement et le cout), on peut distinguer quelque génération :

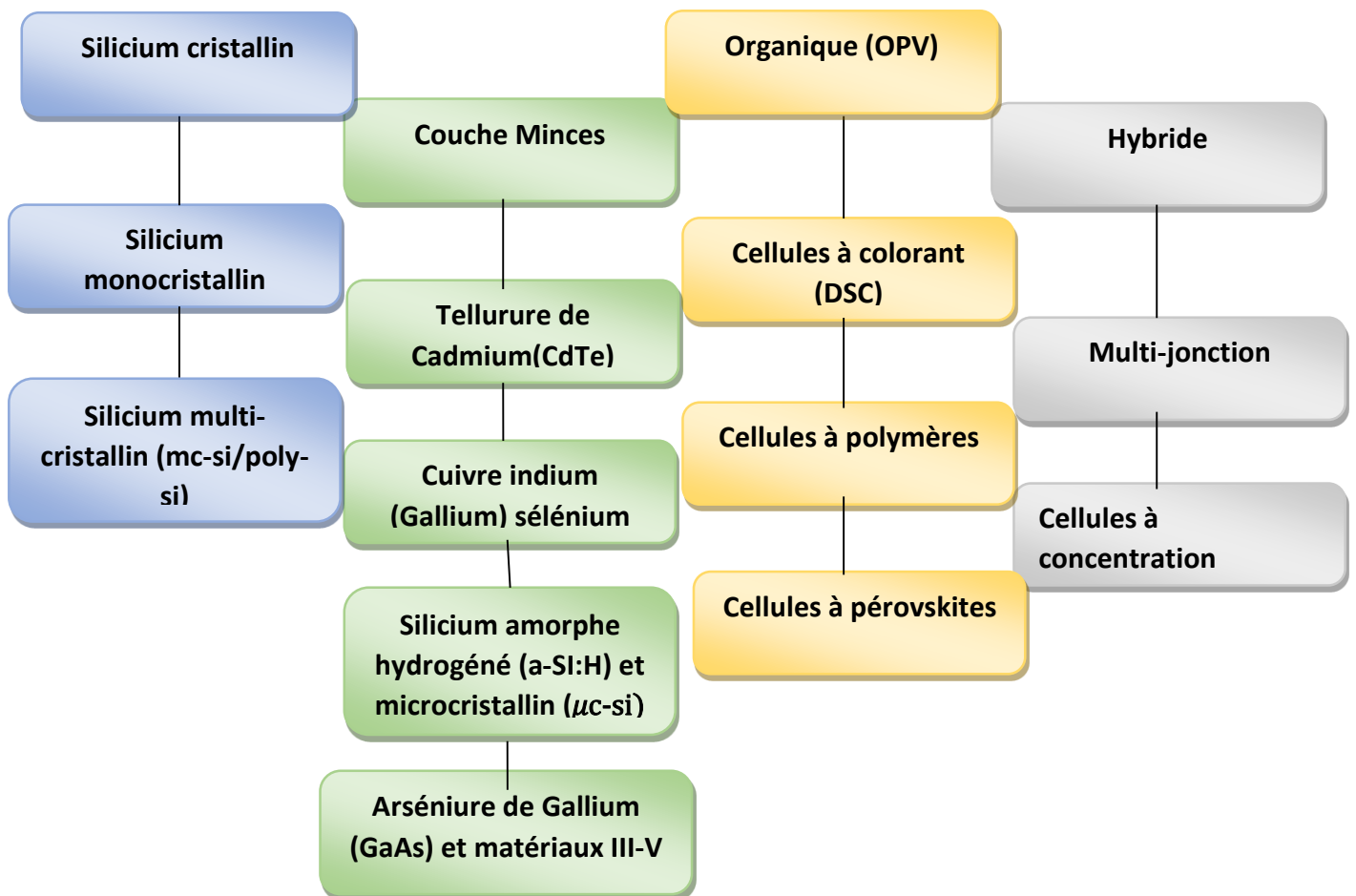


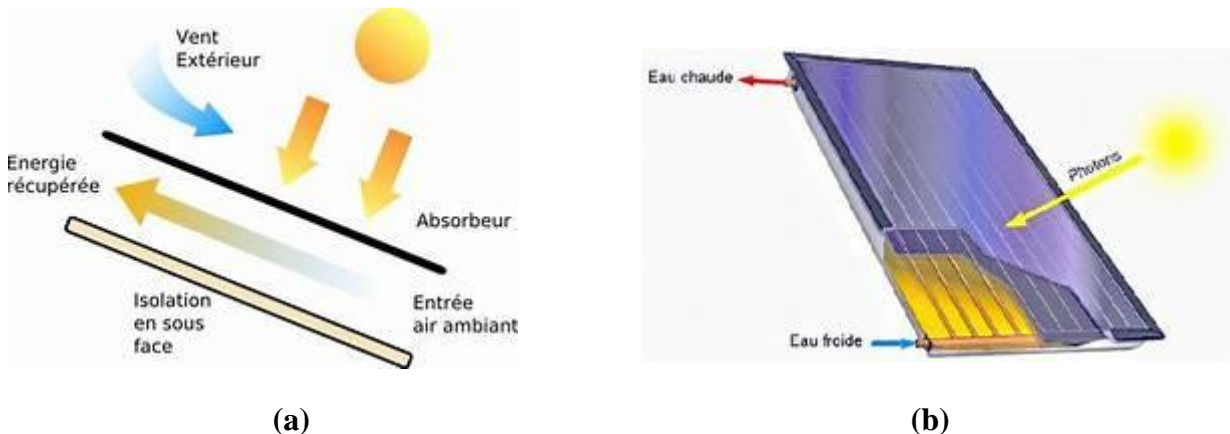
Figure I.6. Représentation schématique de Différentes technologies

I.5.2. Capteur solaire thermique

Le rôle d'un capteur solaire thermique est de convertir le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie calorifique utilisable. Un capteur solaire thermique a pour tâche de collecter le rayonnement solaire incident pour récupérer l'énergie thermique véhiculée par ce rayonnement. La chaleur produite est transporté par un fluide caloporteur (eau ; air ; nano-fluide...etc.).

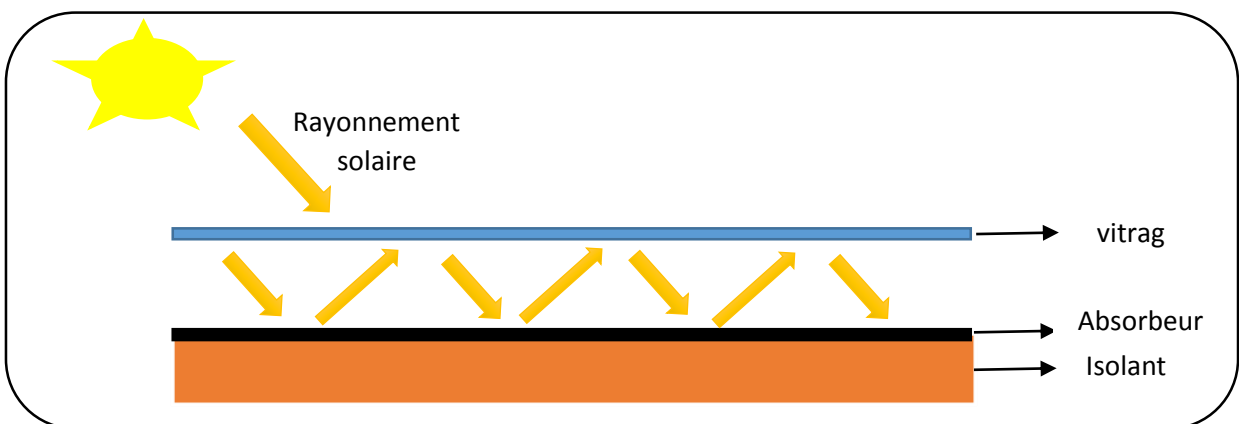
❖ Eléments constitutifs

Un capteur solaire thermique à air ou à eau est constitué principalement d'une couverture transparente, d'un absorbeur, d'une conduite permettant au fluide de collecter l'énergie cédée par l'absorbeur, d'un isolant et d'un boîtier. [4]



❖ Principe de fonctionnement

Quand l'énergie solaire passe à travers la couverture transparente et entre en contact avec la surface noire de l'absorbeur, une grande partie est absorbée et transférée au fluide circulant à l'intérieur de capteur, La partie arrière de l'absorbeur est généralement constituée d'une couche isolante qui réduit les pertes par conduction. Les tubes peuvent être soudés à la plaque absorbante ou ils peuvent faire partie intégrale de la plaque [5]



❖ Différents types

On peut distinguer plusieurs types de capteurs solaires thermiques plans selon le fluide qui circule à travers l'absorbeur (voir la figure I.10).

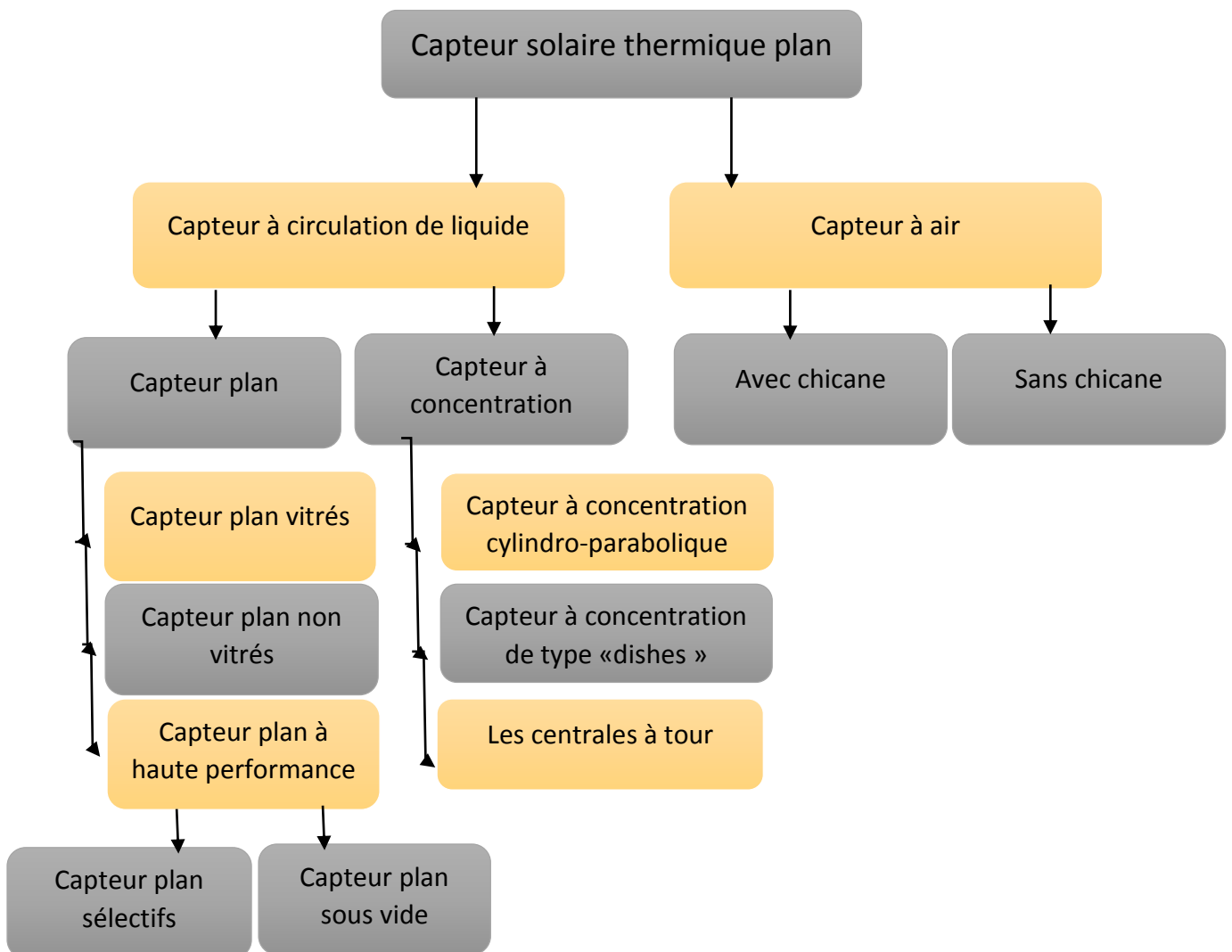


Figure I.9. Représentation schématique des types de capteur solaire

I.6. Généralité sur l'hybridation

Le problème avec la puissance variable et non garantie produite par les sources d'énergie renouvelables, peut être résolu par un couplage des sources d'approvisionnement et la formation d'un système dit hybride (SH). Un système hybride à sources d'énergie renouvelables (SHSER), est un système électrique comprenant plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une au moins est renouvelable. Le système hybride peut comprendre un dispositif de stockage. D'un point de vue plus global, le système énergétique d'un pays donné peut être considéré comme un système hybride. [6]

I.6.1. Types des systèmes hybrides

❖ Systèmes photovoltaïque/source conventionnelle

Cette hybridation est souvent utilisée dans des sites qui se caractérisent par un climat chaud et a potentiel d'énergie important [7]. Ce système couplé à un groupe électrogène s'applique particulièrement bien à des sites isolées et éloignés [8], où un groupe électrogène est associé à un système photovoltaïque. Il a la capacité d'augmenter l'approvisionnement en électricité au cours de l'augmentation soudaine de la demande d'énergie ou lorsque la capacité des batteries diminue, et contribue ainsi à augmenter la durée de vie des batteries et à fournir des services publics sans interruption.

❖ Systèmes éolien/source conventionnelle

Les systèmes hybrides éolien/diesel diffèrent des systèmes hybrides photovoltaïques car les éoliennes sont capables de produire du courant alternatif identique à celui produit par le générateur diesel contrairement au système photovoltaïque qui produisent du courant alternatif et de cette façon il n'y a pas une grande diversité des configurations du système hybride. Ces systèmes sont plus répandus sur les îles, où la mer est bénie par les vents et où l'énergie éolienne est préférée pour la production d'électricité. [6]

❖ Système hybride photovoltaïque/éolien

Ce système hybride est basé sur l'exploitation de ressources purement renouvelable et c'est le plus grand avantage, sauf que le principal inconvénient est le manque de diversité de l'alimentation parce que les ressources primaires utilisées sont uniques. Cela induit plusieurs inconvénients tel que le surdimensionnement des éléments dont l'objectif est d'assurer une alimentation continue, ce qui va se traduire par un investissement initial élevé. Pour résoudre ce problème, une autre source d'énergie conventionnelle doit être incorporée [6]

❖ Systèmes photovoltaïque/éolien/diesel

Il s'agit d'un couplage de plusieurs systèmes énergétiques (vent, solaire, diesel), afin de rendre les variables d'entrée moins aléatoires, et d'autre part à chercher un stockage optimal. L'objectif principale de ce type est de diversifier les sources d'énergie renouvelables. [6] et réduire la quantité de carburant consommée car les sources renouvelables peuvent se compléter et fournir plus d'énergie.

Il y a un autre type d'hybridation (ou combinaison) qui utilise une seule source d'énergie, énergie solaire (lumineuse/ thermique) pour produire deux formes d'énergie (l'électricité / la chaleur)

Partie II : les capteurs hybrides et étude bibliographique.

Le module PV conventionnel permet de convertir le rayonnement solaire en énergie électrique. Sous l'effet des rayons solaires absorbés et de la chaleur dissipée par les cellules photovoltaïques, le niveau de la température du module augmente avec l'augmentation de l'intensité du rayonnement solaire. Ce qui affecte le rendement électrique du module photovoltaïque.

I.7. Capteur solaire hybride

Un capteur hybride photovoltaïque/thermique (PV/T) est un dispositif qui associe un module photovoltaïque et un capteurs solaires thermiques permettant de réaliser une conversion électrique de rayonnement solaire et une récupération de chaleur en même temps. Environ 15 à 20% du rayonnement solaire reçu par les panneaux photovoltaïques est converti en sortie électrique et le reste de l'énergie solaire finit par chauffer les cellules PV [10], ce qui pose plusieurs problèmes. Le rendement électrique se dégrade pour un module PV en silicium cristallin fonctionnant à 25 °C avec un taux de 0,45 à 0,6% pour chaque degré d'augmentation de la température de la cellule. Cela entraîne une très forte dégradation du rendement électrique pour les pays qui subissent des températures élevées, surtout en été. L'autre problème pouvant résulté de la température élevée de la cellule est la possibilité de causer des dommages complets à la suite d'une surchauffe [11]. En conséquence, le refroidissement des panneaux photovoltaïques est une tâche nécessaire qui doit être sérieusement prise en compte. Le refroidissement du PV peut être utilisé simultanément pour chauffer un fluide, ce qui nous permet d'améliorer le rendement électrique et de cultiver un peu d'énergie thermique. Cette combinaison a donné naissance à un système dit hybride.

I.7.1. Types de capteurs hybrides plans

Un capteur plan hybride photovoltaïque-thermique est constitué d'un panneau solaire PV fixé sur un absorbeur (cœur d'un capteur solaire hybride PV/T). L'absorbeur est parcouru par un ensemble de tubes qui permettent de transporter, par le biais d'un fluide caloporteur, la chaleur. Selon le fluide utilisé, on distingue deux types de capteurs plans hybrides PV/T : le capteur PV/T à eau et le capteur PV/T à air.

❖ Capteur solaire hybride PV/T à air

Ce type de capteur est composé d'une couche absorbante isolée, refroidi par un courant d'air qui circule entre l'absorbeur et les cellules PV. On peut augmenter le rendement en donnant à l'absorbeur soit un pouvoir émissif élevé, soit avec une surface striée ou rainurée.

Le mode de circulation du fluide caloporteur à l'intérieur du capteur, le nombre de vitre ou le type de la couverture transparente, le genre d'absorbeur installé, l'absence ou la présence de la plaque métallique isolante et la conception de l'isolation définissent le type de capteur plan à air. On peut distinguer deux grands groupes : Les capteurs avec chicane et les capteurs sans chicane :

• Capteur solaire hybride PV/T à air sans chicane

Les capteurs solaires plans à air dont la veine fluide au sein du capteur n'est équipée d'aucun type de promoteur de turbulence c'est les capteurs plans à air sans chicanes. Ce type de capteurs date depuis les premiers travaux initiés dans ce domaine.

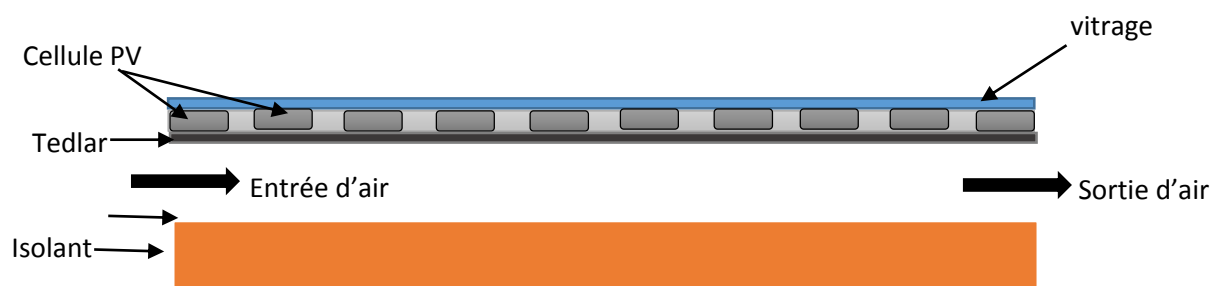


Figure I.10. Capteur solaire hybride PV/T à air sans chicane.

• Capteur solaire hybride PV/T à air avec chicane

Les capteurs solaires plans à air présentent de faibles performances thermiques comparativement aux capteurs à liquide. Cela est essentiellement dû aux faibles propriétés thermo-physiques de l'air. Pour accroître les performances de ces capteurs, différentes méthodes ont été étudiées par plusieurs chercheurs. L'une de ces méthodes préconise l'ajout d'obstacles ou d'ailettes de diverses formes dites 'chicanes' dans la veine d'écoulement de l'air.

[12]

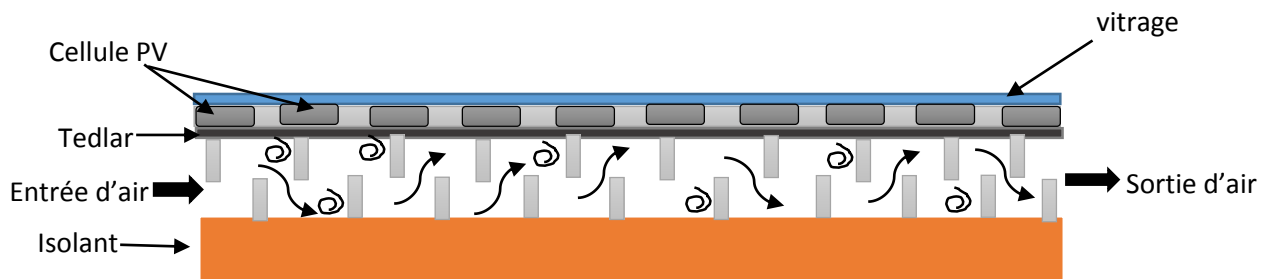


Figure I.11. Capteur solaire hybride PV/T à air avec chicane.

Remarque : Les obstacles peuvent prendre plusieurs formes tel que :

Les chicanes Delta Cintrées Longitudinalement (DCL), Ogivales Cintrées longitudinalement (OCL) et Transversales-Longitudinales (TL).

❖ Capteur solaire hybride PV/T à eau

L'extraction de la chaleur dissipée par le module PV à l'aide d'une circulation d'eau fait augmenter les performances électriques de ces modules. En effet, l'eau présente une meilleure capacité à transporter la chaleur que l'air en raison d'une meilleure capacité thermique. La quantité de chaleur récupérée par l'eau est valorisée dans les applications de production d'eau chaude sanitaire ou pour le chauffage basse température. L'eau circule à travers des tubes fixés à l'absorbeur, qui, à son tour, est mis en contact thermique avec la surface arrière du module PV.

Dans la littérature, on relève quatre configurations possibles qui utilisent l'eau comme fluide caloporteur :

• La configuration "sheet and tube"

C'est le dispositif le plus utilisé. Il est facile à fabriquer. Il comprend des cellules fixées sur une plaque métallique et un système de refroidissement (Figure I.12), Le système de refroidissement est constitué de tubes fixés sur l'absorbeur. Pour augmenter le rendement thermique on peut ajouter une vitre, mais au détriment du rendement électrique.

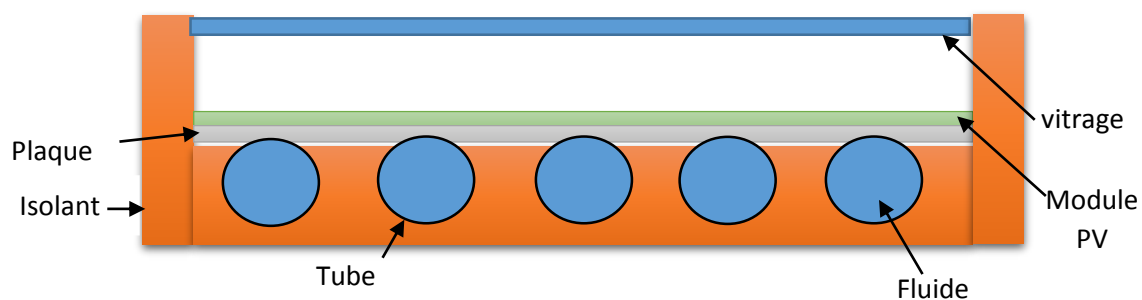


Figure I.12. Schéma représente un capteur solaire hybride PV/T type sheet and tube réalisé par O, RAJAB et al [4]

• Capteur solaire PV/T avec canal

Le canal de fluide caloporteur (l'eau) est situé au-dessus du module photovoltaïque pour diminuer la température des cellules PV ; la canalisation de l'eau permet une circulation forcée. Pour résister à la pression de l'eau, le canal doit être assez grand et assez épais. En outre, la présence d'un canal qui fait circuler de l'air comme fluide caloporteur en raison un

effet de serre qui pourrait réduire la performance du module PV. Le concept de ce dispositif est facile à réaliser mais les coûts sont assez élevés (**figure I.13**).

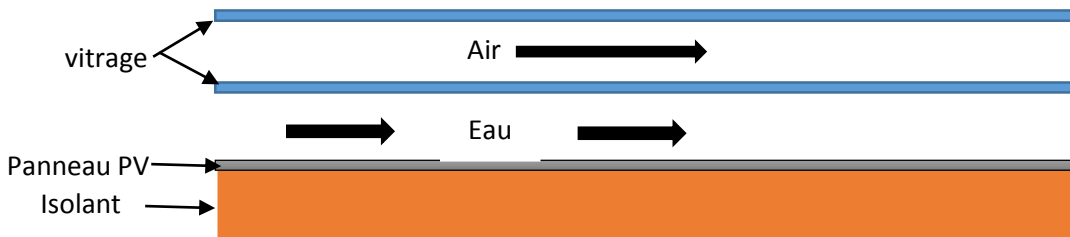


Figure I.13. Schéma représente un capteur PV avec canal.

- **Capteur solaire PV/T à circulation libre (thermosiphon)**

Dans ce type de capteur, le débit d'eau circule librement (sans limite) pour refroidir les cellules PV. Cette circulation fait condenser la vapeur d'eau sur la couche vitrée et diminuer les performances thermiques. L'absence d'un couvercle supplémentaire réduit encore le rendement thermique. Ceci présente un inconvénient majeur pénalisant l'utilisation de ce type de capteur (**Figure I.14**).

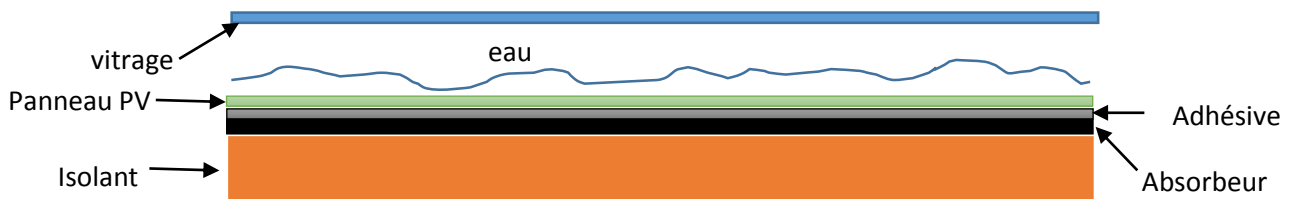


Figure I.14. Capteur solaire hybride libre circulation

- **Capteur solaire PV/T à deux absorbeurs**

Ce concept utilise un photovoltaïque lamifié transparent comme un absorbeur primaire (PV) et une plaque métallique noire comme un absorbeur secondaire. Les deux absorbeurs sont séparés par une lame d'air. Ils sont protégés par deux vitres. Le fluide caloporteur circule dans le canal supérieur (entre l'absorbeur primaire et le vitrage) ; le retour se fait via le canal inférieur (entre l'absorbeur secondaire et l'isolant), voir figure I.15. L'inconvénient de ce dispositif est la difficulté de sa fabrication et les coûts élevés.

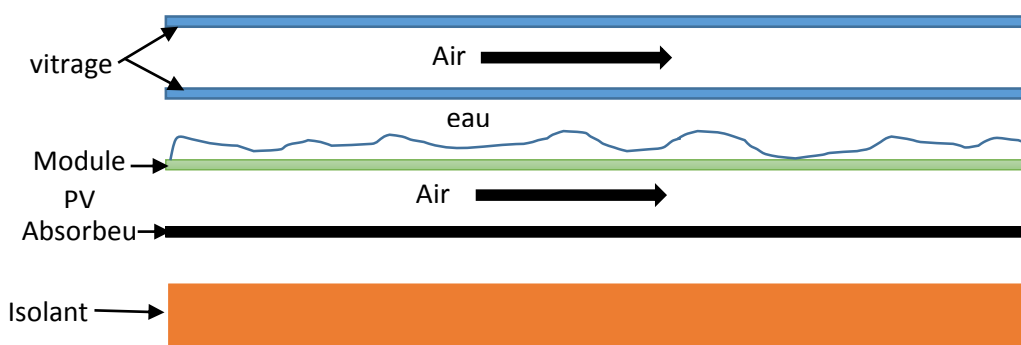


Figure I.15. Capteur solaire hybride PV/T à eau avec deux absorbeurs.

I.8. Synthèse bibliographique

I.8.1. Capteurs solaires hybrides à air sans chicanes

C. GUO et al. [13] ont proposé et réaliser un nouveau modèle de capteur solaire hybride PV/T à triple fonction. Il peut produire simultanément de l'électricité, l'air chaud et de l'eau chaude avec une possibilité de réglage selon les besoins de l'utilisateur. Une étude comparative a été faite pour les deux modèles PV/T air et PV/T eau.

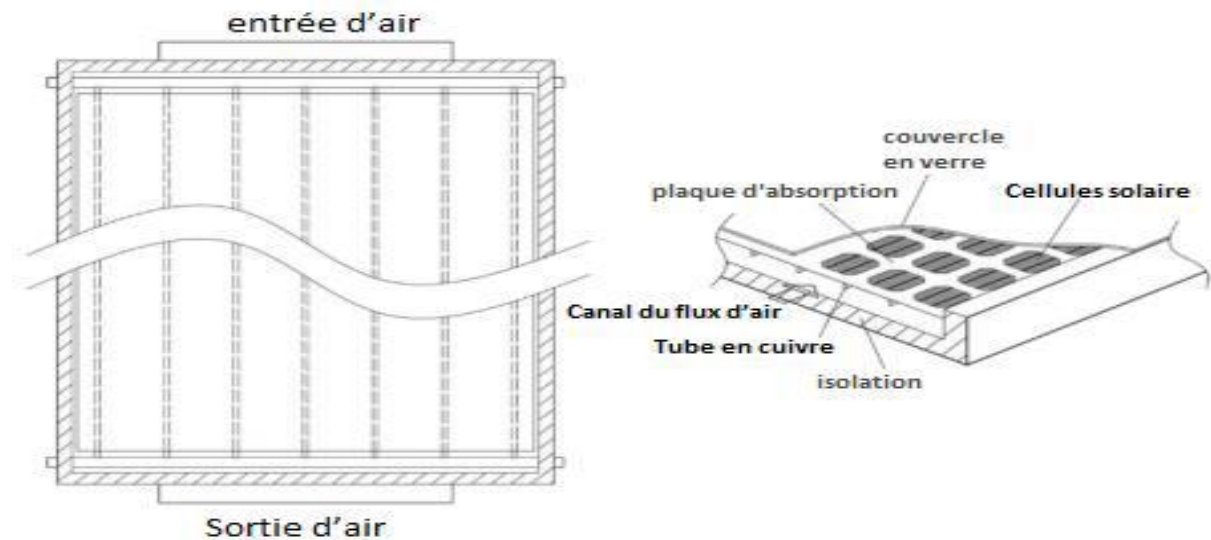


Figure I.16. Capteur solaire hybride PV/T à triple fonction

Pour le capteur solaire hybride PV/T à eau, l'augmentation de la vitesse du vent engendre une diminution sur l'efficacité thermique quotidienne. Le débit d'air a une grande influence sur l'efficacité thermique et électrique. Le capteur solaire hybride PV/T trifonctionnel est plus efficace comparé au capteur PV/T à eau et le capteur PV/T à air pris seuls.

JOSHI et al [14] on fait une étude expérimentale qui a permis d'étudier la performance thermique d'un capteur hybride PV/T à air composé de deux modules photovoltaïques placés parallèlement. Le premier est recouvert d'un simple vitrage et le deuxième est recouvert d'un double vitrage. Les deux modules PV sont pris en considération afin de comparer leurs performances dans le climat de New Delhi (Inde).



Figure I.17. Image de l'installation expérimentale du capteur hybride PV/T à air, réalisé à New Delhi (Inde) [14].

Leur étude montre que le module photovoltaïque recouvert du double vitrage donne une meilleure performance en termes d'efficacité thermique globale par rapport au module PV recouvert d'un vitrage simple. Elle montre également que l'efficacité thermique globale diminue avec l'augmentation de la longueur de la lame d'air dans les deux cas. L'efficacité thermique globale augmente avec l'augmentation de la vitesse de l'air entrant.

A. SHAHSAVAR et M. AMERI [15] ont fait une étude théorique et expérimentale sur un capteur solaire hybride PV/T à air. Une plaque en aluminium mince suspendue au milieu du canal d'air est employée pour augmenter la surface d'échange thermique et pour améliorer par conséquent l'extraction de la chaleur des panneaux PV. Ce système PV/T est testé en convection naturelle et en convection forcée en utilisant deux puis quatre et enfin huit ventilateurs. Les expériences ont été menées sur des capteurs avec et sans couverture vitrée. Dans ce dispositif, les panneaux photovoltaïques sont directement utilisés pour produire de l'énergie requise pour faire fonctionner des ventilateurs DC.

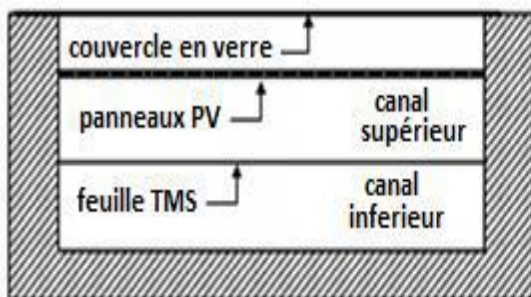


Figure I.18. (a) Vue en coupe transversale du capteur hybride solaire étudié, (b) Photographie du dispositif expérimental étudié à l'université de Kerman [6].

Leur étude montre qu'il y a un nombre optimal de ventilateur pour obtenir une efficacité électrique maximale. Et que l'utilisation de la couverture vitrée des panneaux photovoltaïques conduit à une augmentation de l'efficacité thermique et une diminution de l'efficacité électrique du système.

M.E.A. SLIMANI [19], a fait une étude expérimentale et théorique d'un séchoir solaire agricole muni d'un capteur solaire hybride (PV-T), il développé un nouveau séchoir solaire indirect fonctionnant en convection forcée alimenté entièrement en énergie solaire. Le séchoir solaire indirect étudié est constitué d'un capteur solaire hybride (PV-T) à air, composé de deux modules photovoltaïques connectés en série et unité de stockage électrique et d'une enceinte de séchage et un ventilateur centrifuge, Le capteur (PV-T) permet de fournir à la fois une tension électrique et une énergie thermique. L'étude a permis de constater que le système de séchoir solaire entraîne une diminution de la durée de séchage c.-à-d. le capteur hybride à double écoulement a montré des rendements thermique très important.

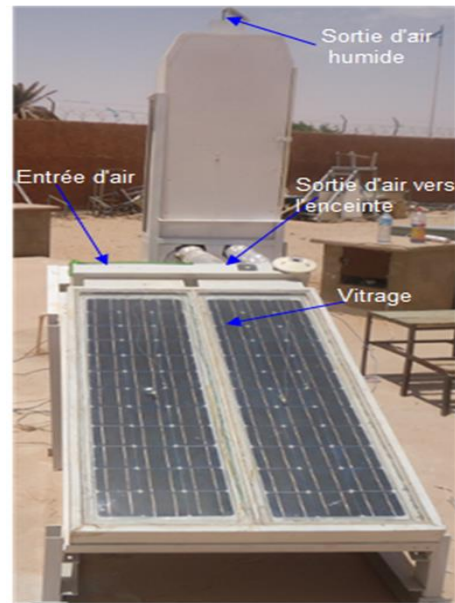


Figure I.19. séchoir solaire agricole réalisé par M.E.A. SLIMANI [19]

I.8.2. Capteurs thermiques bi-fluides

Chao Guo et al. [16], ont développé un capteur solaire hybride avec trois fonctionnalités (produire de l'eau et l'air chaud et de l'électricité). Le capteur peut marcher en mode PV/eau ou en mode PV/air (Figure I.20) pour différentes demandes et besoins. Pour les deux modes, un modèle stationnaire et dynamique a été développé et validé avec des résultats expérimentaux. En se basant sur les modèles validés, les performances du capteur ont été étudiées pour différents débits d'écoulement, vitesse de vent, température d'entrée et la température initiale de l'eau. Pour le mode PV/air, les effets de la vitesse du vent et le débit sont investigués. Un débit de $0.02 \text{ kg}/(\text{m}^2.\text{s})$ est conseillé pour faire la balance entre l'augmentation de la température et l'efficacité thermique.

Pour le mode PV/eau, on observe une diminution du coefficient d'efficacité thermique quand la vitesse du vent augmente.



Figure I.20. Configuration expérimentale développée par Chao Guo et al. [9] : (a) mode PV/air ; (b) mode PV/eau

Trip Anagnostopoulos. [17], a été parmi les premiers chercheurs à introduire un nouveau concept d'un capteur solaire connu sous le nom de capteur solaire bi-fluide, où il utilisait dans un travail expérimental deux fluides caloporteurs dans le même capteur, mais sa recherche s'est concentrée principalement sur des études du fonctionnement des fluides caloporteurs séparément. Après un capteur solaire bi-fluide (PV/T) a été développé théoriquement avec une analyse stationnaire bidimensionnelle, en testant plusieurs configurations pour savoir laquelle est la plus performante.

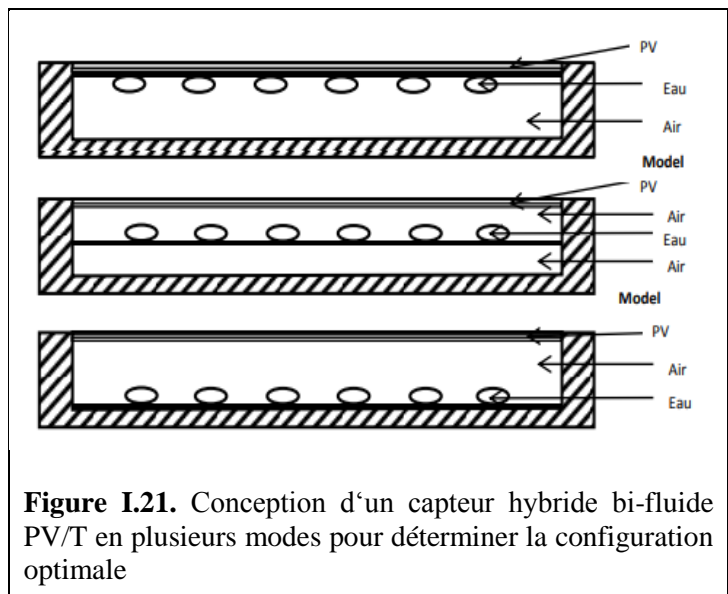


Figure I.21. Conception d'un capteur hybride bi-fluide PV/T en plusieurs modes pour déterminer la configuration optimale

Y.B. Assoa. [18], Dans son article propose un design simple d'un capteur solaire bi-fluide (PV/T), ce type de capteur combine le préchauffage de l'air, la production d'eau chaude et la production d'électricité (Figure I.22). Un modèle mathématique en 2-D est développé pour un capteur bi-fluide avec un absorbeur en métal. Ensuite, les paramètres d'étude (numérique et expérimentale) sont analysés afin de déterminer l'effet de divers facteurs tels que le débit

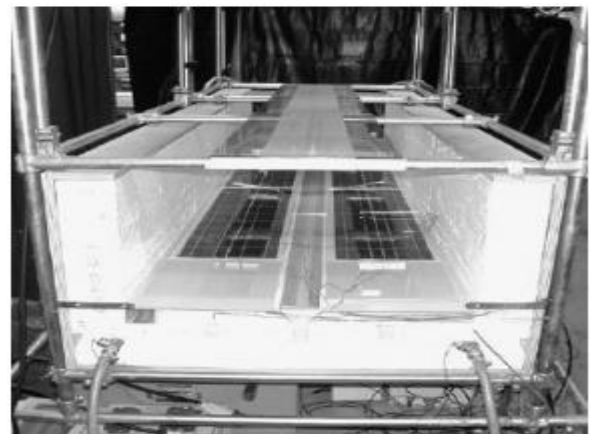


Figure I.22. Banc d'essai du capteur solaire bi-fluide (PV/T) utilisé par Y.B. Assoa et al. [18]

massique d'eau sur les performances du capteur solaire thermique, ensuite, les résultats expérimentaux et numériques obtenues sont comparés.

Dans notre travail, on fait l'hybridation entre l'énergie photovoltaïque et l'énergie thermique issue de panneau, afin de le refroidir, par conséquent, l'augmentation de son rendement de conversion d'une part ; d'autre part, l'augmenter le rendement thermique de capteur bi-fluide par l'utilisation de la chaleur récupérée du panneau PV.

I.9. L'objectif de travail

L'étude rentre dans le but de développement d'un système solaire hybride et combiné avec de stockage d'énergie pour des applications domestiques (climatisation et eau chaude sanitaire) et agricoles (séchage solaire), le système peut également répondre à une partie de besoin énergétique (l'électricité, la chaleur) si intégré dans des zones isolées.

Pour atteindre l'objectif mentionné, le système doit être efficace et performant. Par cette étude nous visons les points suivants (comme des sous-objectifs) :

- ✓ Refroidissement du module solaire photovoltaïque pour augmenter son rendement de conversion.
- ✓ L'utilisation de la chaleur récupérée du module PV.
- ✓ Augmenter l'efficacité énergétique du capteur thermique par l'utilisation de deux fluides (capteur bi-fluide)
- ✓ Augmenter le rendement de conversion global du système.

I.10. Conclusion :

Les concepts généraux sont très importants dans l'étude de tout sujet pour permettre une bonne compréhension des bases du sujet. L'étude bibliographique est nécessaire pour bénéficier des résultats atteints et éviter les problèmes rencontrés dans tout travail.

Chapitre II

Etude théorique et modélisation

II.1. Introduction

Dans ce chapitre nous intéressons à l'étude théorique du système à travers la mise en équations des différents phénomènes de transfert thermique et électrique. Il est divisé en deux parties ; une partie électrique, qui comprend les différentes relations et équations décrivant le phénomène électrique, et une partie thermique, qui englobe les corrélations et les équations de bilan de transferts thermiques au niveau des différents constituants composant le système étudié.

II.2. Étude électrique

Une cellule photovoltaïque peut être modélisée par la superposition de la caractéristique d'une diode et d'un générateur de photo courant. La tension produite par la cellule photovoltaïque est réduite par la résistance série R_s du matériau et des contacts métalliques, une résistance « by-pass R_{sh} » de valeur finie qui représente les fuites de courant dues aux effets de bord.

Une cellule photovoltaïque sous éclairage peut être donc représentée comme un générateur du courant en parallèle à une diode comme le montre la (Figure II.1) :

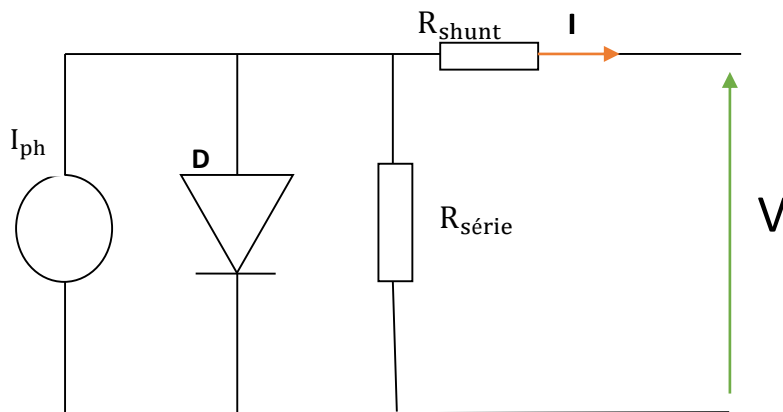


Figure II.1. Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque [19].

La caractéristique $I(V)$ d'une cellule solaire photovoltaïque réelle et donnée par :

$$I(V) = I_{ph} + I_d + I_{sh} \quad \text{II.1}$$

$$I(V) = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V - I R_s)}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{V - I R_s}{R_{sh}} \quad \text{II.2}$$

Où :

I , I_{ph} , I_d , et I_0 représentent, respectivement, le courant fourni par la cellule photovoltaïque, le courant photo généré; le courant traversant la diode; le courant de saturation inverse de la diode;

V : Tension de sortie;

q : Charge de l'électron ($1,6 \times 10^{-19}C$) ;

K : Constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}J/T$) ;

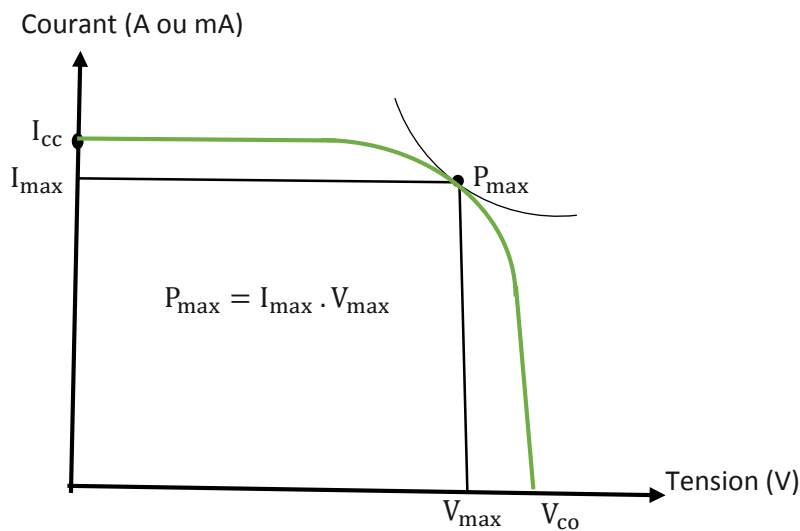
n : Facteur de qualité de la photopile ($1 < n < 3$) ;

T : Température de jonction en K;

R_{sh} , et R_s sont, respectivement, Résistance parallèle (shunt), est connue comme résistance court-circuit, qui traduit l'existence de shunts à travers l'émetteur, et la Résistance série.

II.2.1. Facteur de forme

Le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite ($P_{max}=I_{cc} \times V_{co}$) de la photopile sous les conditions de mesures standards, et le produit ($I_{cc} \times V_{co}$) où :



FigureII.2. La caractéristique $I(V)$ d'un panneau photovoltaïque.

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \times V_{co}}$$

II.3

Ce facteur traduit les pertes provoquées par les résistances série et résistances parallèles de panneau.

II.2.2. Rendement de conversion

Il correspond au rapport suivant :

$$\eta = \frac{P_{max}}{G_i S} = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{co}}{G_i S}$$

II.4

Où, S est la surface du panneau solaire et G_i est l'éclairement.

II.2.3. Influence des conditions opératoires

❖ **Influence de l'éclairement**

Comme la montre la figure ci-dessous, le courant de court-circuit (I_{cc}) croît proportionnellement avec l'éclairement, tandis que la tension à vide (V_{co}) varie très peu. La puissance électrique au point de fonctionnement maximal augmente avec l'augmentation du rayonnement solaire. On peut conclure qu'au plus la couverture nuageuse est importante, au plus l'intensité du courant généré est faible.

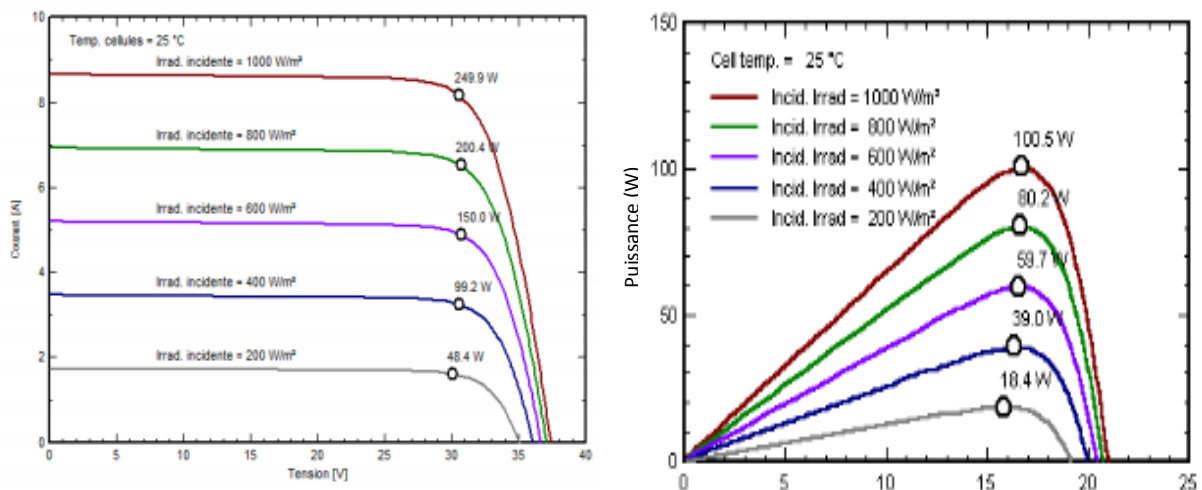


Figure II.3. L'influence de l'irradiation sur les caractéristiques I-V et P-V [20].

❖ **Influence de la température**

La température a une influence considérable sur le comportement de la cellule, et donc sur son rendement. Cette influence se traduit principalement par une diminution de la tension générée et une très légère augmentation du courant.

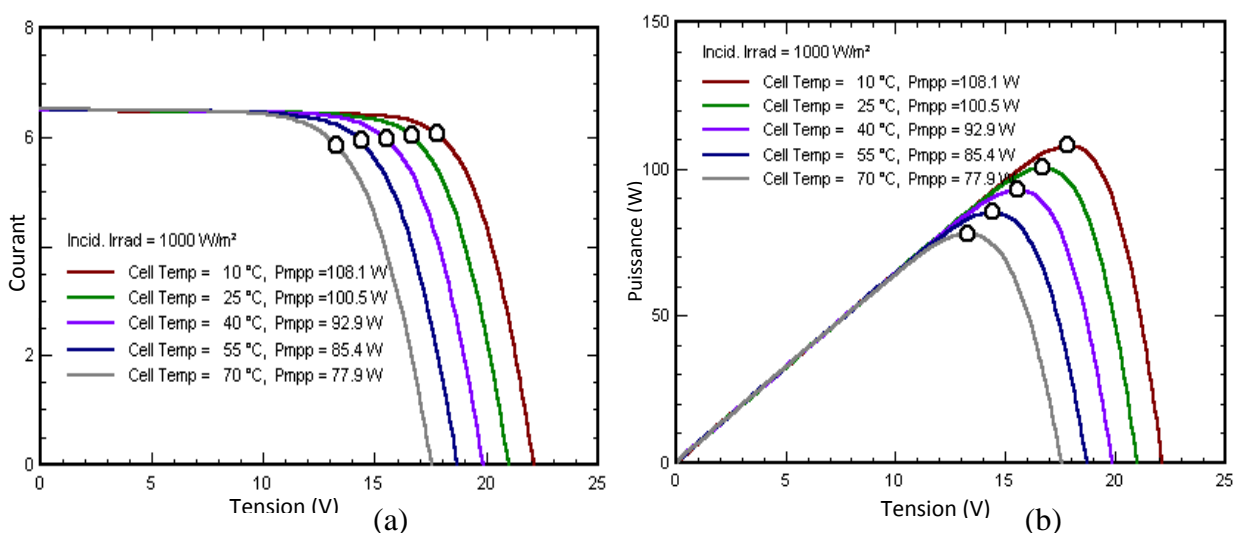


Figure II.4. Influence de la température sur les caractéristiques : I-V (a) et P-V (b) [20].

II.2.4. Variation des différentes caractéristiques électriques

❖ La caractéristique I-V

La température et l'éclairement des cellules ont une grande influence sur son fonctionnement. Pour cela on trouve que la caractéristique I-V d'un module PV, donne la variation de l'intensité **I** du courant électrique en fonction de la tension électrique **V**. On peut traduire cette influence par la relation suivante [19] :

$$I_{pv}(G, T) = I_{ph}(G, T) - I_0 \cdot \left[\exp \left(\frac{q \cdot [V(G, T_c) + I(G, T_c) \cdot R_s(G, T_c)]}{n \cdot K \cdot T_c} \right) - 1 \right] - \frac{V(G, T_c) + I(G, T_c) \cdot R_s(G, T_c)}{R_p(G, T_c)} \quad \text{II.5}$$

Avec :

G et G_{ref} qui sont l'éclairement et l'éclairement de référence ($G_{ref} = 1000 \text{W/m}^2$);

T_c et $T_{c,ref}$ qui sont la température et la température de référence des cellules ($T_{c,ref} = 25^\circ$);

La variation du courant aux bornes d'un module PV, peut aussi écrire comme suit [19] :

$$\Delta I = I(G, T_c) - I_{ref} = \alpha_I \cdot (T_c - T_{c,ref}) \cdot \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) + \left[\left(\frac{G}{G_{ref}} \right) - 1 \right] \cdot I_{cc,ref} \quad \text{II.6}$$

$$I(G, T_c) = I_{ref} + \alpha_I \cdot (T_c - T_{c,ref}) \cdot \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) + \left[\left(\frac{G}{G_{ref}} \right) - 1 \right] \cdot I_{cc,ref} \quad \text{II.7}$$

Avec :

$$I_{ref} = I_{ph,ref} - I_{0,ref} \cdot \left[\exp \left(\frac{q(V_{ref} + I \cdot R_{s,ref})}{N_s \cdot n \cdot K T_{c,ref}} - 1 \right) \right] - \frac{V_{ref} + I \cdot R_{s,ref}}{R_{p,ref}} \quad \text{II.8}$$

$$I_{ph}(G, T_c) = \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) \cdot [I_{ph,ref} + \alpha_I \cdot (T_c - T_{c,ref})] \quad \text{II.9}$$

Où α_I est le coefficient de variation du courant de court-circuit en fonction de la température.

De même pour la variation de la tension électrique aux bornes du module PV on aura [21]

$$\Delta V = V(G, T_c) - V_{ref} = \beta_V \cdot (T_c - T_{c,ref}) - R_s \Delta I \quad \text{II.10}$$

En remplaçant dans l'équation (II.6) dans (II.10), on trouve :

$$\Delta V = V(G, T_c) - V_{ref} = \beta_V (T_c - T_{c,ref}) - R_s \cdot \left\{ \begin{array}{l} \alpha_I \cdot (T_c - T_{c,ref}) \cdot \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) + \\ \left[\left(\frac{G}{G_{ref}} \right) - 1 \right] \cdot I_{cc,ref} \end{array} \right\} \quad \text{II.11}$$

Où β_V est le coefficient de variation de la tension du circuit ouvert en fonction de la température (V/°C).

- **Le courant de saturation**

L'intensité du courant de saturation dépend de la température de la jonction. Elle peut être exprimée par la relation suivante en fonction des valeurs de référence [21]

$$\frac{I_0(T_c)}{I_{0,ref}} = \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}}\right)^3 \exp\left(-\frac{q \cdot E_g \left[1 - \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}}\right)\right]}{n \cdot K \cdot T_c}\right) \quad \text{II.12}$$

Où :

$E_g = 1,12$ eV, est l'énergie de gap pour le silicium ;

$I_{0,ref}$ est l'intensité du courant de saturation de référence (donnée par le constructeur ou déterminée expérimentalement).

Cette relation se simplifiée comme suit :

$$I_0 = A_0 \cdot T_c^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{K \cdot T_c}\right) \quad \text{II.13}$$

Où $A_0 = 2,11 \cdot 10^3 A/K^3$ est une constante [21].

- **Le Photo-courant**

Le courant d'illumination ou photo-courant d'un module PV varie en fonction de la température des cellules et de l'irradiation solaire incidente [19]. Il est donné par :

$$I_{ph}(G, T_c) = \left(\frac{G}{G_{ref}}\right) \cdot [I_{ph,ref} + \alpha_I \cdot (T_c - T_{c,ref})] \quad \text{II.14}$$

- **Le courant de court-circuit**

Le courant de court-circuit augmente considérablement avec le flux solaire reçu sur la surface du PV/T suivant la relation suivante [21] :

$$I_{cc}(G, T_c) = \left(\frac{G}{G_{ref}}\right) \cdot [I_{cc,ref} + \alpha_I \cdot (T_c - T_{c,ref})] \quad \text{II.15}$$

La tension électrique de circuit ouvert varie légèrement par rapport à la variation de l'éclairement reçu. Par contre par rapport à la température des cellules, il y a une variation considérable. Cela est traduit par la relation de **CHENLO et al.** [22]. Qui s'écrit :

$$V_{co}(G, T_c) = V_{co,ref} + \frac{N \cdot k \cdot T_c}{q} \ln\left(\frac{G}{G_{ref}}\right) + \beta_V(T_c - T_{c,ref}) \quad \text{II.16}$$

- **Le rendement**

Plusieurs corrélations ont été proposées par les chercheurs dans ce domaine pour prévoir la variation du rendement électrique du module PV, on retiendra notamment :

❖ La corrélation proposée par EVANS [21] donnée par :

$$\eta(G, T_c) = \eta_{ref} \left[1 - \beta_T (T_c - T_{c,ref}) + \gamma \cdot \ln \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) \right] \quad \text{II.17}$$

Où :

β_T : Est le coefficient de température ;

γ : Est le coefficient de rayonnement solaire.

Avec :

$$\beta_T = \frac{1}{T_0 - T_{c,ref}} \quad \text{II.18}$$

T_0 : Température maximale de cellules, pour laquelle le rendement de module PV égale à zéro.

❖ La corrélation proposée par KOU et al [21], dans laquelle ils utilisent la norme de « NOCT » (Nominal Operating Cell Temperature). Elle est donnée par :

$$\eta(G, T_c) = \eta_{ref} \left\{ 1 - \beta_T \cdot \left[(T_{amb} - T_{c,ref}) + (NOCT - T_{amb}) \cdot \left(\frac{G}{G_{NOCT}} \right) \right] \right\} \quad \text{II.19}$$

T_{amb} : Température ambiante ;

NOCT : Température nominale de cellules PV en °C, donnée par le constructeur ;

G_{NOCT} : Éclairement solaire qui est utilisé dans la notion NOCT ($G_{NOCT} = 800 \text{W/m}^2$).

• La puissance

La tension électrique et le courant aux bornes d'un module PV varient en fonction de l'éclairement et de la température. La puissance qui est fonction de ces deux paramètres, varie également. Elle est donnée par [21] :

$$P = I \cdot V = \left\{ I_{ph}(G, T) - I_0 \cdot \left[\exp \left(\frac{q \cdot [V(G, T) - I(G, T) \cdot R_s(G, T)]}{N \cdot K \cdot T_c} \right) - 1 \right] - \frac{q \cdot [V(G, T) - I(G, T) \cdot R_s(G, T)]}{R_p} \right\} \cdot V(G, T_c) \quad \text{II.20}$$

D'autre part, on peut exprimer la puissance maximale (puissance crête), par une expression qui est similaire à celle du rendement :

$$P(G, T_c) = G \cdot A \cdot \eta_{ref} \cdot \left[1 - \beta_T \cdot (T_c - T_{c,ref}) + \delta \cdot \ln \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) \right] \quad \text{II.21}$$

Ou bien en fonction de la puissance de référence $P_{ref} = I_{m,ref} \cdot V_{m,ref}$

$$P(G, T_c) = P_{ref} \cdot \left[1 - \beta_T \cdot (T_c - T_{c,ref}) + \delta \cdot \ln \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) \right] \quad \text{II.22}$$

Où A est l'aire de la surface occupée par les cellules.

II.3. Etude thermique

Dans cette partie nous sommes intéressés à l'étude thermique d'un :

- Capteur hybride PV/T qui a la fonction de deux capteurs solaires (capteur photovoltaïque et capteur thermique à double écoulement sans chicanes). Le but est, d'une part, d'augmenter le rendement du capteur hybride, en refroidissant les cellules solaires (pour augmenter le rendement électrique) ; et d'autre part, récupérer la chaleur dissipée dans le module PV à l'aide d'un fluide caloporteur qui est l'air.
- Capteur thermique bi-fluide à double écoulement. Ce dernier est relié au capteur hybride par deux canaux à travers lesquels l'air chaud sort du capteur PV/T et rentre dans le capteur Bi-fluide. Le rayonnement solaire absorbé par le capteur thermique bi-fluide est utilisé à la fois pour surchauffer l'air, et pour chauffer l'eau traversant le serpentin du capteur thermique.

II.3.1. Hypothèses simplificatrices

Durant la modélisation et la mise en équations du bilan énergétique à travers les couches constitutives du système, on prend compte de quelques hypothèses simplificatrices :

- Le problème est supposé bidimensionnel.
- La température de chaque couche du capteur (hybride, bi-fluide) et la température des fluides caloporteurs (air, eau) sont considérées en moyenne (de l'entrée à la sortie).
- Le débit massique des fluides caloporteurs est considéré constant.
- Les paramètres thermo-physiques des constituants du capteur sont supposés constants.
- Les pertes thermiques sur le côté latéral des capteurs sont négligeables devant les pertes sur les faces avant et arrière du capteur.
- ❖ Pour étudier le comportement thermique du système, le principe de conservation de l'énergie est utilisé pour chaque élément du système qui peut donc être présenté par une équation de bilan d'énergie qui s'écrit comme suit :

L'énergie stockée (accumulée) = l'énergie reçue - l'énergie perdue

Ou encore sous forme mathématique, en considérant un nœud quelconque du système à l'instant 't'. Le bilan au nœud « i » s'écrit :

$$M_i C_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_e Q_i - \sum_s Q_i \quad \text{II.23}$$

Où : M_i : Masse du nœud i.

C_i : Chaleur spécifique du nœud i .

Le bilan thermique prend en compte les phénomènes de transfert de chaleur par conduction, par convection et par rayonnement en interaction au niveau du système.

II.3.2. Capteur solaire hybride PVT

La **figure II.5** représente un schéma des échanges énergétiques dans chaque couche du capteur hybride étudié. Une grande partie du flux solaire incident est transmise et absorbée par le module photovoltaïque, tandis que l'autre partie est réfléchie vers l'ambiance et/ou perdue sous forme de rayonnement.

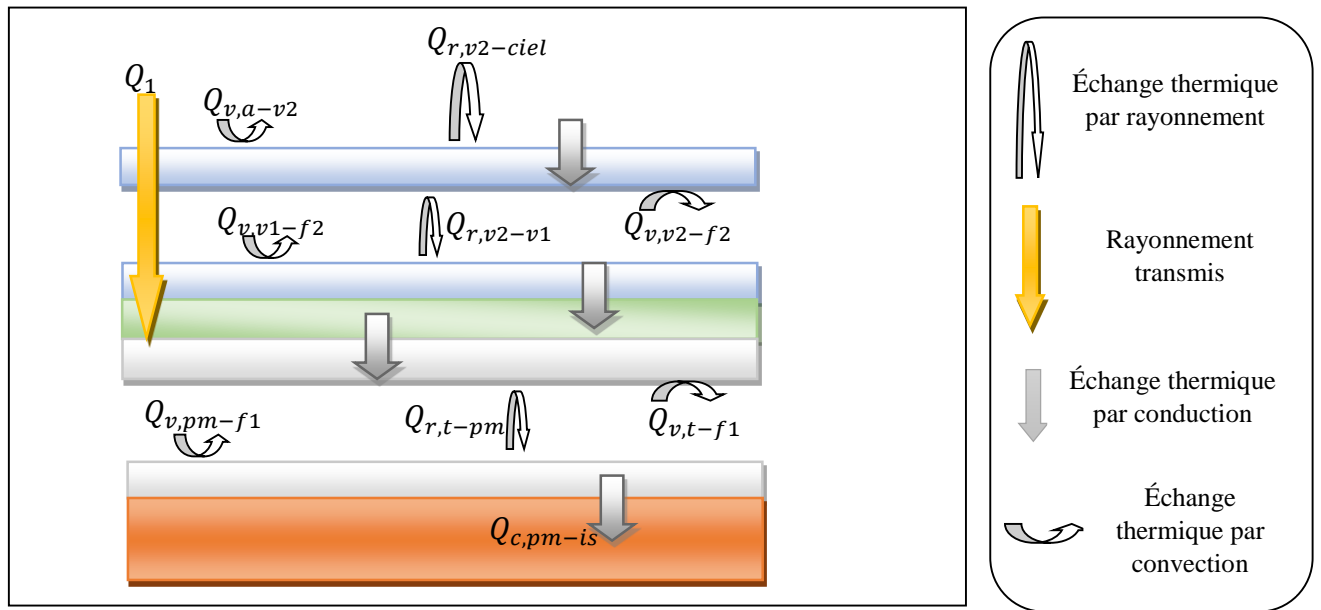


Figure II.5. Répartition énergétique dans le capteur hybride.

- **Pour la couche de verre supplémentaire :**

Le bilan énergétique dans cette couche s'écrit :

$$M_{v2} C_{v2} \frac{dT_{v2}}{dt} = \alpha_v \cdot Q_1 + Q_{r,v2-ciel} + Q_{r,v2-v1} + Q_{v,v2-f2} + Q_{v,a-v2} \quad \text{II.24}$$

$$M_v C_{p_v} \frac{dT_{v2}}{dt} = S[G \cdot \alpha_v + h_{r,v2-ciel} \cdot (T_{ciel} - T_{v2}) + h_{r,v2-v1} \cdot (T_{v1} - T_{v2}) - h_{v,v2-f2} (T_{v2} - T_{f2}) + h_{v,a-v2} (T_a - T_{v2})] \quad \text{II.25}$$

Où :

α_v : Absorptivité du verre ;

G : Rayonnement global incident sur le couvercle du verre ;

$h_{r,v-ciel}$: Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre le verre et le ciel ;

$h_{r,v2-v1}$: Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre la couche supplémentaire et la couche de verre de panneau ;

$h_{v,v-a}$: Coefficient d'échange thermique convectif entre le verre et le milieu ambiant ;

$h_{v,v2-f2}$: Coefficient d'échange thermique convectif entre le verre et le fluide ;

Les coefficients de transferts thermiques s'expriment en W/m²K(SI).

Pour la couche d'air dans la conduite supérieur

Le bilan énergétique dans cette couche s'écrit :

$$\dot{m}_{f2} Cp_{f2} \frac{dT_{f2}}{dx} = Q_{v,v2-f2} - Q_{v,v2-f2} \quad \text{II.26}$$

$$\dot{m}_{f2} Cp_{f2} \frac{dT_{f2}}{dx} = S[h_{v,f2-v1}(T_{v1} - T_{f2}) - h_{v,f2-v2}(T_{f2} - T_{v2})] \quad \text{II.27}$$

En intégrant cette équation ; la température de l'écoulement au-dessus du module PV s'écrit comme suit :

$$T_{f2}(x) = \left[\left(T_{f,e} - \frac{(T_{v1}h_{v,f2-v1} + T_{v2}h_{v,f2-v2})}{(h_{v,f2-v1} + h_{v,f2-v2})} \right) \cdot e^{\frac{S(h_{v,f2-v1} + h_{v,f2-v2})}{\dot{m}_{f2} Cp_{f2}} x} + \frac{(T_{v1}h_{v,f2-v1} + T_{v2}h_{v,f2-v2})}{(h_{v,f2-v1} + h_{v,f2-v2})} \right] \quad \text{II.28}$$

La température de l'air en sortie de la conduite supérieure du capteur hybride est:

$$T_{f2,s} = \left[\left(T_{f,e} - \frac{(T_{v1}h_{v,f2-v1} + T_{v2}h_{v,f2-v2})}{(h_{v,f2-v1} + h_{v,f2-v2})} \right) \cdot e^{\frac{S(h_{v,f2-v1} + h_{v,f2-v2})}{\dot{m}_{f2} Cp_{f2}} L} + \frac{(T_{v1}h_{v,f2-v1} + T_{v2}h_{v,f2-v2})}{(h_{v,f2-v1} + h_{v,f2-v2})} \right] \quad \text{II.29}$$

La température moyenne de l'air dans la conduite supérieure :

$$T_{f2,moy}(x) = \left[\left(\frac{(T_{v1}h_{v,f2-v1} + T_{v2}h_{v,f2-v2})}{(h_{v,f2-v1} + h_{v,f2-v2})} - T_{f,e} \right) \cdot e^{\frac{S(h_{v,f2-v1} + h_{v,f2-v2})}{\dot{m}_{f2} Cp_{f2}}} + \frac{(T_{v1}h_{v,f2-v1} + T_{v2}h_{v,f2-v2})}{(h_{v,f2-v1} + h_{v,f2-v2})} \right] \quad \text{II.30}$$

- **Pour la couverture vitrée du module PV :**

$$M_v Cp_v \frac{dT_{v1}}{dt} = Q_2 + Q_{r,v1-v2} + Q_{v,v2-f2} - Q_{c,v1-c} \quad \text{II.31}$$

$$M_v Cp_v \frac{dT_{v1}}{dt} = S[\tau_v \cdot G \cdot \alpha_v + h_{r,v1-v2} \cdot (T_{v2} - T_{v1}) + h_{v,v2-f2} \cdot (T_{f2} - T_{v1}) - h_{c,v1-c} \cdot (T_{v1} - T_c)] \quad \text{II.32}$$

- **Pour la couche des cellules photovoltaïques :**

Le bilan énergétique sur la couche des cellules PV est couplé avec leur génération électrique, et peut être écrit comme suit :

$$M_c C_p \frac{dT_c}{dt} = Q_3 + Q_{c,c-v1} - Q_{c,c-t} - Q_{u,élé} \quad \text{II.33}$$

Cette équation devient :

$$M_c C_p \frac{dT_c}{dt} = \tau_v^2 \cdot \alpha_c \cdot r \cdot S \cdot G \cdot \beta - h_{c,c-v1} \cdot S \cdot (T_c - T_{v1}) - h_{c,c-t} \cdot S \cdot (T_c - T_t) - \tau_v \cdot G \cdot S \cdot \eta_{élé,ref} \left[1 - \beta_T (T_c - T_{c,ref}) + \delta \ln \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) \right] \quad \text{II.34}$$

τ_v : Coefficient de transmission du verre ;

r: Facteur de remplissage du module photovoltaïque (rapport entre la surface totale des cellules et la surface totale du module) ;

$\eta_{élé,ref}$: Rendement électrique de référence ;

$h_{c,c-t}$: Coefficient d'échange thermique par conduction entre les cellules PV et le Tedlar.

- **Pour la couche de Tedlar :**

Le bilan énergétique dans cette couche s'écrit comme suit :

$$M_t C_t \frac{dT_t}{dt} = Q_4 + Q_{c,c-t} - Q_{v,f1-t} - Q_{r,p-t} \quad \text{II.35}$$

Cette équation devient :

$$M_t C_t \frac{dT_t}{dt} = \tau_v^2 \cdot \alpha_t \cdot G \cdot S \cdot (1 - \beta) + h_{c,c-t} \cdot S \cdot (T_c - T_t) - h_{v,f1-t} \cdot S \cdot (T_t - T_f) - h_{r,p-t} \cdot S \cdot (T_t - T_p) \quad \text{II.36}$$

$h_{v,f1-t}$: Coefficient d'échange thermique par la convection entre le Tedlar et le fluide caloporteur ;

$h_{r,p-t}$: Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre le Tedlar et la plaque métallique.

Donc l'équation qui agit le transfert thermique dans cette couche devient :

- **Pour l'écoulement d'air dans la conduite inférieure :**

Le bilan énergétique dans cette couche s'écrit comme suit :

$$M_f C_f \frac{dT_f}{dt} = Q_{v,f1-t} - Q_{v,f1-p} - Q_{u,the} \quad \text{II.37}$$

Le bilan énergétique dans cette couche devient :

$$M_f C_f \frac{dT_f}{dt} = h_{v,f1-t} \cdot S \cdot (T_t - T_{f1}) - h_{v,f1-p} \cdot S \cdot (T_{f1} - T_p) - \dot{m} \cdot C_p (T_{f,s} - T_{f,e}) \quad \text{II.38}$$

\dot{m} : Débit massique (kg/s) ;

C_p : Chaleur massique de l'air (J/kg.k)

$h_{v,f-p}$: Coefficient d'échange thermique par convection entre le fluide caloporteur et l'isolant.

En intégrant cette équation, l'évolution de la température d'air au long de la conduite inférieure :

$$T_{f1}(x) = \left[\left(T_{f,e} - \frac{(T_t h_{v,f1-t} + T_p h_{v,f1-p})}{(h_{v,f1-t} + h_{v,f1-p})} \right) \cdot e^{\frac{S \cdot (h_{v,f1-t} + h_{v,f1-p})}{\dot{m}_{f1} C_{p f1}} x} + \frac{(T_t h_{v,f1-t} + T_p h_{v,f1-p})}{(h_{v,f1-t} + h_{v,f1-p})} \right] \quad \text{II.39}$$

La température de l'air en sortie de la conduite inférieure :

$$T_{f1,s}(x) = \left[\left(T_{f,e} - \frac{(T_t h_{v,f1-t} + T_p h_{v,f1-p})}{(h_{v,f1-t} + h_{v,f1-p})} \right) \cdot e^{\frac{S \cdot (h_{v,f1-t} + h_{v,f1-p})}{\dot{m}_{f1} C_{p f1}} L} + \frac{(T_t h_{v,f1-t} + T_p h_{v,f1-p})}{(h_{v,f1-t} + h_{v,f1-p})} \right] \quad \text{II.40}$$

La température moyenne de l'air dans la conduite inférieure :

$$T_{f1,moy}(x) = \left[\left(\frac{(T_t h_{v,f1-t} + T_p h_{v,f1-p})}{(h_{v,f1-t} + h_{v,f1-p})} - T_{f,e} \right) \cdot \frac{S \cdot (h_{v,f1-t} + h_{v,f1-p})}{\dot{m}_{f1} C_{p f1}} L + \frac{(T_t h_{v,f1-t} + T_p h_{v,f1-p})}{(h_{v,f1-t} + h_{v,f1-p})} \right] \quad \text{II.41}$$

- **Pour la plaque métallique :**

$$M_p C_{p p} \frac{dT_p}{dt} = Q_{c,p-i} - Q_{v,f1-p} - Q_{r,p-t} \quad \text{II.42}$$

$$M_p C_{p p} \frac{dT_p}{dt} = S [h_{c,p-i} (T_i - T_p) - h_{v,f1-p} (T_p - T_{f1}) - h_{r,p-t} (T_p - T_t)] \quad \text{II.43}$$

Avec :

$$S_p = L_p \cdot l_p$$

S_p : la surface de plaque métallique

- **Pour l'isolant thermique :**

$$M_i C_{p i} \frac{dT_i}{dt} = Q_{c,i-p} - Q_{v,a-i} - Q_{r,t-sol} \quad \text{II.44}$$

$$M_i C_{p_i} \frac{dT_i}{dt} = S_i [h_{c,i-p}(T_p - T_i) - h_{v,a-i}(T_i - T_a) - h_{r,t-sol}(T_i - T_{sol})] \quad \text{II.45}$$

- ❖ On fait un bilan énergétique global, qui prend l'énergie absorbée par les cellules et la couche de Tedlar, et l'énergie perdue par le système :

$$Q_{u,the} = Q_{the} - U_{ar} \cdot S \cdot (T_t - T_a) - U_{av} \cdot S \cdot (T_i - T_a) \quad \text{II.46}$$

U_{av} : Coefficient global des pertes thermiques vers la surface avant du capteur.

U_{ar} : Coefficient global des pertes thermiques vers la surface arrière du capteur.

La quantité de la puissance thermique absorbée par le Module s'écrit sous la forme :

$$Q_{the} = (\alpha\tau)_{eff} \cdot S \cdot G \quad \text{II.47}$$

Avec :

$$(\alpha\tau)_{eff} = \alpha_c \cdot \tau_v \cdot r + \alpha_t \cdot \tau_v \cdot (1 - r) - \tau_v \cdot r \cdot \eta_{léle} \quad \text{II.48}$$

Donc :

$$Q_{u,the} = (\alpha\tau)_{eff} \cdot S \cdot G - U_{ar} \cdot S \cdot (T_t - T_a) - U_{av} \cdot S \cdot (T_i - T_a) \quad \text{II.49}$$

II.3.3. Capteur thermique bi-fluide

Comme pour le capteur hybride PV/T et afin de prédire la température des différents composants de notre capteur solaire bi-fluide, nous allons développer un bilan énergétique qui dépendra de plusieurs paramètres (géométrie, nature des échanges thermiques, type du caloporteur...), pour cela, un bilan de transfert thermique est établi en prenant en considération les mêmes hypothèses simplificatrices citées précédemment.

❖ Description du capteur bi-fluide étudié

Le capteur thermique bi-fluide (**figure II.6**) est composé essentiellement de :

- Un vitrage.
- Une plaque absorbante ondulée qui joue le rôle d'un absorbeur.
- Un serpentín en cuivre collé avec la plaque absorbante pour la circulation de l'eau.
- Deux canaux d'air en dessous et au-dessus de la plaque absorbante.
- Une plaque métallique au-dessus de l'isolant pour augmenter le transfert thermique radiatif avec la plaque absorbante.
- Les pertes thermiques dans les côtés latéraux du capteur bi-fluide sont négligeables.
- Un isolant thermique pour minimiser les pertes thermiques vers l'ambiance.

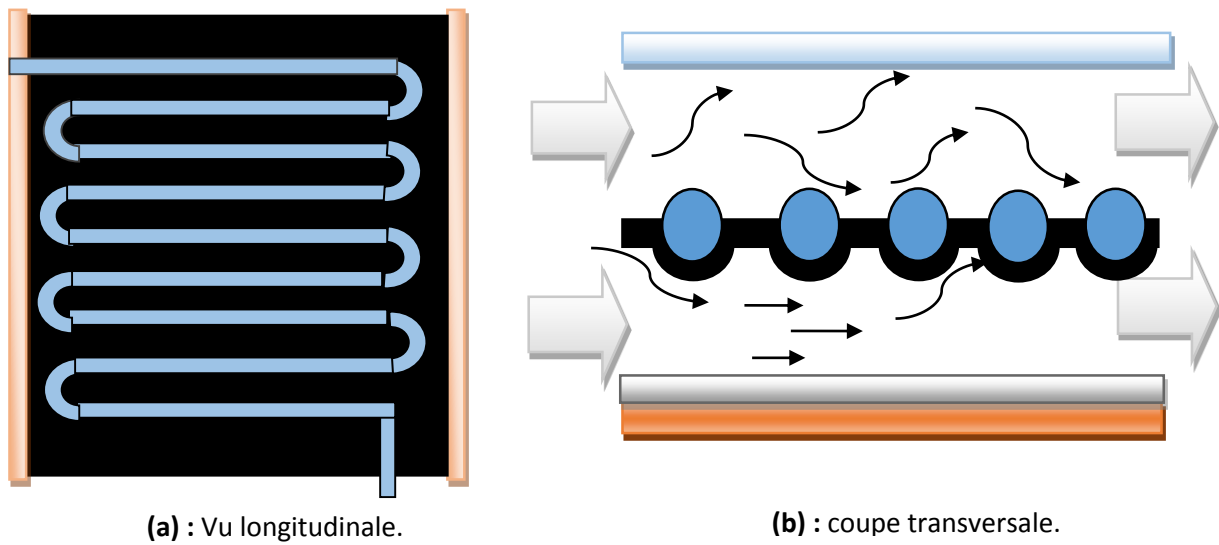


Figure II.6. Schéma descriptif des différents composants du capteur bi-fluide.

❖ Equations du bilan thermique

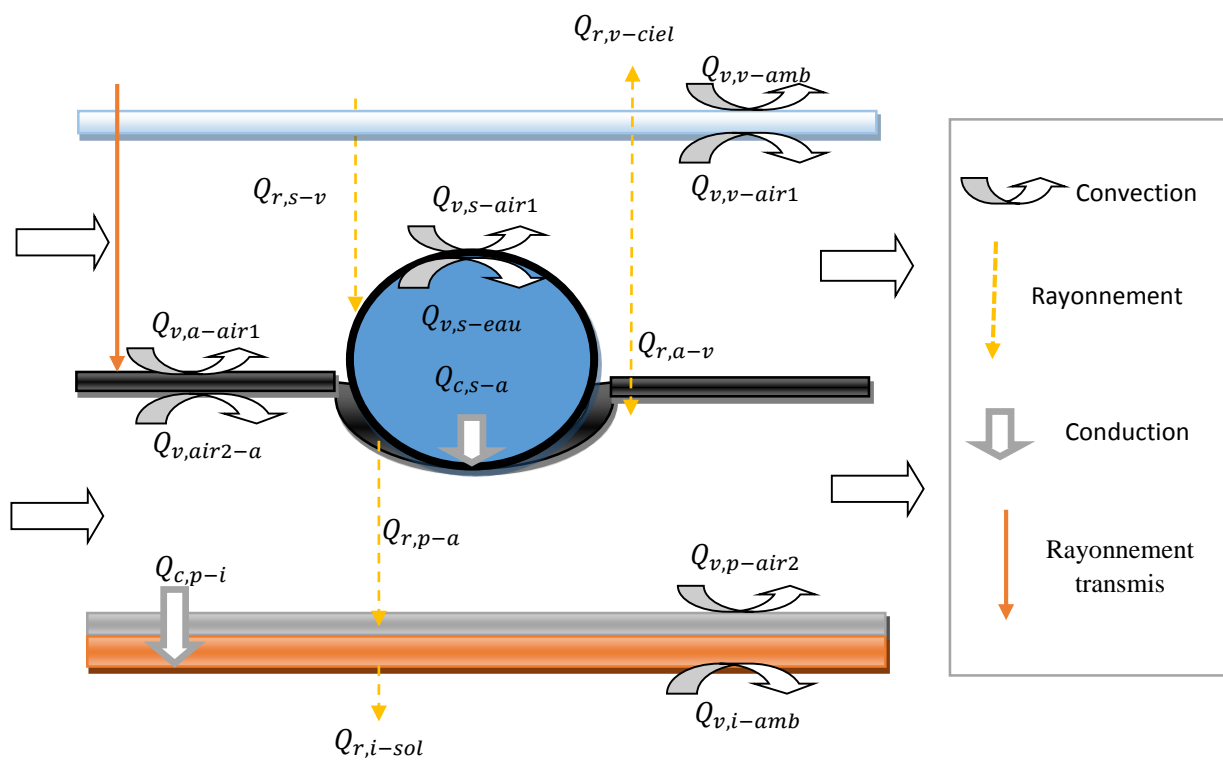


Figure II.7. Les échanges thermiques dans le capteur bi-fluide.

• Pour la vitre :

$$m_v C_{p_v} \frac{dT_v}{dt} = \alpha_v G A_v + Q_{v,v-amb} + Q_{v,v-air1} + Q_{r,v-ciel} + Q_{r,s-v} + Q_{r,ab-v} \quad \text{II.50}$$

$$m_v C_{p_v} \frac{dT_v}{dt} = \alpha_v G A_v + A_v h_{v,v-amb} (T_{amb} - T_v) + A_v h_{v,v-air1} (T_v - T_{air1}) + A_v h_{r,v-ciel} (T_{ciel} - T_v) + A_s h_{r,s-v} (T_s - T_v) + A_{ab} h_{r,a-v} (T_a - T_v) \quad \text{II.51}$$

Avec :

$$A_v = L_v \cdot l_v \quad ; \quad A_s = D_{ext} \cdot L_s \quad ; \quad A_{ab} = S_1 \cdot (N_t - 1)$$

Où :

L_v , l_v , et L_s sont respectivement, La longueur de vitre, La largeur de vitre, et la longueur de serpentine

A_s , S_1 sont la surface apparente du serpentin et Surface entre deux tubes.

R_{ext} : Diamètre extérieur de la serpentine.

N_t : Nombre des tubes.

• **Pour l'air du canal supérieur :**

$$M_{air1} C_{p_{air}} \frac{dT_{air1}}{dt} = Q_{v,ab-air1} + Q_{v,s-air1} + Q_{v,v-air1} - Q_{u,th} \quad \text{II.52}$$

$$T_{air1,sortie} = \left(T_{air1e} + \frac{-\frac{l_{ab}}{\epsilon} \cdot h_{v,air1-a} T_{ab} - \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} T_s - l \cdot h_{v,v-air1} T_v}{\frac{l_{ab}}{\epsilon} \cdot h_{v,air1-a} + \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} + l \cdot h_{v,v-air1}} \right) \times e^{\frac{-\frac{l_{ab}}{\epsilon} h_{v,air1-a} - \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} - l \cdot h_{v,v-air1}}{M_{air1} C_{p_{air}}}} + \frac{\frac{l_{ab}}{\epsilon} \cdot h_{v,air1-a} T_{ab} + \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} T_s + l \cdot h_{v,v-air1} T_v}{\frac{l_{ab}}{\epsilon} \cdot h_{v,air1-a} + \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} + l \cdot h_{v,v-air1}} \quad \text{II.53}$$

Où :

T_{air1e} : température d'entrée de l'air

T_{air1s} : température de la sortie de l'air

La température moyenne du l'air au sein du canal peut être calculée par :

$$T_{air1 moy} = \frac{M_{air1} C_{p_{air}}}{\left(\frac{l_{ab}}{\epsilon} h_{v,air1-a} + \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} + l \cdot h_{v,v-air1} \right) \cdot L} \left(T_{air1e} + \frac{-\frac{l_{ab}}{\epsilon} h_{v,air1-a} T_{ab} - \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} T_s - l \cdot h_{v,v-air1} T_v}{\frac{l_{ab}}{\epsilon} h_{v,air1-a} + \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} + l \cdot h_{v,v-air1}} \right) \times \left(e^{\frac{-\frac{l_{ab}}{\epsilon} h_{v,air1-a} - \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} - l \cdot h_{v,v-air1}}{M_{air1} C_{p_{air}}}} - 1 \right) + \frac{\frac{l_{ab}}{\epsilon} h_{v,air1-a} T_{ab} + \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} T_s + l \cdot h_{v,v-air1} T_v}{\frac{l_{ab}}{\epsilon} h_{v,air1-a} + \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} + l \cdot h_{v,v-air1}} \cdot L \quad \text{II.54}$$

(Le développement détaillé de cette équation est inclus dans l'annexe 'A')

- **Pour Serpentin**

L'équations du serpentin est données par :

$$m_s C_{p_s} \frac{dT_s}{dt} = Q_{r,s-v} + Q_{v,s-air1} + Q_{v,s-eau} + Q_{c,s-a} \quad \text{II.55}$$

$$M_s C_{p_s} \frac{dT_s}{dt} = A_{s'} \cdot h_{r,s-v} (T_v - T_s) + A_{s'} \cdot h_{v,s-air1} (T_{air1} - T_s) + A_{s,int} \cdot h_{v,s-eau} (T_{eau} - T_s) + A_{s''} \cdot h_{c,s-ab} (T_{ab} - T_s) \quad \text{II.56}$$

$$\text{Avec : } A_{s,int} = \pi \cdot D_{s,int} \cdot L_s \quad ; \quad A_{s'} = D_{s,ext} \cdot L_s \quad ; \quad A_{s''} = D_{s,ext} \cdot L_t \cdot N_t$$

D_s : Diamètre du serpentine

- **Pour l'absorbeur :**

$$m_{ab} C_{p_{ab}} \frac{dT_{ab}}{dt} = Q_{r,a-v} + Q_{v,a-air1} + Q_{v,air2-a} + Q_{c,s-a} + Q_{r,p-a} \quad \text{II.57}$$

$$m_{ab} C_{p_{ab}} \frac{dT_{ab}}{dt} = A_{ab'} h_{r,a-v} (T_a - T_v) + A_{ab} h_{v,air1-a} (T_{ab} - T_{air1}) + A_{ab} \cdot h_{v,ab-air2} (T_{air2} - T_{ab}) + A_{ab''} \cdot h_{c,s-ab} (T_{ab} - T_s) + A_{ab} \cdot h_{r,p-ab} (T_p - T_{ab}) \quad \text{II.58}$$

Où :

$$A_{ab} = [R_{ext} \cdot L_t + S_1 \cdot (N_t - 1)] \quad ; \quad A_{ab'} = S_1 \cdot (N_t - 1) \quad ; \quad A_{ab''} = R_{ext} \cdot L_t \cdot N_t$$

A_{ab} , $A_{ab'}$, et $A_{ab''}$ sont respectivement, la surface d'absorbeur, la surface apparente de l'absorbeur, et la surface de contact entre le tube et l'absorbeur.

- **Pour l'eau :**

$$M_{eau} C_{p_{eau}} \frac{dT_{eau}}{dt} = Q_{v,s-eau} - Q_{u,th} \quad \text{II.59}$$

$$T_{eau,sortie} = (T_{eau,e} - T_s) \cdot e^{\frac{-2\pi R_{t,int} \cdot h_{v,s-eau} l_s}{\dot{m}_{eau} C_{p_{eau}}}} + T_s \quad \text{II.60}$$

$$T_{eau\ moy} = \frac{-1}{\frac{2\pi R_{t,int} \cdot h_{v,s-eau} l_s}{\dot{m}_{eau} C_{p_{eau}}}} (T_{eau,e} - T_s) \cdot \left(e^{\frac{-2\pi R_{t,int} \cdot h_{v,s-eau} l_s}{\dot{m}_{eau} C_{p_{eau}}}} - 1 \right) + T_s l_s \quad \text{II.61}$$

(Le développement de cette équation est dans l'annexe 'A')

- **Pour l'air de canal inferieur :**

$$M_{air2} C_{p_{air}} \frac{dT_{air2}}{dt} = Q_{v,a-air2} + Q_{v,p-air2} - Q_{u,th} \quad \text{II.62}$$

$$T_{air2,sortie} = \left(T_{air2,e} - \frac{\frac{l_{ab}}{\varepsilon} \cdot h_{v,ab-air2} \cdot T_{ab} + l_p \cdot h_{v,p-air2} \cdot T_p}{\frac{l_{ab}}{\varepsilon} \cdot h_{v,ab-air2} - l_p \cdot h_{v,p-air2}} \right) \cdot e^{-\frac{\frac{l_{ab}}{\varepsilon} \cdot h_{v,ab-air2} - l_p \cdot h_{v,p-air2}}{M_{air2} C_{p_{air}}} L} + \frac{\frac{l_{ab}}{\varepsilon} \cdot h_{v,ab-air2} \cdot T_{ab} + l_p \cdot h_{v,p-air2} \cdot T_p}{\frac{l_{ab}}{\varepsilon} \cdot h_{v,ab-air2} - l_p \cdot h_{v,p-air2}} \quad \text{II.63}$$

$$T_{air2,moy}(L) = \frac{-M_{air2} C_{p_{air}}}{\left(\frac{l_{ab}}{\varepsilon} \cdot h_{v,ab-air2} - l_p \cdot h_{v,p-air2} \right) L} \left(T_{air2,e} - \frac{\frac{l_{ab}}{\varepsilon} \cdot h_{v,ab-air2} \cdot T_{ab} + l_p \cdot h_{v,p-air2} \cdot T_p}{\frac{l_{ab}}{\varepsilon} \cdot h_{v,ab-air2} - l_p \cdot h_{v,p-air2}} \right) \times \left(e^{-\frac{\frac{l_{ab}}{\varepsilon} \cdot h_{v,ab-air2} - l_p \cdot h_{v,p-air2}}{M_{air2} C_{p_{air}}} L} - 1 \right) + \frac{\frac{l_{ab}}{\varepsilon} \cdot h_{v,ab-air2} \cdot T_{ab} + l_p \cdot h_{v,p-air2} \cdot T_p}{\frac{l_{ab}}{\varepsilon} \cdot h_{v,ab-air2} - l_p \cdot h_{v,p-air2}} L \quad \text{II.64}$$

(Le développement de cette équation est dans l'annexe 'A')

II.64

- **Pour la plaque métallique :**

$$m_p C_{p_p} \frac{dT_p}{dt} = Q_{c,p-i} + Q_{r,p-ab} + Q_{v,p-air2} \quad \text{II.65}$$

$$m_p C_{p_p} \frac{dT_p}{dt} = A_p \cdot h_{c,p-i} (T_i - T_p) + A_p \cdot h_{r,p-ab} (T_{ab} - T_p) + A_p \cdot h_{v,p-air2} (T_{air2} - T_p)$$

$$\text{Et : } A_p = L_p \cdot l_p$$

II.66

- ❖ **Pour l'isolant :**

$$m_i C_{p_i} \frac{dT_i}{dt} = Q_{c,p-i} + Q_{r,i-sol} + Q_{v,i-amb} \quad \text{II.67}$$

$$m_i C_{p_i} \frac{dT_i}{dt} = A_p \cdot h_{c,p-i} (T_p - T_i) + A_i \cdot h_{r,i-sol} (T_{sol} - T_i) + A_i \cdot h_{v,i-amb} (T_{amb} - T_i) \quad \text{II.68}$$

$$\text{Et } A_i = L_i \cdot l_i$$

II.3.4. Expressions d'échange thermique :

Le schéma donné dans la **figure II.8** représente l'analogie électrique des transferts thermiques dans le capteur hybride PV/T à air proposé dans cette étude, les échanges thermiques au niveau du capteur hybride s'effectuent selon les trois modes d'échange de chaleur : conduction, convection, rayonnement.

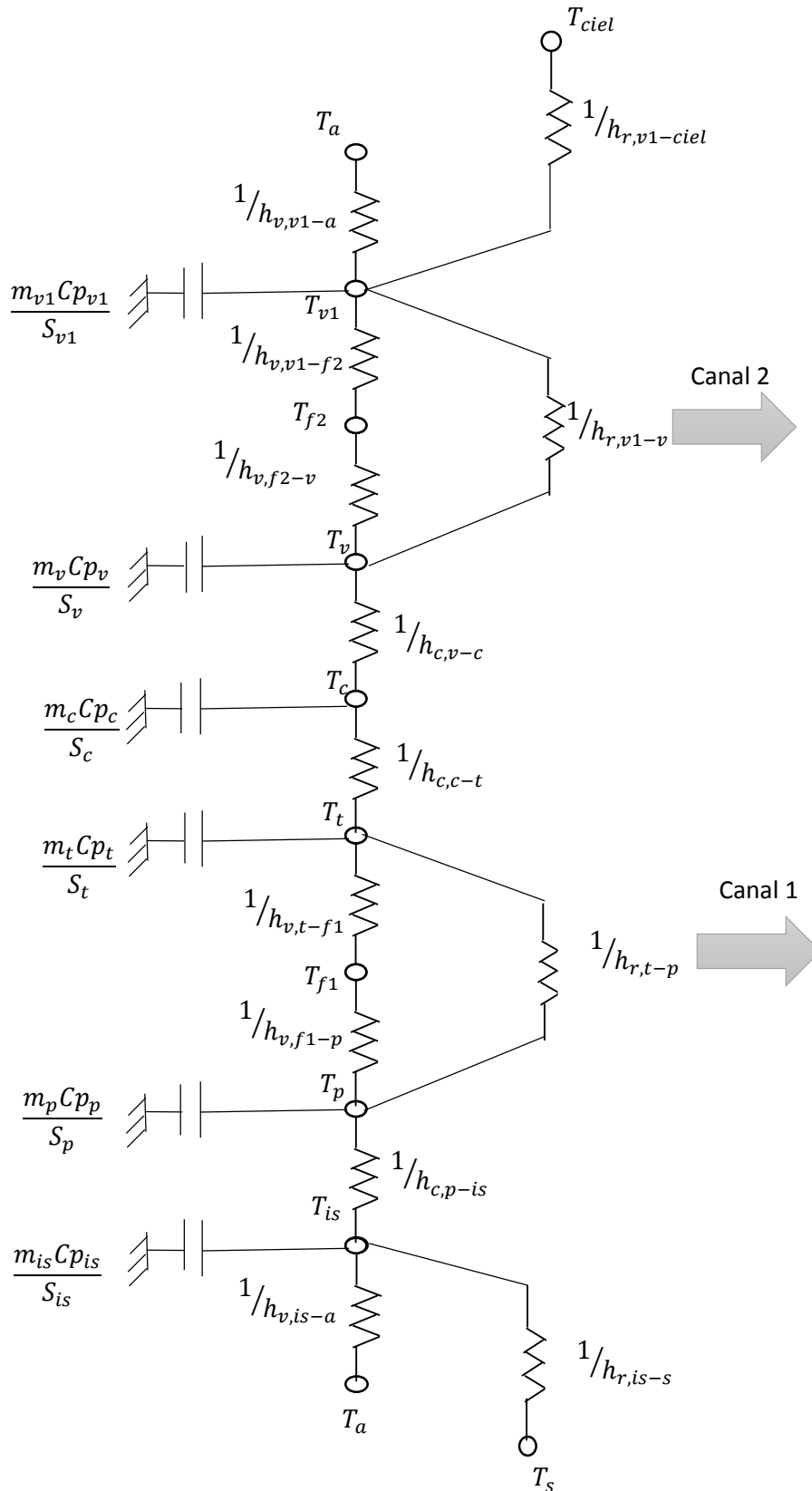


Figure II.8. Schéma équivalent des résistances thermiques pour le capteur hybride.

La figure II.9 représente l'analogie électrique des transferts thermique dans le capteur thermique bi-fluide :

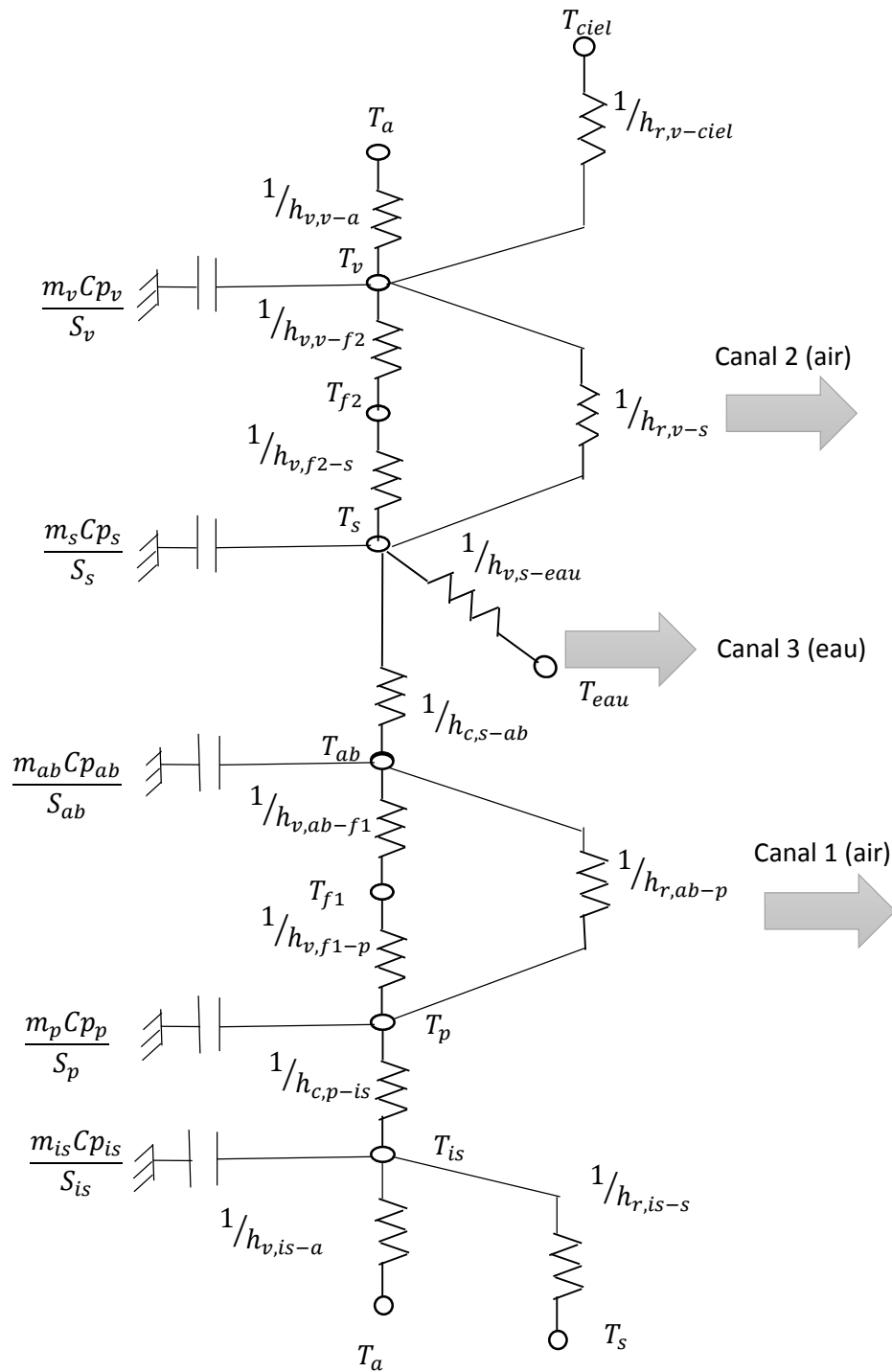


Figure II.9. Schéma équivalent des résistances thermiques pour le capteur bi-fluide.

a. Échange thermique par rayonnement

Ce type de transfert thermique ne nécessite pas la présence d'un milieu matériel intermédiaire entre les deux milieux d'échange. Un corps placé dans température donnée émet un rayonnement thermique sous forme des ondes électromagnétiques dans toutes les directions :

$$Q_{a-b} = A \cdot h_{a-b} (T_a - T_b)$$

Avec : h_{a-b} : Coefficient d'échange thermique par rayonnement ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$).

T_a : Température de l'élément a.

T_b : Température de l'élément b.

Pour les deux capteurs (capteur hybride et capteur bi-fluide) l'échange thermique par rayonnement existe entre :

- Les faces extérieures de la couverture vitrée et le ciel (voûte céleste) ;
- Les faces extérieures de l'isolant et le sol ;
- Deux éléments en parallèles des capteurs séparés avec une distance libre (d).

• l'échange thermique par rayonnement entre la couverture vitrée et la voûte céleste

Le coefficient de transfert radiatif entre la vitre et le ciel est donné par la formule :

$$h_{r,v-c} = \frac{\sigma(T_v + T_c)(T_v^2 + T_c^2)}{\frac{1}{\varepsilon_v}} \quad \text{II.69}$$

Où ε_v et σ sont respectivement l'émissivité de verre et la constante de STEFAN – BOLTZMANN

La température de ciel est donnée par la formule de Swinbank [22,19,4] :

$$T_c = 0.0552 \times T_a^{1.5} \quad \text{II.70}$$

• Coefficient d'échange thermique entre le sol et l'isolant

Le coefficient d'échange thermique par rayonnement entre le sol et la plaque isolante est décrit comme suit [23] :

$$h_{r,i-s} = \sigma \cdot \varepsilon_i \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos\varphi) \cdot (T_i^2 - T_s^2) \cdot (T_i + T_s) \quad \text{II.71}$$

La température du sol est donnée par la corrélation suivante [24] :

$$T_s = 2 + T_a \quad \text{II.72}$$

• **L'échange thermique par rayonnement entre deux éléments parallèles**

L'échange radiatif entre deux plaques parallèles d'indice respectifs **i** et **j**, séparées par une distance libre **d** peut être exprimée par la corrélation suivante [25,26] :

$$h_{r,i-j} = \sigma \frac{(T_i + T_j)(T_i^2 + T_j^2)}{\frac{1}{\varepsilon_i} + \frac{1}{\varepsilon_j} - 1} \quad \text{II.73}$$

Où : ε_i et ε_j sont respectivement les émissivités de la plaque **i** et de la plaque **j**.

Cet échange peut être trouvé entre les éléments suivants :

- La surface supérieure de la couverture vitrée du module PV et la surface interne de la couverture vitrée supplémentaire du capteur hybride.
- La couche de Tedlar et la surface supérieure de la plaque métallique (pour les deux capteurs).
- Couverture vitrée du capteur bi-fluide d'une part et du serpentin et l'absorbeur de l'autre part.
- L'absorbeur et la plaque métallique.

b. Échange thermique par conduction

Il s'agit du transfert de la chaleur d'un point à un autre dans un milieu solide, sous l'influence d'un gradient de température. On va étudier le transfert de chaleur par conduction dans un milieu solide homogène de surface A_i et isotrope, caractérisé par sa conductivité thermique λ_i et son épaisseur e_i , ce milieu est traversé par un flux de chaleur Q_i et dont les deux faces sont portées à des températures T_i et T_j (respectivement).

La loi de Fourier nous donne [27] : $Q_i = h_{cond,i} \times A_i \times (T_i - T_j)$

$h_{cond,i}$: Coefficient d'échange par conduction à travers le milieu « i ».

$$\text{Et : } h_{cond,i} = \frac{\lambda_i}{e_i} \quad \text{II.74}$$

Dans le cas de deux couches voisines **i** et **j**, le coefficient d'échange thermique par conduction est calculé à travers l'expression de Chow [27] :

$$h_{cond,i-j} = \frac{1}{\frac{\lambda_i}{e_i} + \frac{\lambda_j}{e_j}} \quad \text{II.75}$$

Cet échange peut être trouvé entre les éléments suivants :

- La surface interne de la couverture vitrée du module et les cellules PV.
- Les cellules PV et la couche de Tedlar (capteur hybride).
- La serpentine et l'absorbeur (capteur bi-fluide).
- Plaque métallique et l'isolant. (pour les deux capteurs)

c. Echange thermique par convection :

La convection fait référence aux transferts de chaleur et se produisant entre une surface d'un solide et un fluide en mouvement lorsqu'ils sont à des températures différentes. Newton [28] a élaboré une formule régissant ce type de transfert thermique :

$$Q_i = h_{conv,i} \times A_i \times (T_s - T_f)$$

$h_{conv,i}$: Coefficient d'échange par convection à travers le milieu « i ».

Dans notre système d'étude, le transfert de chaleur par convection s'effectue en cinq régions :

- A l'extérieur du capteur : entre le vitrage et l'isolant avec le milieu ambiant.
 - A l'intérieur du capteur : entre l'air avec la vitre et l'air avec la plaque métallique (pour les deux capteurs), et l'eau avec le serpentin (pour le capteur bi-fluide).
 - A l'extérieur du ballon de stockage : entre la couche extérieur et l'air.
 - A l'intérieur du ballon de stockage : entre la couche intérieur et l'eau, entre les tubes et l'eau.
 - Pour les tubes à l'extérieur du ballon de stockage : entre les tubes et l'eau, entre les tubes et l'air ambiant.
- **Coefficient de transfert convectif dû au vent :** Pour un capteur installé à l'air libre en présence du vent, le coefficient de transfert thermique par convection h (W /m². K) est donné par la corrélation de HOTTEL et WOERTZ suivante [29,19] :

$$h_v = 5,67 + 3,86V_{vent} \quad \text{II.76}$$

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

• **Coefficient de transfert convectif à l'intérieur des constitutifs de système**

A l'intérieur de chaque élément de notre système, ces coefficients d'échange thermique sont relatifs aux échanges dus aux contacts entre la vitre et l'air, l'air et la plaque métallique, l'air et la plaque absorbante et le serpentin avec l'eau, la couche intérieur et l'eau, les tubes et l'eau. L'évaluation de ces coefficients dépend de plusieurs paramètres tel que ; le nombre de Nusselt (N_u), la conductivité thermique du fluide caloporteur (λ_f), et aussi de la géométrie considérée à travers le diamètre hydraulique (D_h).

Le nombre de Nusselt est défini par :

$$N_u = \frac{h_v \cdot D_h}{\lambda_f} \quad \text{II.77}$$

Comme les corrélations qui nous permettent de déterminer le nombre de Nusselt dépendent fortement au régime d'écoulement de fluide caloporteur, il s'avère nécessaire de le connaître, ce régime est caractérisé par plusieurs paramètres (Reynolds (R_e), Prandtl (P_r), Nusselt (N_u)) et Grashof (G_r). Dans ce qui suit nous allons choisir de travailler avec l'expression du nombre de Nusselt donnée par Chow [30] :

$$\text{Avec : } R_e = \frac{\rho_f \times V_f \times D_h}{\mu_f} \quad \text{II.78} \quad ; \quad P_r = \frac{c_p \times \mu_f}{\lambda_f} \quad \text{II.79} \quad ; \quad G_r = \frac{g \beta \Delta T L_c^3 \rho^2}{\mu^2} \quad \text{II.80}$$

➤ Comme nous utilisons une pompe, nous utilisons alors les corrélations utilisées par Dittus et Boelter [31] de la convection forcée pour l'eau :

$$\left\{ \begin{array}{ll} N_u = 0,023 \times R_e^{0.8} \times P_r^{0.33} & \text{en régime turbulent} \quad 10^4 < R_e < 1,2 \cdot 10^5 \quad \text{II.81} \\ N_u = 4,36 & \text{en régime laminaire} \quad R_e < 2300 \quad \text{II.82} \end{array} \right.$$

➤ On utilisera les corrélations de Mercer [32] pour l'air en convection forcée :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Régime laminaire (} R_e < 2300 \text{) } N_u = 4,9 + \frac{0,0606 \left(\frac{R_e P_r D_h}{L_c} \right)^{1,2}}{1 + 0,0909 \left(\frac{R_e P_r D_h}{L_c} \right)^{0,7} P_r^{0,17}} \quad \text{II.83} \\ \text{Pour le régime turbulent (} R_e > 2300 \text{), on utilise les corrélations de Dittus et Boelter [31] :} \end{array} \right.$$

$$N_u = 0,023 \times R_e^{0.8} \times P_r^{0.4} \quad \text{II.84}$$

II.3.5. Calcul des pertes thermiques

Le flux solaire reçu sur le module photovoltaïque ne se convertit pas totalement en énergies électrique et thermique utiles. Une partie de ce rayonnement est perdue sous forme de chaleur et rayonnement, au niveau des surfaces avant et arrière du module.

$$Q_p = Q_{p,av} + Q_{p,ar} \quad \text{II.85}$$

Où :

$$Q_{p,av} = S \cdot U_{av} \cdot (T_{v2} - T_a) \quad \text{II.86}$$

$$Q_{p,ar} = S \cdot U_{ar} \cdot (T_p - T_a) \quad \text{II.87}$$

Les deux coefficients U_{av} et U_{ar} sont les coefficients de perte thermique sur la surface avant et sur la surface arrière du capteur respectivement.

$$U_{av} = \left[\frac{1}{h_{c,v}} + \frac{1}{h_{v,v2-a} + h_{r,v2-ciel}} \right]^{-1} \quad \text{II.88}$$

$$U_{ar} = \left[\frac{1}{h_{c,p-is}} + \frac{1}{h_{v,is-a} + h_{r,is-sol}} \right]^{-1} \quad \text{II.89}$$

Finalement la puissance perdue sera donnée par :

$$Q_p = S \cdot \left\{ \left[\frac{1}{h_{c,v}} + \frac{1}{h_{v,v2-a} + h_{r,v2-ciel}} \right]^{-1} \cdot (T_{v2} - T_a) + \left[\frac{1}{h_{c,p-is}} + \frac{1}{h_{v,is-a} + h_{r,is-sol}} \right]^{-1} \cdot (T_p - T_a) \right\} \quad \text{II.90}$$

- **La puissance thermique :**

$$P_{ther} = m \times C_p \times \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad \text{II.91}$$

m : La masse.

C_p : Chaleur spécifique.

- **Le rendement thermique :**

$$\eta_{ther} = P_{ther}/G \times S \quad \text{II.92}$$

G : l'éclairement solaire.

S : la surface de captation.

II.4. Conclusion

L'étude théorique nous a permis de modéliser le système par des équations qui caractérisent le fonctionnement et le comportement du système étudié. Cette modélisation est passée par quelques hypothèses simplificatrices afin de simplifier la modélisation. Ces équations seront exploitées ultérieurement dans un modèle numérique pour extraire des résultats de simulation qui permettent de prévoir le comportement énergétique du système.

Chapitre : III

Modèle numérique

III.1.Introduction

À partir des équations développées dans le chapitre II, l'objectif dans le présent chapitre est de construire un programme numérique. Ce dernier est développé et élaboré dans l'environnement de programmation MATLAB. Le système d'équations est résolu pour évaluer la performance électrique et thermique du système étudié.

III.2. Hypothèses simplificatrices pour la résolution

Les hypothèses simplificatrices retenues pour la résolution numérique des équations qui gouvernent les échanges énergétiques du système sont :

- ❖ Le terme de stockage de chaque élément du capteur hybride (accumulation ou puissance conservée dans chaque élément) est discrétisé par un schéma implicite avec un pas de temps Δt :

$$\Delta t = M_i \cdot C_i \cdot \frac{dT_i}{dt} = M_i \cdot C_i \cdot \frac{\Delta T_i}{\Delta t}$$

- ❖ On travaille avec un système quasi-stationnaire dans la résolution numérique de système d'équations thermiques, c'est-à-dire on obtient des résultats pour un pas de temps bien déterminé.

III.3. Modèle de résolution numérique

III.3.1. Simulation en utilisant le logiciel de programmation MATLAB

MATLAB (MATrix LABoratory) est l'une des principales plateformes de développement commerciale. MATLAB se veut un système interactif de calcul numérique et de visualisation graphique. Il possède un langage de programmation simple et efficace. MATLAB intègre de nombreux outils du calcul matriciel, les principaux algorithmes de l'analyse numérique (schémas d'intégration, interpolation, différentiation...), des outils pour le traitement du signal, des outils de visualisation en 2D et 3D et des outils pour l'intégration de codes existants (pour utiliser sous MATLAB des programmes écrits en Fortran ou en C). MATLAB est renforcé d'une multitude de boîtes à outils (toolboxes) spécifiques à des domaines pointus : optimisation, traitement du signal, statistique, calcul formel...

III.3.2. Modèle électrique

Le programme de simulation est une forme de schéma-bloc élaboré dans SIMULINK. Ce dernier est un module optionnel de modélisation de l'environnement MATLAB Il est basé sur les schémas blocs et de simulation de systèmes dynamiques linéaires et non linéaires. La méthode de résolution électrique est basée sur la résolution de l'équation fondamentale de la caractéristique I-V d'un module PV et sur les différents paramètres électriques et météorologiques (température et éclairement) de référence. Ces derniers sont donnés par le fabricant :

$$I(V) = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V - I R_S)}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{V - I R_S}{R_{sh}}$$

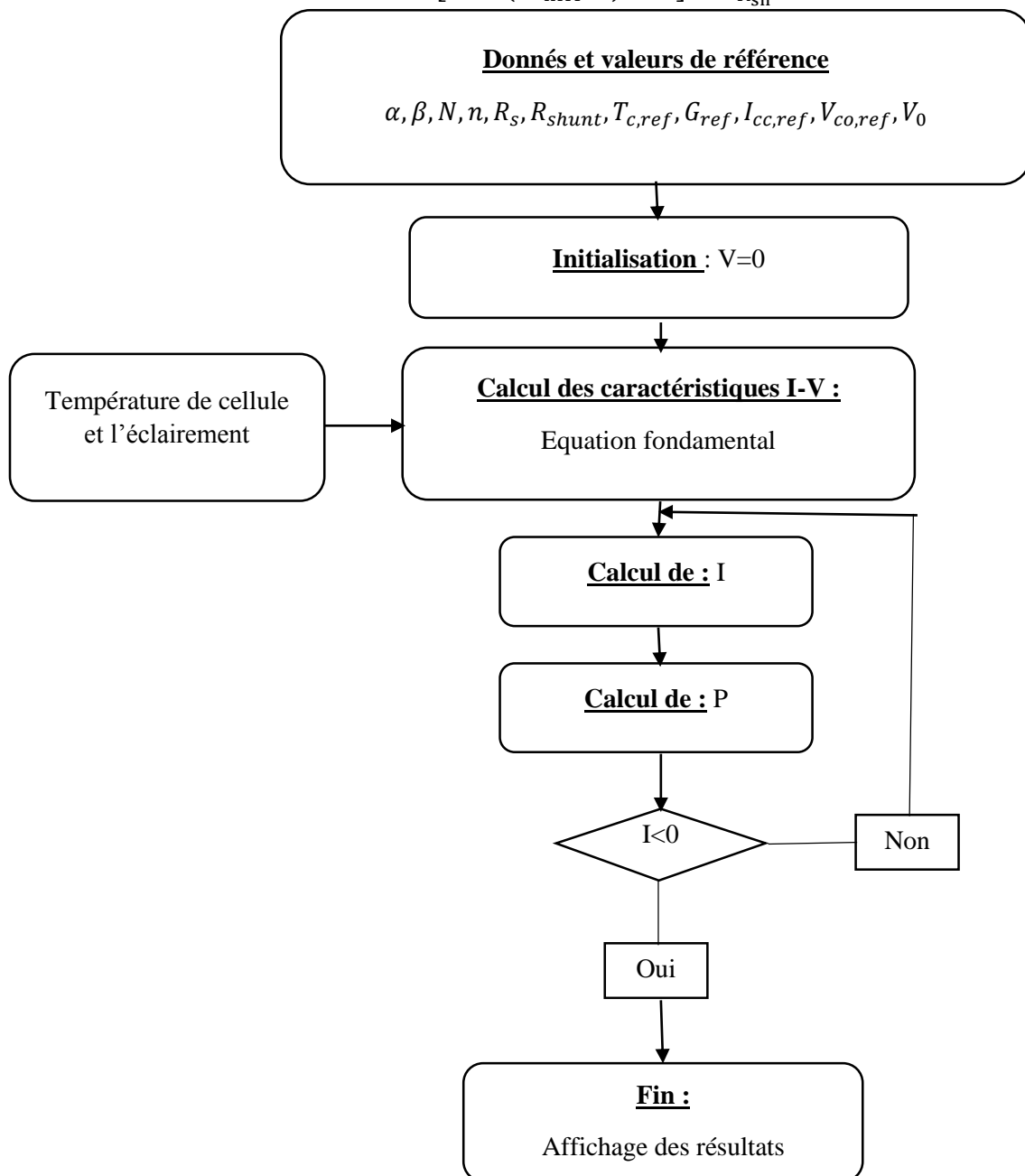


Figure III.1. Organigramme des étapes de calcul suivies pour la résolution électrique du capteur PV-T

III.3.3. Modèle thermique

A partir des équations développées dans le chapitre II, il a été réalisé un programme de simulation permettant l'évaluation des caractéristiques des capteurs solaires (hybride PV-T, capteur bi-fluide). Les différentes étapes de l'algorithme de calcul développé dans le programme de simulation de performance thermique de chaque capteur, élaboré dans le cadre de notre étude, sont présentées dans les (figure III.2) les résultats obtenus sont visualisés sous forme des courbes.

Et il est nécessaire de transférer le système d'équations physique vers une écriture numérique pour l'établissement du programme numérique destiné à la résolution des équations du bilan thermique.

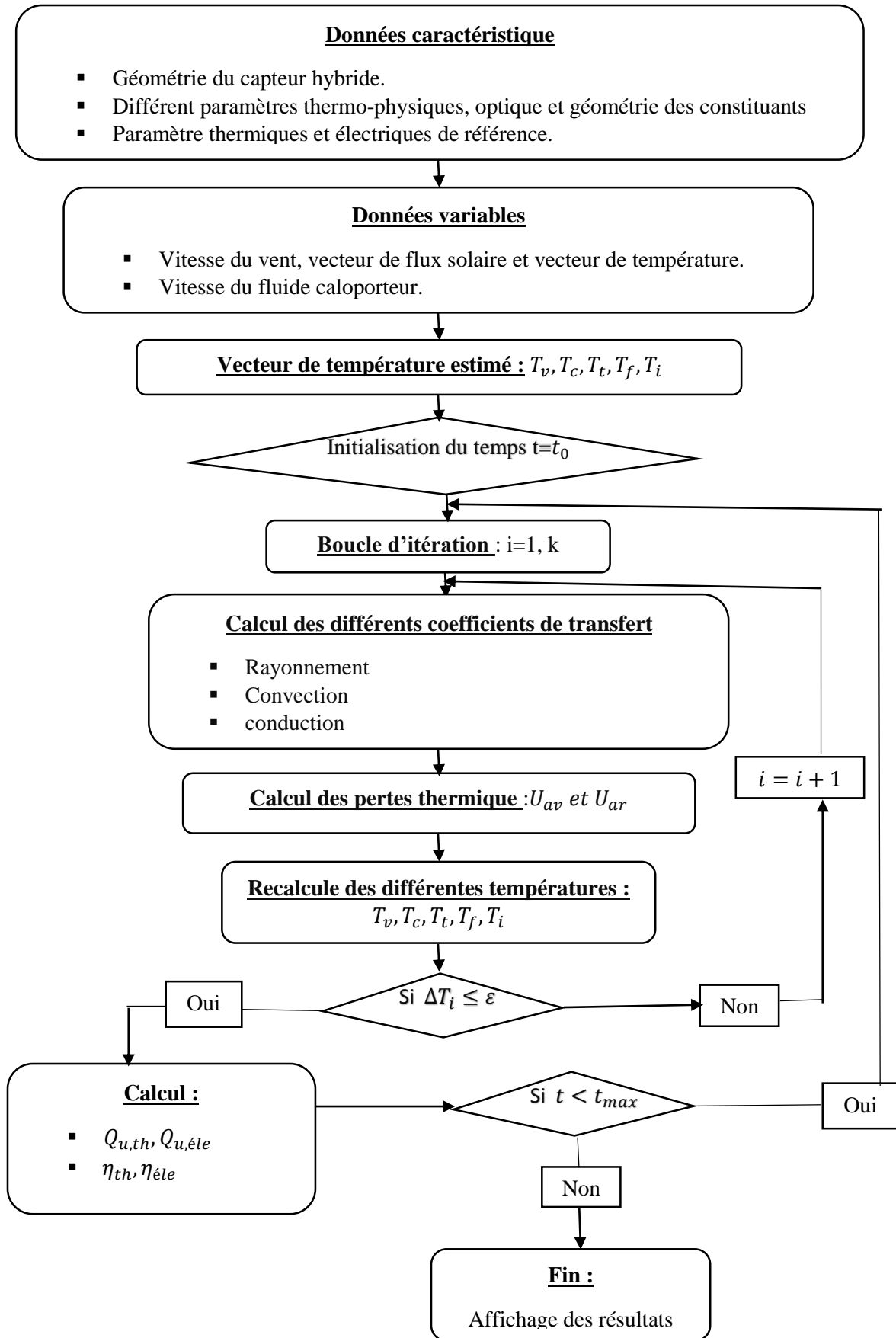


Figure III.2. Organigramme des étapes de calcul suivies pour la résolution des équations du capteur PV/T.

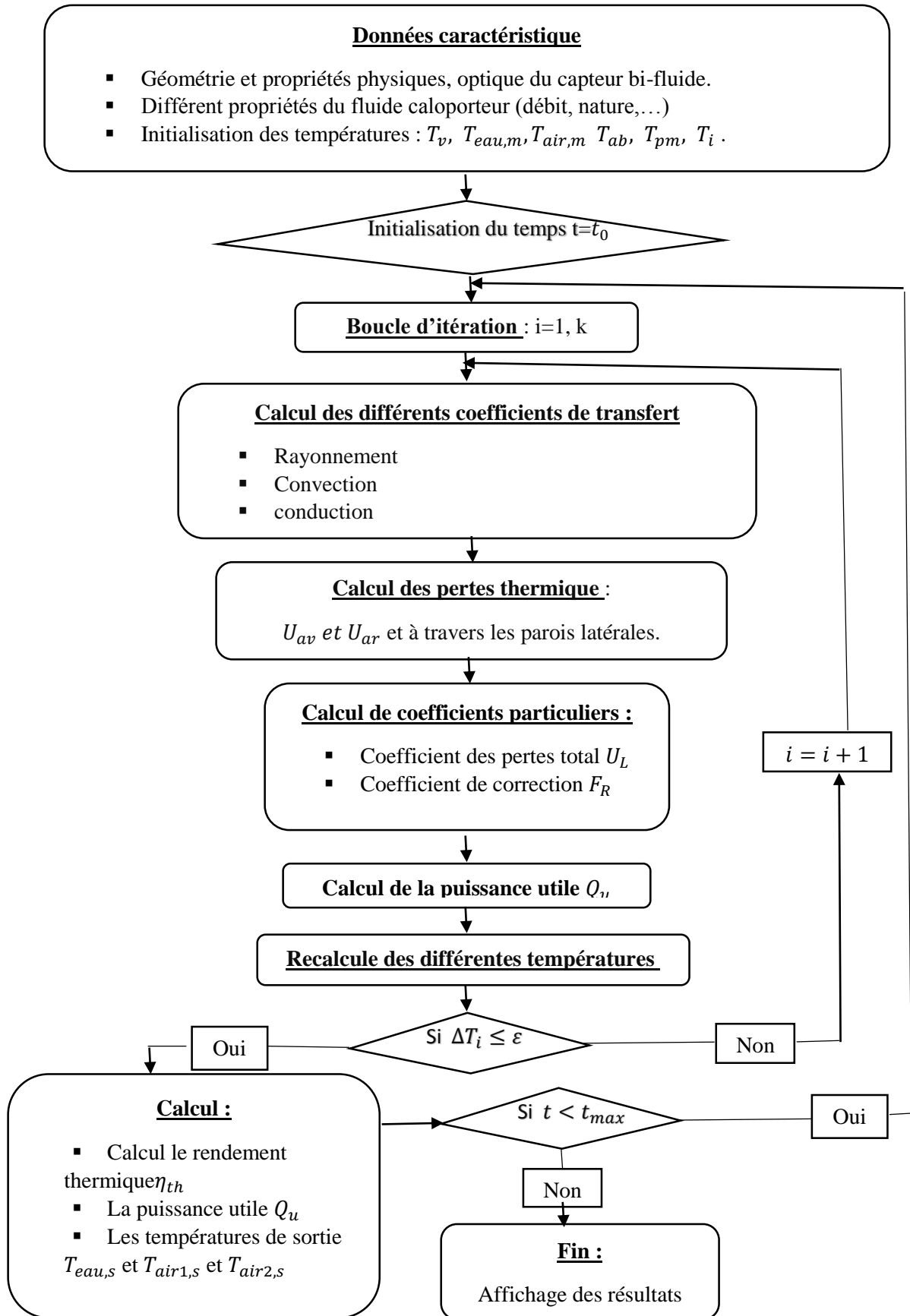


Figure III.3. Organigramme des étapes de calcul suivies pour la résolution numérique des équations du capteur thermique bi-fluide.

III.4. Les étapes générales du calcul

- Etape 1 :

Dans cette première étape, toutes les données qui ne dépendent pas des températures « Inconnues » sont introduites. Il s'agit notamment de :

- La Géométrie des éléments du capteur (capteur hybride ou capteur bi-fluide);
- Les Propriétés physiques des composantes du capteur ;
- Les Constantes et valeurs des références ;
- Les Données météorologiques.

- Etape 2 :

Dans cette seconde étape, toutes les températures des différents éléments du capteur solaire hybride sont initialisées. Il s'agit notamment de :

- la température des cellules solaires T_c ;
- la température de l'isolant T_i ;
- la température de la plaque métallique T_{pm} ;
- la température du Tedlar T_t ;
- la température moyenne du fluide supérieur T_{mf1} ;
- la température moyenne du fluide inférieur T_{mf2} ;
- la température du verre supplémentaire T_{v1} ;
- la température du verre.

Et pour le capteur solaire bi-fluide :

- la température de couverture vitrée T_v ;
- la température de l'isolant T_i ;
- la température de l'absorbeur ;
- la température de serpentine ;
- la température de la plaque métallique.

- Etape 3 :

Dans cette étape, toutes les données qui dépendent de la température sont évaluées par le programme suivant les équations de bilan thermique données dans le chapitre III. Une boucle itérative nécessaire aux calculs des différentes températures est lancée. Le travail effectué consiste notamment :

Au calcul des propriétés du fluide caloporteur telles que :

- la viscosité cinématique ;
- la conductivité thermique ;
- la capacité calorifique ;
- la masse volumique.

À la détermination du régime d'écoulement du fluide caloporteur, principalement :

- le calcul du débit volumique ;
- l'évaluation de la vitesse du fluide ;
- le calcul de la section de passage du fluide ;
- l'évaluation du diamètre hydraulique DH ;
- l'évaluation des nombres de Reynolds Re et de Prandtl Pr ;
- L'évaluation de la corrélation du nombre de Nusselt ;

Au calcul des coefficients des transferts thermiques tels que :

- les coefficients de transferts radiatifs ;
- le coefficient de transfert conductif ;
- les coefficients de transfert convectif pour ;
- l'échange dû au vent ;
- le transfert dû au contact fluide caloporteur-capteur ;
- les coefficients des pertes thermiques par l'arrière et par l'avant du capteur solaire.

- **Etape 4 :**

Dans cette étape, les valeurs des températures T_v , T_c , T_t , T_p , T_s , T_{ab} ... et T_i sont déterminées à partir d'une procédure itérative.

- **Etape 5 :**

Dans cette étape, un test de convergence sur la température est effectué. Ce test est considéré positif si la différence maximale entre le champ de température de l'itération courante et celle de l'itération précédente est inférieure à une tolérance fixée au début par l'utilisateur (10^{-6}).

- **Etape 6 :**

Dans cette étape les différents paramètres et caractéristiques du capteur hybride sont évalués, telles que la puissance thermique, la puissance électrique, les rendements thermique et électrique ... etc.

- **Etape 7 :**

Dans cette dernière étape, les résultats attendus sont visualisés par l'intermédiaire de tracés de courbes ou de tableaux de valeurs.

Les grandeurs visualisées sont notamment :

- Les températures de chaque composant des deux capteurs : $T_{v1}, T_c, T_{v2}, T_t, T_{pm}, T_s, T_{f1}, T_{eau,s} \dots T_i$;
- Les puissances utiles thermique, électrique et global ;
- Les rendements thermique et électrique.

III.5. Les équations discrétisés :

Après la discrétisation la forme numérique du système d'équation (Annex A) s'écrit comme ci-dessous :

- **Capteur PV/T :**

$$T_{v1,i+1}^t = A. T_{v1}^{t-1} + B. T_{ciel}^t + C. T_{v,i}^t + D. T_{fsup,i}^t + E. T_a^t$$

$$T_{fsup,i+1}^t = A1. T_{v1,i}^t + B1. T_{v,i}^t + C1. (T_{fsups,i}^t + T_{fsupe}^t)$$

$$T_{v,i+1}^t = A2. T_{v,i}^{t-1} + B2. T_{v1,i}^t + C2. T_{fsup,i}^t + E2. T_{c,i}^t + S$$

$$T_{c,i+1}^t = A3. T_{c,i}^{t-1} + B3. T_{v,i}^t + C3. T_{t,i}^t + S'$$

$$T_{t,i+1}^t = A4. T_{t,i}^{t-1} + B4. T_{c,i}^t + C3. T_{finf,i}^t + D3. T_{p,i}^t + S''$$

$$T_{finf,i+1}^t = A5. T_{t,i}^t + B5. T_{p,i}^t + C5. (T_{finfs,i}^t + T_{finfe}^t)$$

$$T_{p,i+1}^t = A6. T_{p,i}^{t-1} + B6. T_{is,i}^t + C6. T_{finf,i}^t + D6. T_{t,i}^t$$

$$T_{is,i+1}^t = A7. T_{is,i}^{t-1} + B7. T_{p,i}^t + C7. T_a^t + D7. T_{sol,i}^t$$

- **Capteur thermique bi-fluide :**

$$T_{v,i+1}^t = a. T_{v,i}^{t-1} + b. T_{ciel}^t + c. T_{ab,i}^t + d. T_{tub,i}^t + e. T_a^t + f. T_{fsup,i}^t$$

$$T_{fsup,i+1}^t = a1. T_{v,i}^t + b1. T_{ab,i}^t + c1. T_{tub,i}^t + d1. (T_{fsups,i}^t + T_{fsupe}^t)$$

$$T_{ab,i+1}^t = a2. T_{ab,i}^{t-1} + b2. T_{v,i}^t + c2. T_{tub,i}^t + d2. T_{fsup,i}^t$$

$$T_{tub,i+1}^t = a3. T_{tub,i}^{t-1} + b3. T_{v,i}^t + c3. T_{ab,i}^t + d3. T_{fsup,i}^t$$

$$T_{eau,i+1}^t = a4. T_{eaue}^t + b4. T_{tub,i}^t + S'''$$

$$T_{finf,i+1}^t = a5. T_{ab,i}^t + a5. T_{p,i}^t + a5. (T_{finfs,i}^t + T_{finfe}^t)$$

$$T_{pm,i+1}^t = a6.T_{pm,i}^{t-1} + b6.T_{ab,i}^t + c6.T_{is,i}^t + d6.T_{finf,i}^t$$

$$T_{iso,i+1}^t = a7.T_{is,i}^{t-1} + b7.T_{pm,i}^t + c7.T_a^t + d7.T_{sol,i}^t$$

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons établi un programme numérique basé sur l'enchaînement de calcul précédent pour résoudre le système des équations en prenant en considération les hypothèses simplificatrices pour la résolution. Nous avons fourni un modèle électrique et thermique, l'organigramme et l'algorithme de calcul qui explique en détail les étapes de calcul. L'exploitation du modèle fera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre IV

CONCEPTION ET RÉALISATION
EXPÉRIMENTALE

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous décrirons les éléments constitutifs du système et nous présentons leurs propriétés géométriques, thermo-physiques, et optiques. Nous présentons aussi les différentes étapes suivies pour la réalisation pratique du prototype. Nous présentons également les différents instruments de mesures nécessaires pour effectuer les tests expérimentaux. La réalisation du système ainsi que l'ensemble des expériences ont été faites à l'Unité de Recherche en Energie Renouvelables au Milieu Saharien (URERMS) sis à ADRAR.

IV.2. Conception du système

La figure suivante IV.1 représente une illustration schématisée du système à réaliser, et ce pour donner une idée simplifiée sur son principe de fonctionnement. Les écoulements des différents fluides intervenant dans le système sont représentés par des flèches.

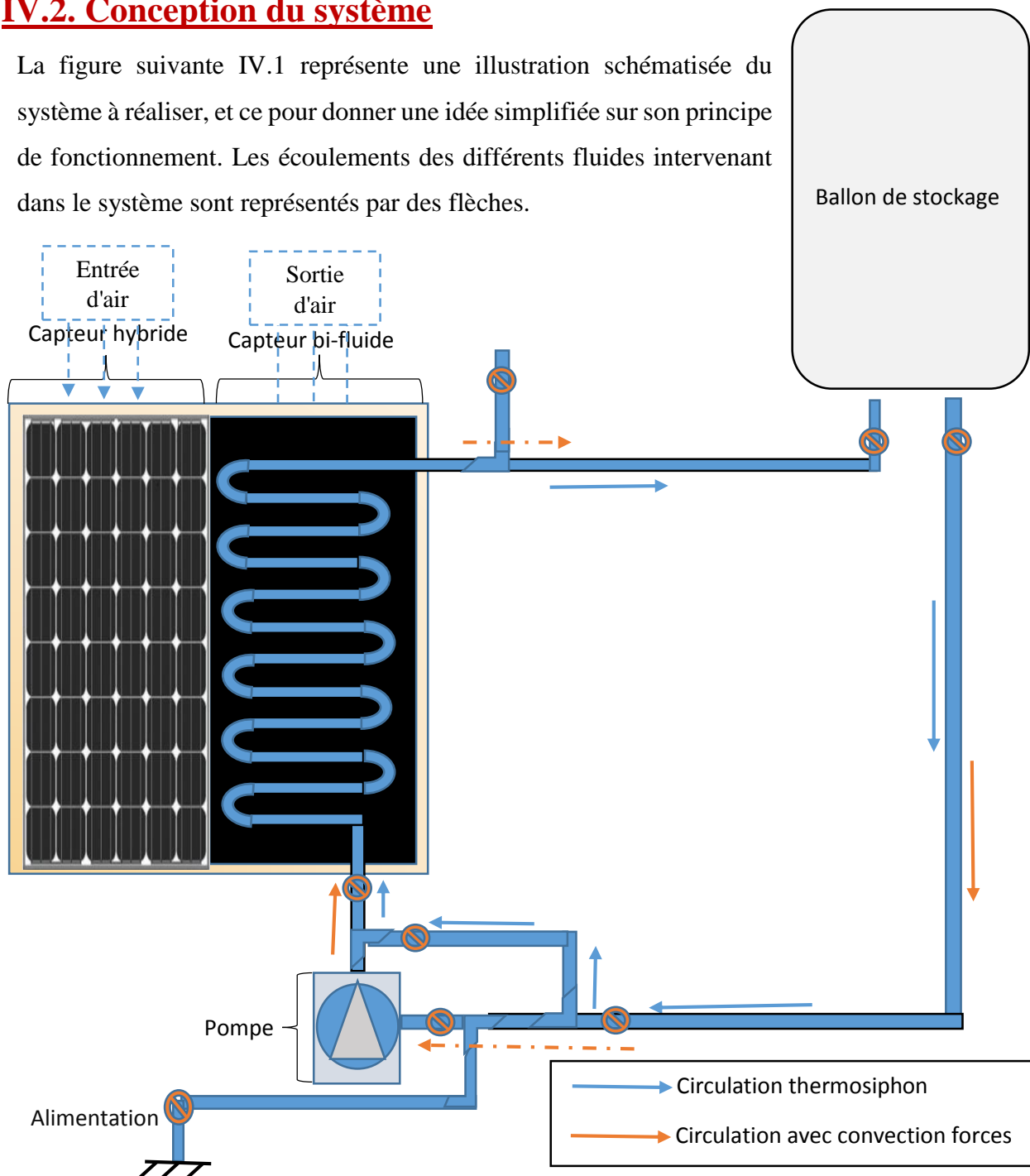


Figure IV.1. Un schéma simplifié représentant le système étudié.

- Le système solaire à étudier comprend les éléments suivants :

IV.2.1. Le capteur solaire hybride PV/T

Le capteur hybride PV/T à double écoulement est constitué principalement de :

- ❖ Un module photovoltaïque monocristallin UDT50 ;
- ❖ Deux conduites d'air en co-courant situées en-dessus et au-dessous du module PV ;
- ❖ Une plaque métallique placée au-dessus d'un isolant thermique

La surface de captation de capteur PV/T égale à 1,28m x 0,32m. le capteur hybride est installé avec une inclinaison de 28° par rapport au plan horizontal. Il est orienté vers le sud. Il est isolé thermiquement au niveau de sa surface arrière en utilisant deux couches de polystyrène et une plaque en bois. Le capteur hybride est connecté avec un capteur thermique bi-fluide.

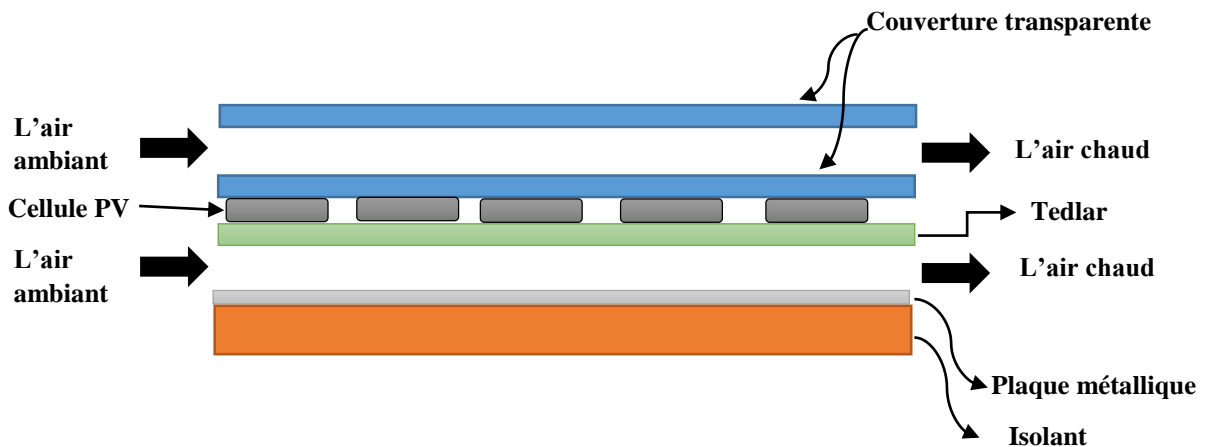


Figure IV.2. Représentation schématique du capteur hybride PV/T à double écoulement

IV.2.2. Le capteur solaire thermique

La surface de captation de capteur solaire thermique bi-fluide égale à 1,28m x 0,30m. Le capteur thermique et le capteur hybride sont placés sur la même structure en bois et sur le même support métallique, Ils ont donc la même orientation et le même angle d'inclinaison.

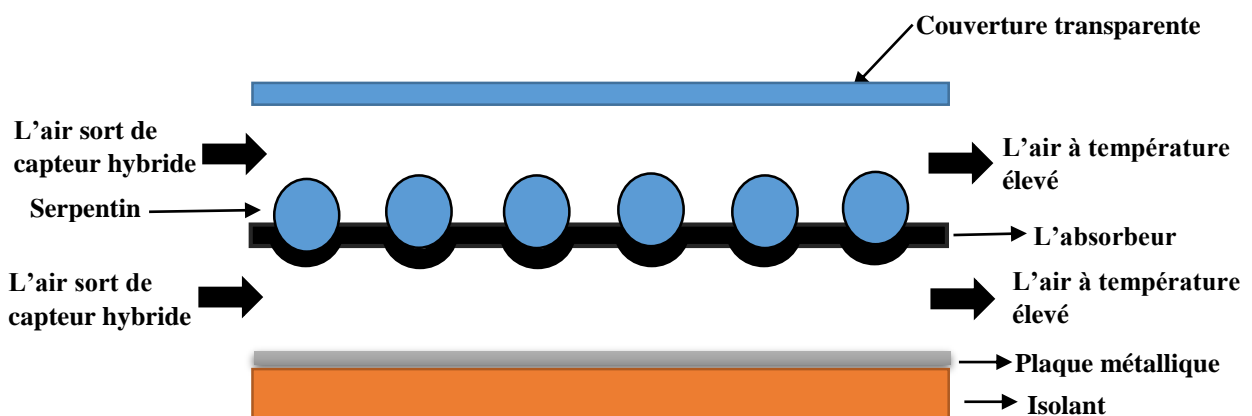


Figure IV.3. Schéma descriptif des différents composants du capteur thermique bi-fluide

IV.2.3. Batterie

Une unité de stockage électrique (figure IV.4) composée d'une batterie acide pour stocker l'électricité générée par le capteur hybride PV/T. La capacité de cette batterie est de 110Wh.

IV.2.4. Ballon de stockage

Intégration d'un ballon d'eau chaude (figure IV.5) comme un système de stockage thermique connecté avec un échangeur de chaleur (serpentin) placé sur la plaque absorbante du capteur bi-fluide. La circulation de l'eau peut être assurée par une pompe DC alimentée par la batterie.

IV.2.5. Une pompe

Une pompe DC (figure IV.6) est utilisée dans le système pour faire circuler l'eau dans le système serpentin/ballon de stockage. La pompe peut fonctionner avec un débit volumique égale $1,61 \cdot 10^{-2} l/s$ et une tension 12V, alimentée par la batterie.

IV.2.6. Un ventilateur

La figure IV.7 représente le ventilateur utilisée pour aspirer l'air du capteur thermique bi-fluide par des conduites. Sa puissance de fonctionnement est de 6 W.

**Figure IV.4.** image de la batterie utilisée**Figure IV.5.** Image du ballon de stockage**Figure IV.6.** Image de la pompe d'eau**Figure IV.7.** image du ventilateur.

- Les différents paramètres géométriques et de design du système solaire sont donnés par le tableau suivant.

Tableau IV.1. Les différents paramètres géométriques et de design du capteur solaire hybride et bi-fluide.

Géométrie du capteur			
propriété	Paramètres	Valeur	unité
Dimensions du capteur	Dimensions	PV/T 1,28×0,32×0,05	[m ³]
		Bi-fluide 1,31×0,36×0,05	
Dimension des canaux d'air	Dimensions	1,34×38	[m]
Inclinaison du capteur	Inclinaison	28°	
Vitrage	Dimensions	De PV/T 1,28×0,32×0,0032	[m ³]
		De bi-fluide 1,375×0,395×0,004	
Plaque absorbante	Dimensions	1,375×0,29×0,002	[m ³]
Plaque métallique (aluminium)	Dimensions	1,28×0,32×0,001	[m ³]
Serpentin	Longueur d'un tube	0,34	[m]
	Nombre de tubes	21	[–]
	Longueur totale	8,305	[m]
	Diamètre extérieur	0,015	[m]
	Diamètre intérieur	0,014	[m]
{ Bois Isolant polystyrène	Dimensions	1,375×0,395×0,015	[m ³]
		1,375×0,395×0,02	
Ballon de stockage	Diamètre extérieur	0,47	[m]
	Longueur	0,8	

IV.3. Montage expérimental

Dans cette partie, on présente la procédure et les moyens utilisés pour la réalisation du prototype :

IV.3.1. Réalisation du capteur hybride

Le capteur solaire hybride PV/T a été réalisé et installé au niveau de l'URERMS par le chercheur MEA. SLIMANI dans le cadre de la préparation de son doctorat à l'université 'HOUARI BOUMEDIENE' de Bab Ezzouar, d'Alger [19].

IV.3.2. Réalisation du capteur bi-fluide

Dans le cadre de la réalisation de cet élément important, les étapes suivantes ont été suivies :

- Préparation du matériel nécessaire et les différents composants du capteur solaire bi-fluide (un serpentin en cuivre, plaque ondulée en aluminium).
- Mettre tous les composants du capteur à l'intérieure d'un boîtier en bois.
- Fixage du serpentin avec la plaque ondulée absorbante pour avoir un contact parfait avec ces deux éléments. (Il faut s'assurer qu'il n'y a pas de fuite dans la serpentine avant de le fixer à la plaque absorbante en y faisant passer de l'eau).

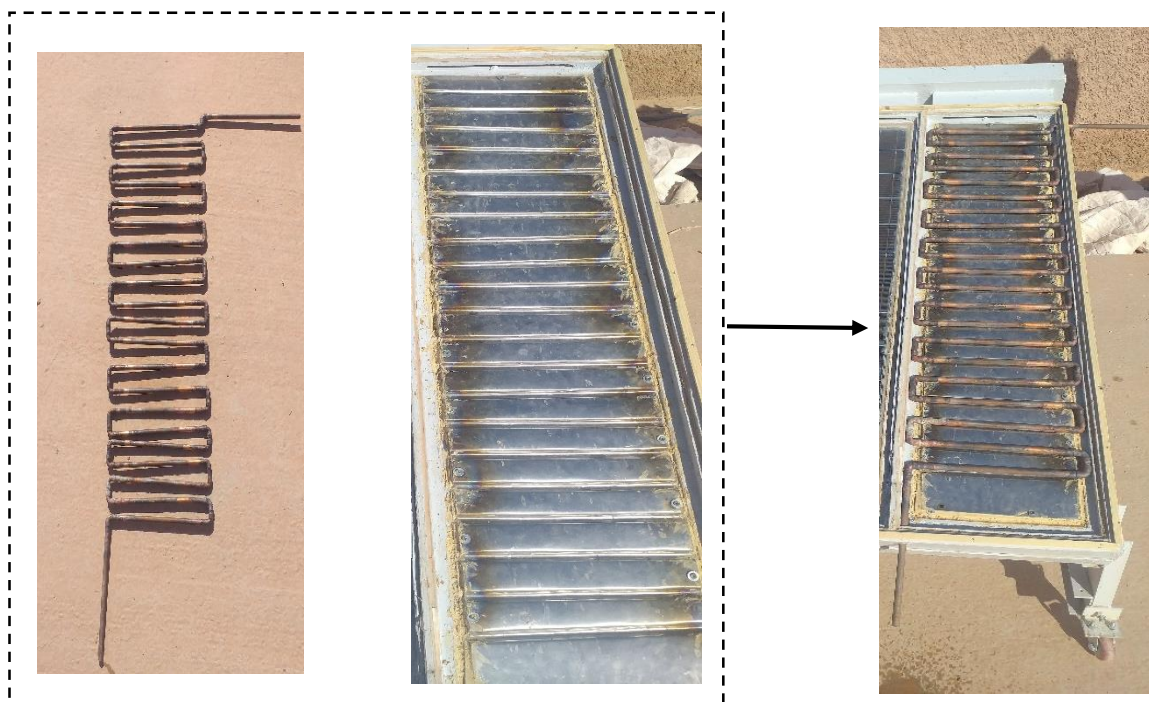


Figure. IV.8. Image montrant la plaque absorbante et le serpentin

- Mettre une couche de silicone noire aux côtés de la plaque d'aluminium et sur les vices pour éviter les fuites entre les deux canaux d'air.



(a)



(b)

Silicone noir

Des visse
d'ancrage

Figure IV.9. (a) Mettre de la silicone pour éviter les fuites d'air, (b) Installation du serpentin sur l'absorbeur.

- Pigmentation de la plaque absorbante et le serpentin en noir mat.



Peinture
noire

Poudre
matte

Silicone
noir

La brillance du colorant est un obstacle à l'absorption d'une grande quantité de rayonnement solaire, nous pulvérisons donc une poudre matte pour se débarrasser de la brillance.



Figure IV.10. Image représentant les outils accessoires utilisés.

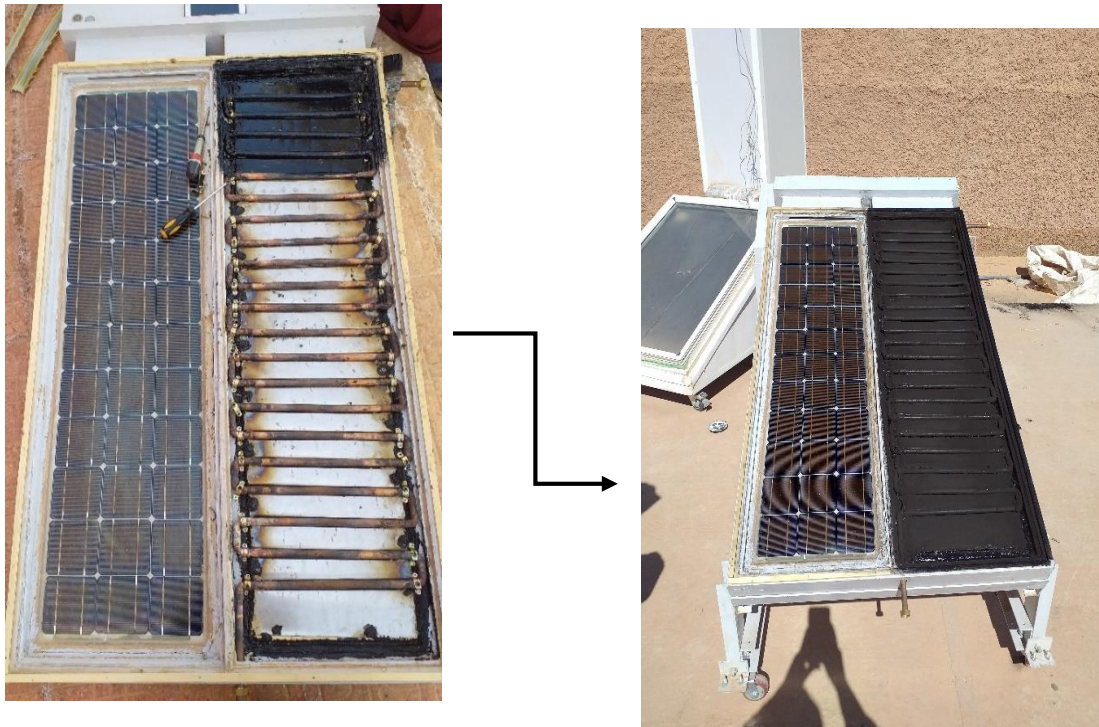


Figure IV.11. Image représentant le capteur bi-fluide après avoir terminé la peinture.

- Etalonnage des différents thermocouples et les placer là où la mesure de la température doit être relevée et les fixés avec une pâte de colle.



Sur l'absorbeur et le serpentin



Sur la vitre du capteur PV/T



L'entrée de l'eau



Sortie de l'eau

Figure IV.12 images de quelques points de mesure.

- Montage du vitrage à la face supérieure du capteur à l'aide d'une colle



Figure V.13. Image représentant l'emplacement du vitrage sur les capteurs solaires

- Le support métallique des capteurs solaires a un angle d'inclinaison de 28° avec l'horizontal.



Figure IV.14. Image montrant l'angle d'inclinaison du support métallique.

- Fixation d'un ventilateur qui a pour but de circuler l'air à l'intérieure du capteur en convection forcée.

- Utilisation d'une pompe pour faire circuler l'eau dans le serpentin.
- Peinturer le boîtier en blanc pour protéger le capteur contre l'humidité, et la pluie.
- Fabrication d'un support métallique pour le ballon de stockage et la fixation de vannes dans ce dernier.



Figure IV.15. Le ballon de stockage et son support métallique.

- Et finalement faire fonctionner le système intégral et collecter les valeurs mesurées à l'aide d'une acquisition de données.



Figure IV.16. Image représentant le système solaire étudié dans sa dernière forme.

IV.4. Instruments de mesures

Pour déterminer les performances énergétiques instantanées des deux capteurs solaire (hybride et bi-fluide), certains paramètres doivent être mesurés.

IV.4.1. Mesure de la température :

Pour mesurer la température des différents constituants du capteur et des fluides caloporteurs, des thermocouples (figure. IV.17) vont être utilisés. Plusieurs types de thermocouple sont disponibles dans le marché (type K, J, N, ...). Pour nos mesures on a choisi d'utiliser un thermocouple de type K. Afin de mesurer la variation de la température des différents éléments du capteur, nous avons installé 15 thermocouples de type K placés comme suit :

- Un thermocouple à l'entrée des canaux d'air (au capteur hybride) pour mesurer la température d'entrée d'air.
- Un thermocouple au niveau de cellules solaires.
- Un thermocouple au niveau du vitrage.
- Un thermocouple au niveau de Tedlar.
- Deux thermocouples au niveau des plaques métalliques fixées au-dessus de l'isolant dans les deux capteurs.
- Deux thermocouples à la sortie des canaux d'air pour mesurer la température de sortie l'air (dans le canal inférieur et supérieur).
- Un thermocouple au niveau de la plaque absorbante.
- Un thermocouple au niveau du serpentin.
- Deux thermocouples à l'entrée et à la sortie d'eau.
- Deux thermocouples à la sortie des canaux d'air de capteur bi-fluide, pour mesurer la température de sortie l'air (dans le canal inférieur et supérieur).

IV.4.2. Mesure de débit d'air

Pour mesurer la vitesse de l'air dans les deux conduites d'air à l'entrée du capteur hybride, on utilise un anémomètre à fil chaud (Figure. IV.18) qui affiche une vitesse mesurée en m/s ou bien en terme de débit volumique en m^3/s .

IV.4.3. Mesure de rayonnement solaire global

La mesure du rayonnement solaire qui atteint la surface supérieure des capteurs solaires se fait par un Pyranomètre (Figure. IV.19). Il mesure des valeurs de rayonnement solaire global (en

W/m²), dans la gamme de longueurs d'onde de 300 à 3000 nm. Le Pyranomètre doit être placé sur le support métallique avec le même angle d'inclinaison que celui du capteur solaire.

IV.4.4. Acquisition de données

L'ensemble des thermocouples de type K ainsi que le Pyranomètre, sont reliés à une centrale d'acquisition des données de marque « FLUKE » (figure IV.20), qui reçoit des données sous forme de signaux électriques. Après la collection des données, ces dernières peuvent être traitées et visualiser sur ordinateur sous forme de fichier CSV, Excel, ou même sous forme de figure.



Figure IV.17. les thermocouples



Figure IV.18. anémomètre à fil chaud



Figure IV.19. Pyranomètre



Figure IV.20. Acquisition de données

IV.5. Conclusion

Après une étude qui comprenait la proposition de plusieurs conceptions pour l'installation expérimentale et la détermination des caractéristiques de chaque élément du système telles que la détermination du nombre de tranchons serpentin, de leur diamètre et de la distance entre eux, la nature de différents matériaux utilisés et le positionnement de chaque élément du système ; La forme appropriée a été atteinte et elle a été mise en œuvre avec succès malgré les obstacles et les difficultés que nous l'avons rencontré, et le système devenait prêt à l'exploiter.

Chapitre V

Résultats et discussion

V.1. Introduction

Ce chapitre est réparti sur trois grandes parties : la première partie sert à valider le modèle numérique développé à partir du modèle physique présenté dans le chapitre II ; la deuxième partie est consacrée à l'exploitation du modèle validé en faisant des études de simulation numérique pour chaque type de capteur ; la troisième partie est destinée à présenter les résultats expérimentaux récoltés d'une série de mesure et tests sur site. Les résultats présentés traduisant les variations temporelles des différentes températures du système (capteur hybride et bi-fluide) ainsi que les performances énergétiques du système telle que les puissances et les rendements. Les résultats obtenus sont présentés sous forme des graphes.

V.2. Paramètres de conception

- Le tableau IV.1 résume les paramètres et les caractéristiques électriques d'un module PV monocristallin de type UDT50 dans les conditions STC ($AM=1.5$, $G=1000W/m^2$ et $T_c=25^\circ C$).

Tableau.V.1. Paramètres et caractéristiques électriques d'un module PV monocristallin UDT50

Paramètres	Valeur
Nombre des cellules PV, N_c	12*3
Le courant de court-circuit, $I_{cc,ref}$	3.18 A
La tension de circuit ouvert, $V_{co,ref}$	21.6 V
Le courant de MPP, $I_{mp,ref}$	2.9 A
La tension de MPP, $V_{mp,ref}$	17.5 V
La puissance crête, $P_{m,ref}$	50 W
Le rendement électrique, η_{ref}	12%
Le facteur de forme, FF_{ref}	70.8%
Le courant de saturation de la diode, I_0	$5.021 \cdot 10^{-8}$ A
L'énergie de gap, E_{gap}	1.2 eV
Le facteur d'idéalité, γ	1.2
La résistance série, R_s	0.25 Ω
La résistance parallèle, R_{sh}	198.1 Ω
Le facteur d'idéalité modifié, a	1.016 J/C

- Le tableau V.2 résume les facteurs et les propriétés thermo-physiques de différents composants de système étudié (capteur hybride et capteur bi-fluide).

Tableau V.2. Paramètres et propriétés thermo-physiques de différents composants du système étudié.

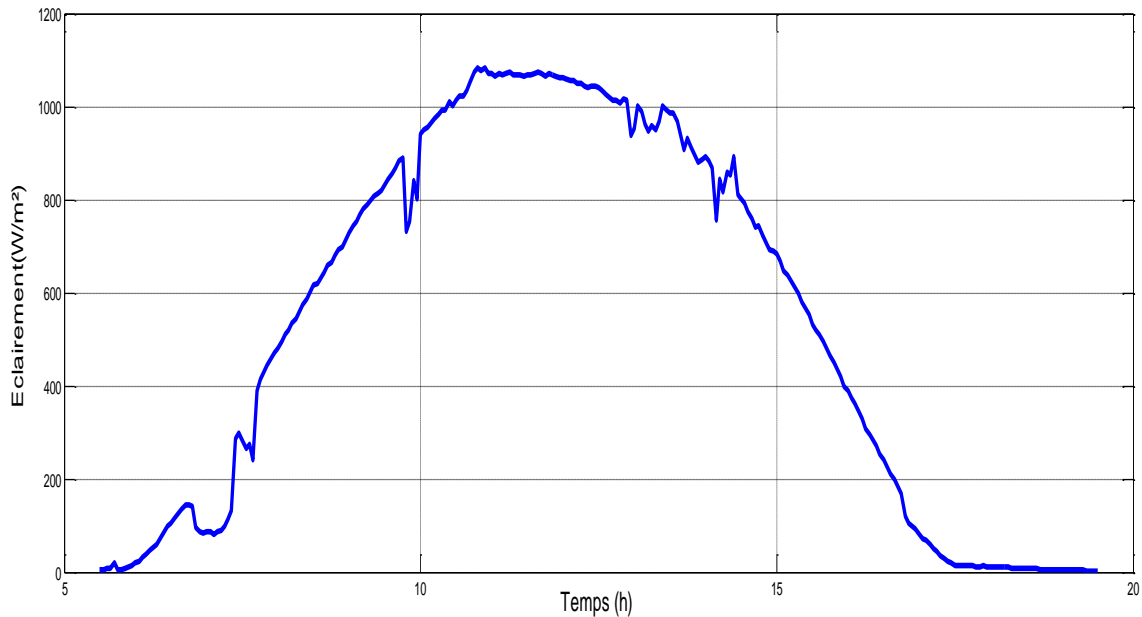
paramètres	valeurs
verre	
Epaisseur de la couverture vitrée	0.0032 m
La conductivité thermique	1 w/m.K
L'absorptivité α	0.06
La transmittivité τ	0.84
L'émissivité ϵ	0.93
Cellule solaire	
Epaisseur	0.0003
L'absorptivité	0.85
La conductivité thermique λ (W/m.K)	0.036 W/m.K
Tedlar	
Epaisseur	0.0005 m
La conductivité thermique	0.033 W/m.K
L'absorptivité	0.5
La plaque métallique et plaque absorbante(Aluminium)	
Epaisseur	0.001 m
La conductivité thermique	250 W/m.K
L'absorptivité	0.95
L'émissivité	0.25
L'isolant	
Epaisseur	0.05 m
La conductivité thermique	0.035 W/m.K
L'émissivité	0.1
Le facteur de remplissage	0.88
Le coefficient de température	0.0045
Le facteur de conversion thermique	0.36
Le coefficient de rayonnement solaire	0.052
Serpentine (cuivre)	
L'absorptivité	0.95
L'émissivité	0.87
Chaleur spécifique C_p (J/Kg.K)	385
Masse volumique ρ (Kg/m ³)	8920 Kg/m ³
La conductivité thermique	390 W/m.K

V.3. Conditions opératoires

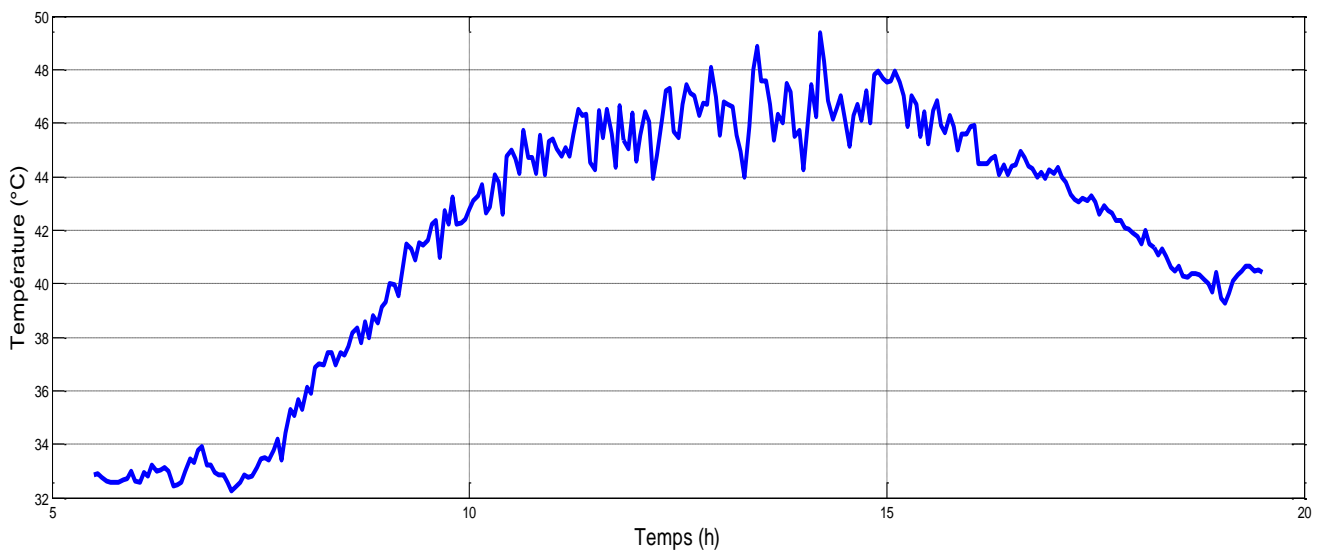
Pour faire sortir les résultats de performances énergétiques et de simulation (pour un modèle quasi empirique), il est nécessaire d'avoir les données certaines conditions météorologiques telles que la vitesse du vent, l'ensoleillement, et la température de l'air ambiant.

Dans cette étude, les données météorologiques ont été mesurées expérimentalement et inclus comme « input » dans le programme de simulation numérique.

Les mesures de l'éclairement solaire et de la température de l'air ambiant ont été prises pour deux journées du mois de septembre ; journée du **11/09/2020** et la journée du **17/09/2020**. Quant à la vitesse du vent, nous l'avons pris avec une valeur moyenne pendant toute la journée pour une raison technique (l'appareil de mesure en panne).



(a)



(b)

Figure V.1. Variation temporelle l'éclairement solaire (a) et de la température ambiant (b) pour la journée du **11/09/2020**.

Dans cette journée bien ensoleillée, l'intensité du rayonnement solaire atteint des valeurs importantes, plus de 1000 W/m^2 entre 12h00 et 14h00. Et la valeur maximale de la température ambiante atteint 48°C en milieu de journée.

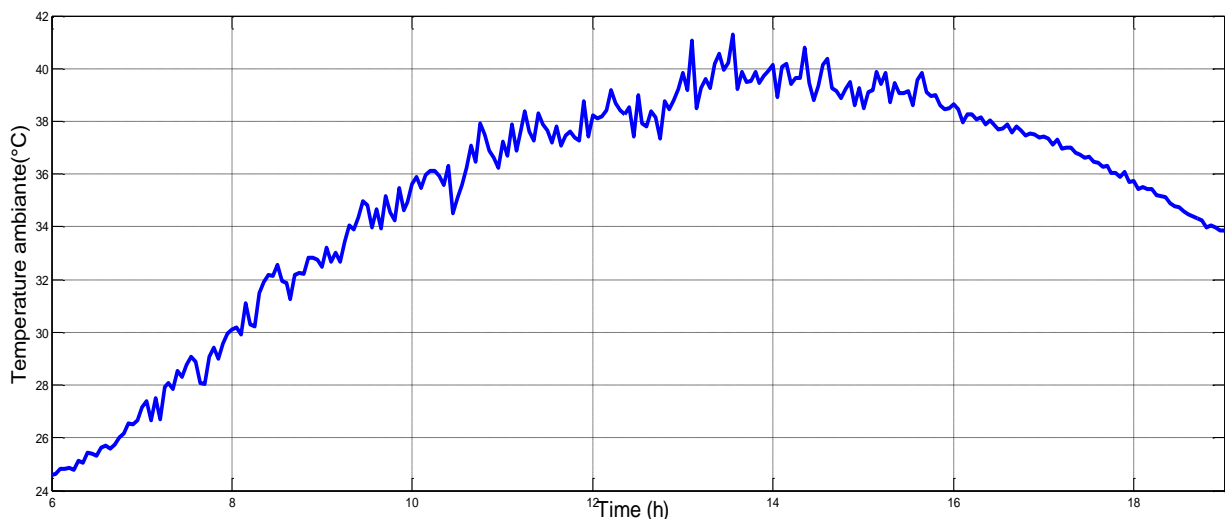
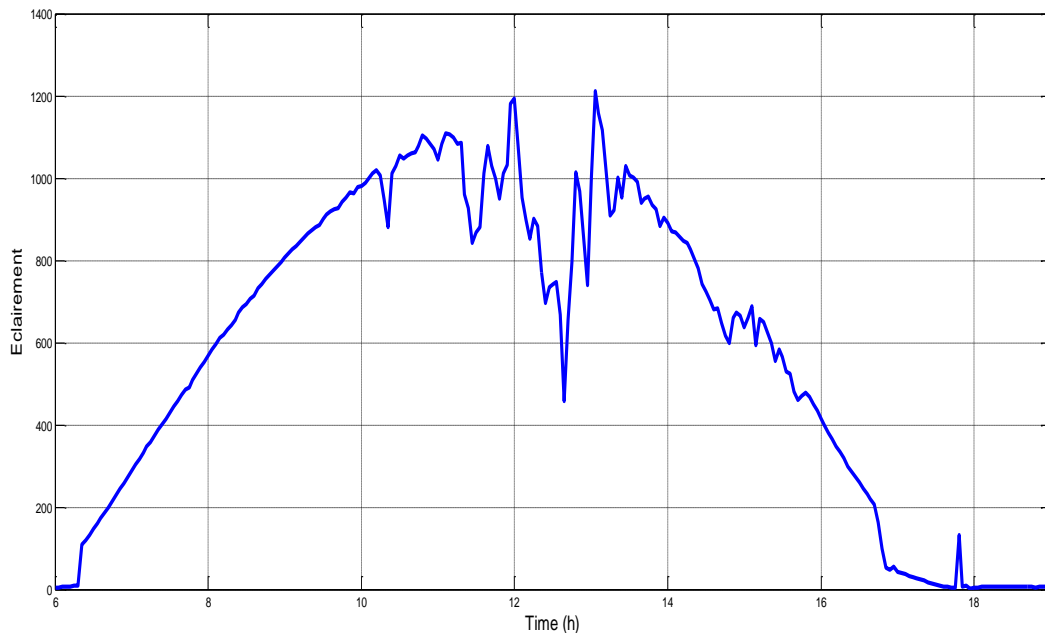


Figure V.2. Variation temporelle l'éclairement solaire (a) et de la température ambiante (b) pour la journée du 17/09/2020.

Les deux graphes de la figure V.3 représentent l'intensité du rayonnement solaire et la température de l'air ambiante respectivement pour la journée du 17/09/2020. L'intensité du rayonnement solaire atteint des valeurs importantes, supérieures à 1100 W/m^2 . Cependant, on constate une grande fluctuation entre 11h00 et 14h00 en raison d'un passage nuageux. La température ambiante maximale pour cette journée atteint 41°C vers 13h00 l'après-midi.

Le tableau suivant résume les différentes valeurs de débit et de vitesse adaptées pour les journées d'expérience.

Tableau V.3. Les conditions opératoires de débit et de vitesse des fluides

	Vitesse moyenne	Débit massique
Air supérieur	0,41 m/s	0,17 m ³ /s
Air inférieur	0,72 m/s	0,21 m ³ /s
L'eau	0,1046 m/s	1,61.10 ⁻² l/s

V.4. Partie I : Validation du modèle numérique

Une fois le programme de simulation numérique est établi, il est nécessaire de le valider à travers une étude expérimentale pour pouvoir l'exploiter dans une étude de comparaison ou paramétriques.

V.4.1. Capteur hybride PV/T

Nous présentons dans cette partie les résultats expérimentaux et ceux de la simulation du capteur hybride PV/T dans le cas où le système fonctionne en convection forcée. Les données météorologiques de la journée du 11/09/2020 ont été utilisées.

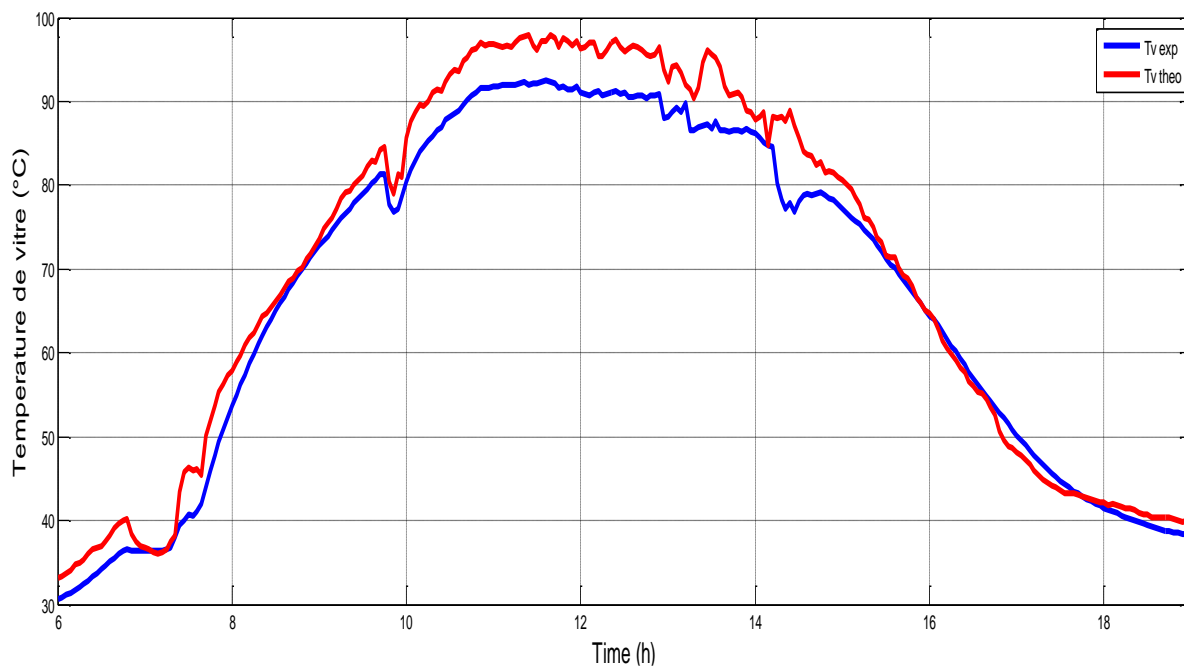


Figure V.3. L'évolution simulée et expérimentale de la température du vitre du capteur PVT.

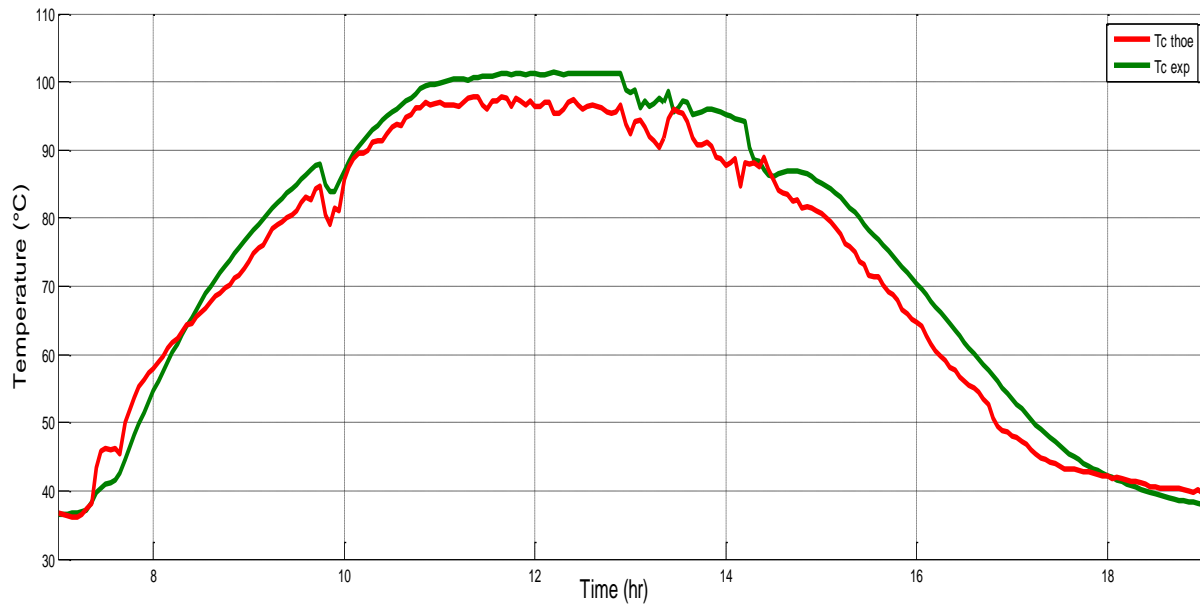


Figure V.4. L'évolution simulée et expérimentale de la température des cellules du capteur PVT

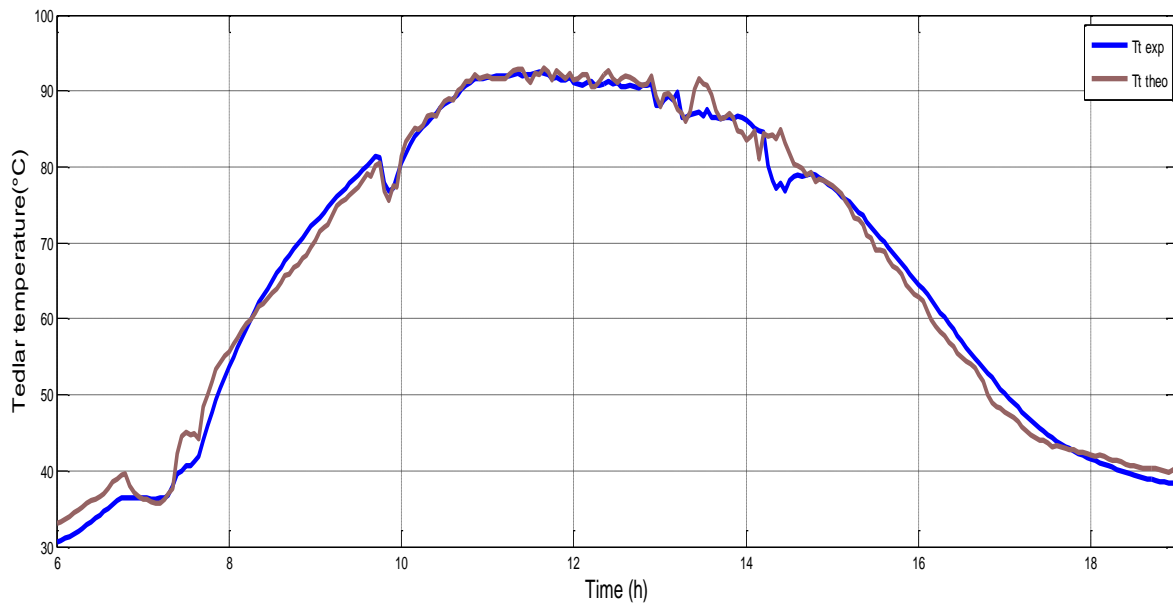


Figure V.5. L'évolution simulée et expérimentale de la température de Tedlar du capteur PVT

Les figures V.2, V.3 et V.4 montrent la variation horaire comparative des allures de la température de vitrage (T_v), la température des cellules (T_c) et la température de tedlar (T_t), respectivement. On remarque que les courbes sont presque superposées ce qui indique qu'il y a une concordance entre les résultats de simulation et expérimentales de ces paramètres avec une légère déférence.

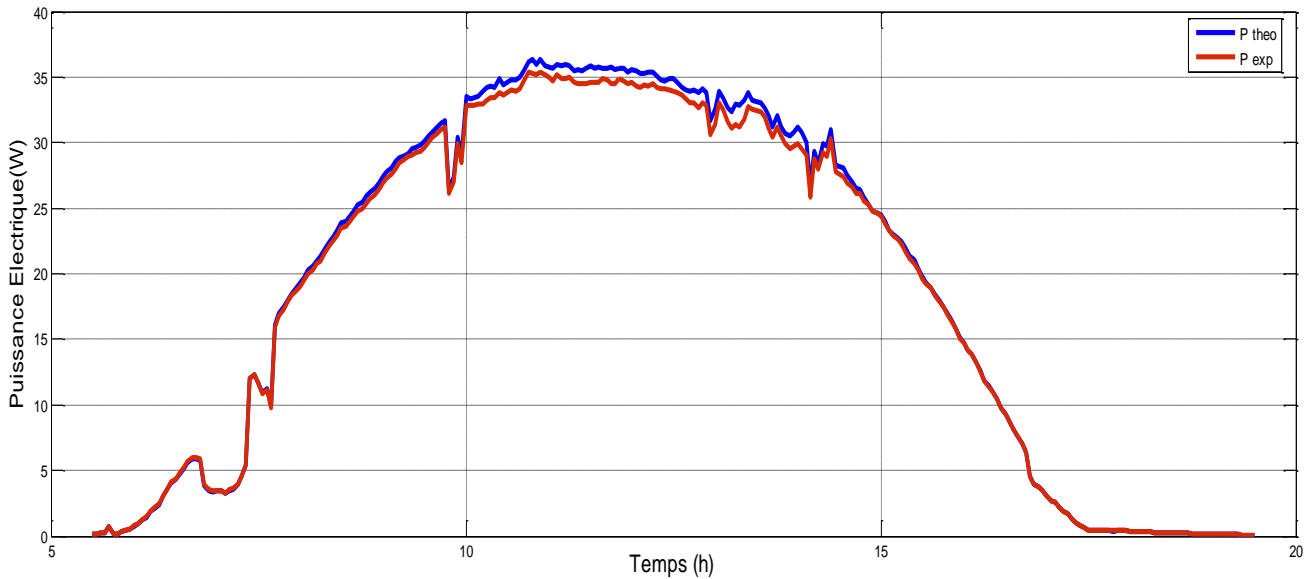


Figure V.6. L'évolution temporelle de la puissance électrique simulée et expérimentale

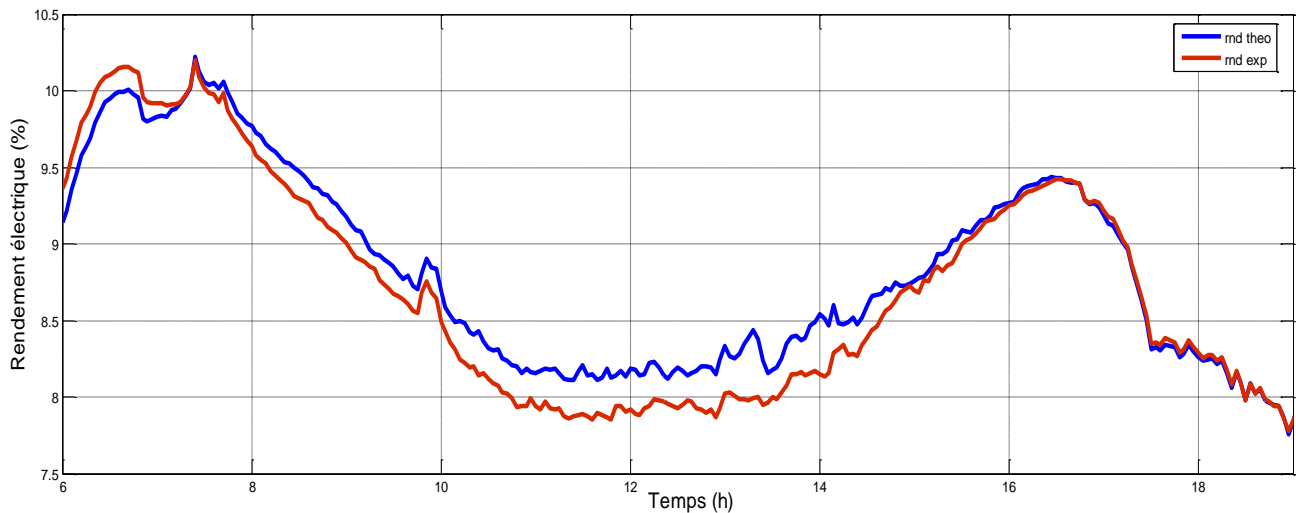


Figure V.7. L'évolution temporelle du rendement électrique simulé et expérimentale.

Les figures V.6 et V.7 représentent les variations horaires comparatives des valeurs expérimentales et théoriques de la puissance et du rendement électriques. D'après la figure on voit que les deux courbes sont presque identiques, ça veut dire qu'il y a un accord entre les valeurs simulées et expérimentales avec une légère différence qui apparaît dans le domaine temporelle (10:30-14:30). L'écart entre la valeur expérimentale et simulée est d'ordre de 0.3%.

Dans les deux courbes, on voit que les valeurs théoriques l'emportent sur les valeurs réelles, et cela s'explique par l'utilisation des valeurs idéales dans le modèle de simulation, contrairement aux valeurs réelles qui comprennent des pertes dans la phase de mesure.

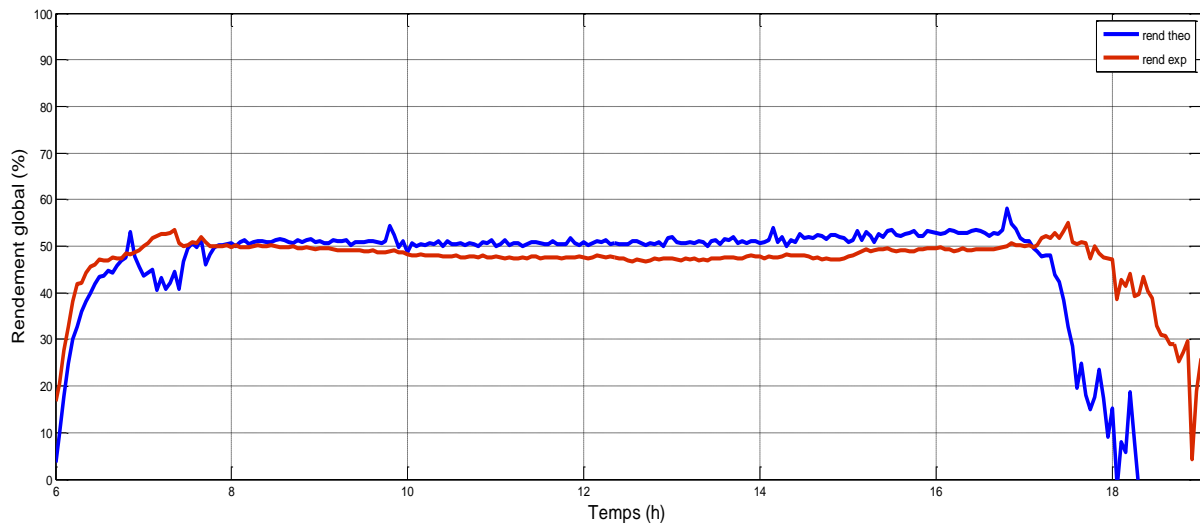


Figure V.8. L'évolution temporelle du rendement global simulé et expérimentale

La différence apparente entre les valeurs expérimentales et de simulation du rendement global du capteur hybride (figure V.8) est due principalement à des légères différences entre les valeurs théoriques et expérimentales des températures, de la puissance électrique et du rendement électrique.

V.4.2. Capteur thermique bi-fluide

Nous présentons dans cette section les résultats expérimentaux et ceux issus de la simulation du capteur thermique bi-fluide dans le cas où il fonctionnerait avec une pompe à eau (convection forcée), pour la journée d'expérience du **17/09/2020**.

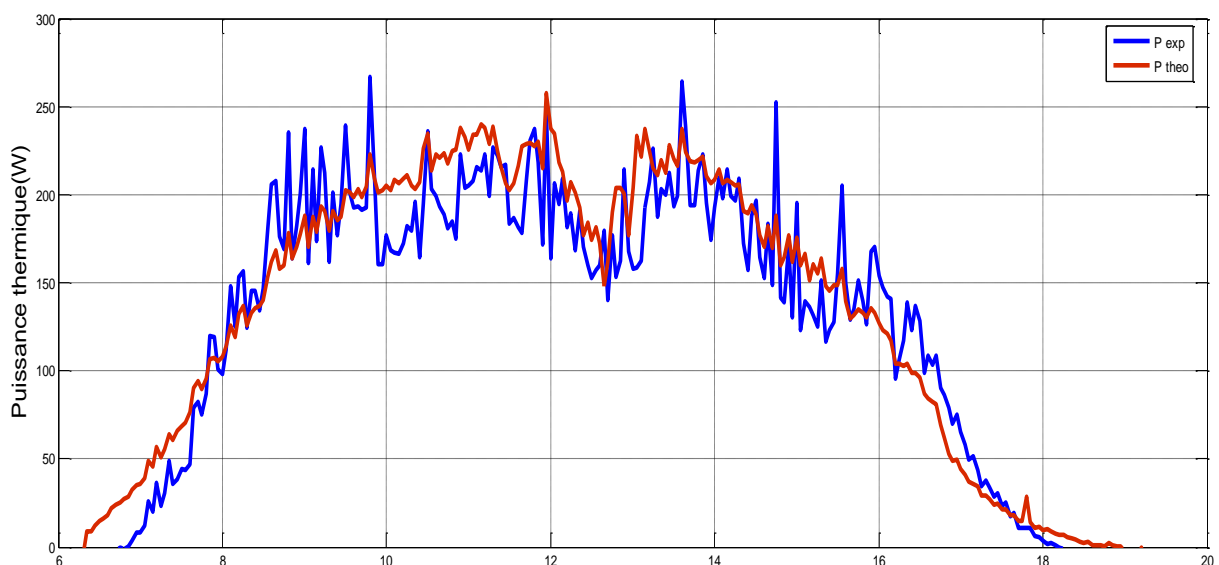


Figure V.9. L'évolution temporelle de la puissance thermique simulée et expérimentale.

A travers l'analyse comparative des courbes de l'évolution temporelles des valeurs de la puissance thermique (figure V.9), on constate que les valeurs expérimentales présentent de nombreuses fluctuations

dues aux perturbations de flux solaire (appareil de la mesure) et aux incertitudes de mesures. On note également qu'il y a une concordance des résultats simulés avec expérimentaux.

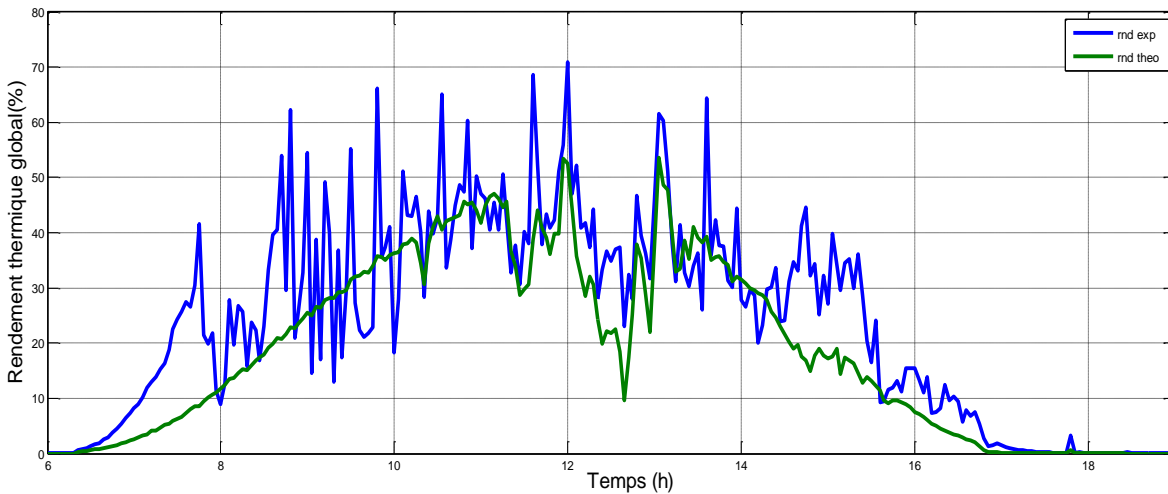


Figure V.10. L'évolution temporelle du rendement thermique global simulé et expérimentale.

Les grandes fluctuations de la puissance affectent directement sur le rendement thermique. Mais malgré cela, on constate une convergence des valeurs expérimentales et ceux issus de la simulation.

On remarque également une forte baisse du rendement thermique vers 13h00 du matin en raison des nuages qui ont affecté l'éclairement solaire, et ce dernier a un effet direct sur la puissance et le rendement thermiques.

V.5. Partie II : Exploitation du modèle numérique

Une fois que notre modèle de simulation numérique est validé, nous pouvons actuellement procéder à l'exploiter pour une étude de simulation plus détaillée.

V.5.1. Capteur hybride

Dans cette section, les données météorologiques de la journée du **11/09/2020** ont été exploitées.

V.5.1.1. Partie thermique

- **Distribution de température**

Pour étudier l'efficacité du capteur hybride PV/T, une comparaison a été faite avec un module PV en terme de performance énergétique. Les évolutions des températures des différents composants du capteur hybride PV/T ont été présentées. Les températures présentées sont :

- **Les températures des composants du capteur PV/T :**

- La température de la couverture vitrée supplémentaire T_{v2} ;
- La température de l'air (fluide caloporteur) en sortie de canal supérieur T_{f2}
- La température de la couverture vitrée des cellules T_{v1} ;
- La température des cellules photovoltaïque T_c ;
- La température de Tedlar T_t ;
- La température de l'air (fluide caloporteur) en sortie de canal inférieur T_{f1} ; La température de plaque métallique T_{pm} .

La figure ci-dessous montre une conformité et une logique dans la distribution des températures des éléments du panneau PV. On remarque que la température des cellules solaires est la plus élevée, elle atteint une valeur de 72 °C environ. Ceci s'explique par le fait que la cellule photovoltaïque joue le rôle d'un générateur convertissant le rayonnement solaire reçu en électricité et en chaleur. Les températures des éléments du capteur augmentent en fonction du temps jusqu'à midi, temps solaire vrai, puis diminuent.

Les températures du Tedlar et du verre sont presque au même niveau. Cela est justifié par le voisinage de ces deux couches et par la faible perte thermique causée par leurs fines épaisseurs.

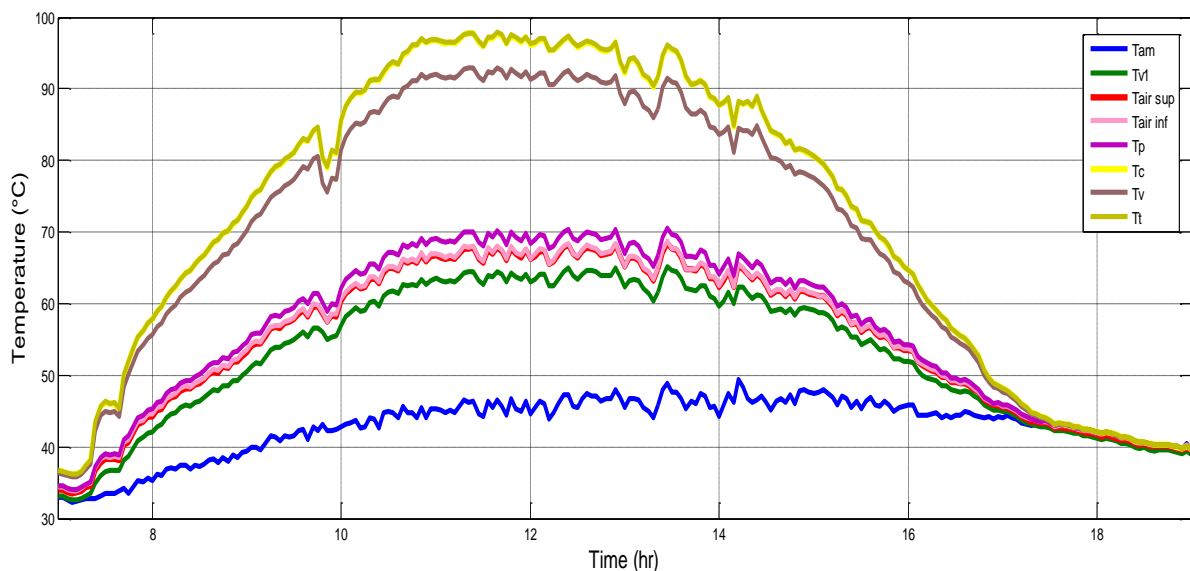


Figure V.11. Évolution temporelle de températures des différents composants du capteur hybride à double écoulement.

La figure V.12 représente la variation temporelle de la température des cellules pour un module PV conventionnel et le capteur hybride. Par l'analyse comparative on observe que :

- ✓ Les cellules solaires sont l'éléments le plus chaud parmi les autres composants.
- ✓ On note également que la température des cellules du système hybride est importante par rapport à au système PV, Cela est dû à l'influence de l'ajout d'une couverture vitrée supplémentaire (qui cause l'effet de serre).

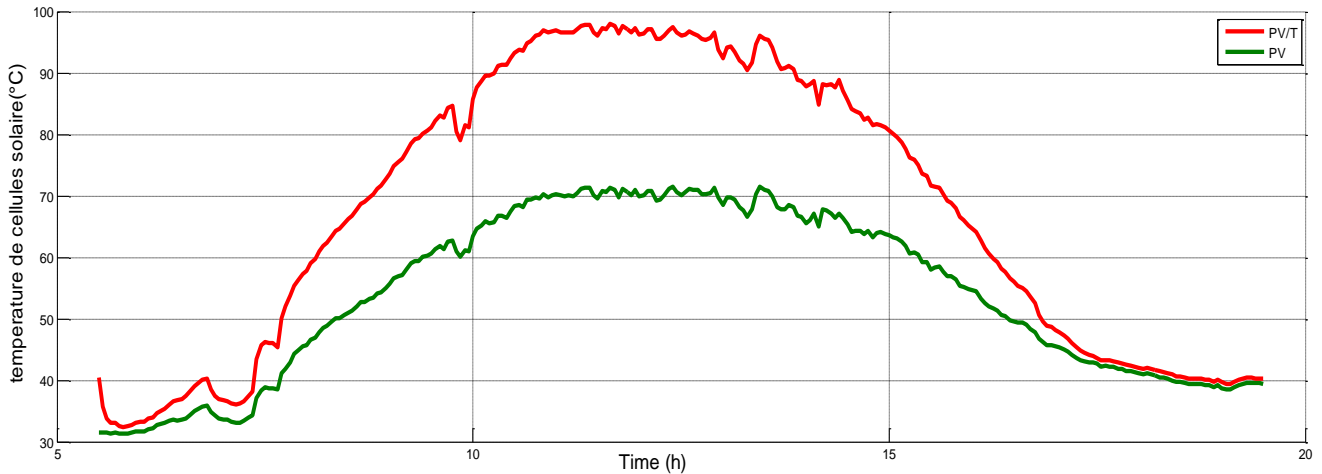


Figure V.12. Variation temporelle comparative de température des cellules pour un module PV et le capteur hybride PV-T.

En raison de l'impact direct et important du vitrage sur la température des cellules du capteur PV/T, les caractéristiques électriques du système, telles que la puissance électrique et le rendement électrique seront influencées par conséquence. Dans ce qui suit, il est important de se référer à ce facteur important.

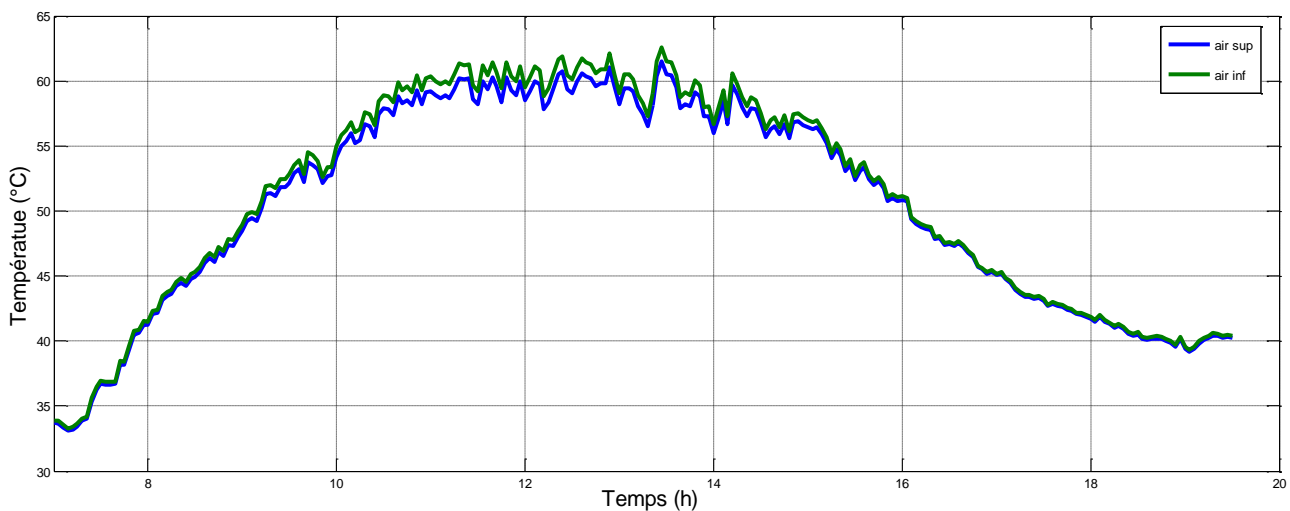


Figure V.13. Variations temporelle des températures d'air en sortie des deux canaux du capteur hybride.

La figure V.13 représente les variations horaires de températures de l'air en sortie du capteur PV/T des deux canaux au-dessus et au-dessous du module PV, On remarque que l'évolution des températures de l'air pour le canal supérieur et inférieur prend la même forme (augmentation – maximum – diminution).

L'air à la sortie du canal inférieur prend des valeurs de températures relativement élevée par rapport à la conduite supérieure, grâce à l'isolation qui réduit les pertes thermiques vers l'extérieur.

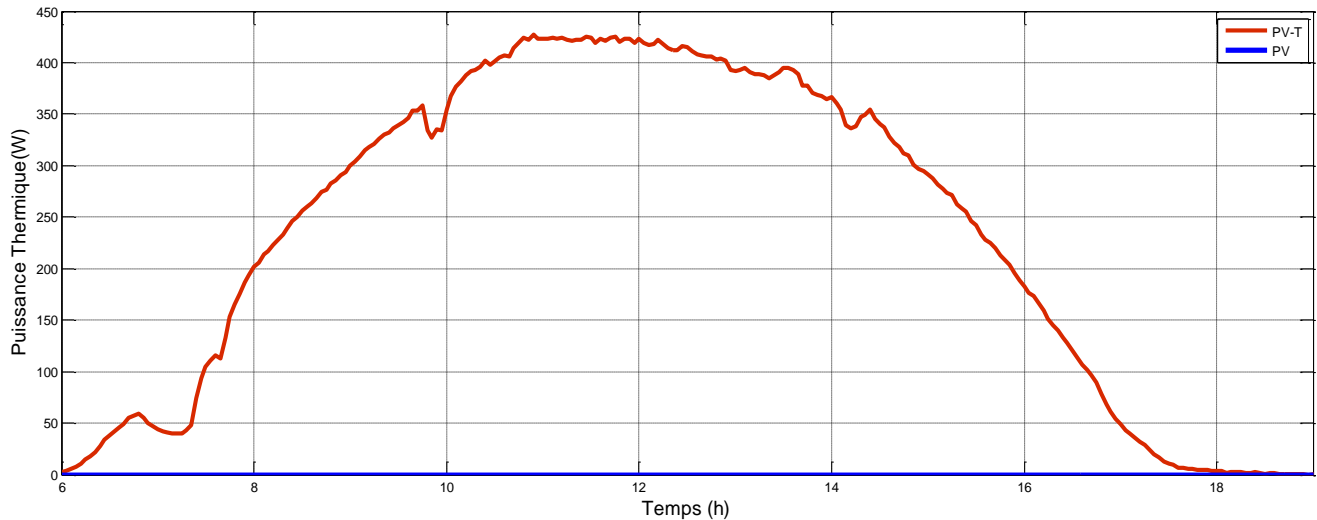


Figure V.14. Evolution de la puissance thermique en fonction de temps pour le module PV et le capteur PV-T.

La figure V.14 représente l'évolution de la puissance thermique en fonction de temps pour les deux capteurs (PV, PV/T) dans le module PV unique aucune puissance thermique utile n'est produite.

Pour le capteur hybride On remarque que la puissance thermique augmente au cours du temps depuis le lever du soleil et prend une valeur maximale environ 430 W/m^2 entre 11 h 00 et 13 h 00, avant de diminuer, prenant une forme symétrique par rapport à l'axe de 13h 00. Concernant les extrémités de la journée, la puissance thermique est nulle.

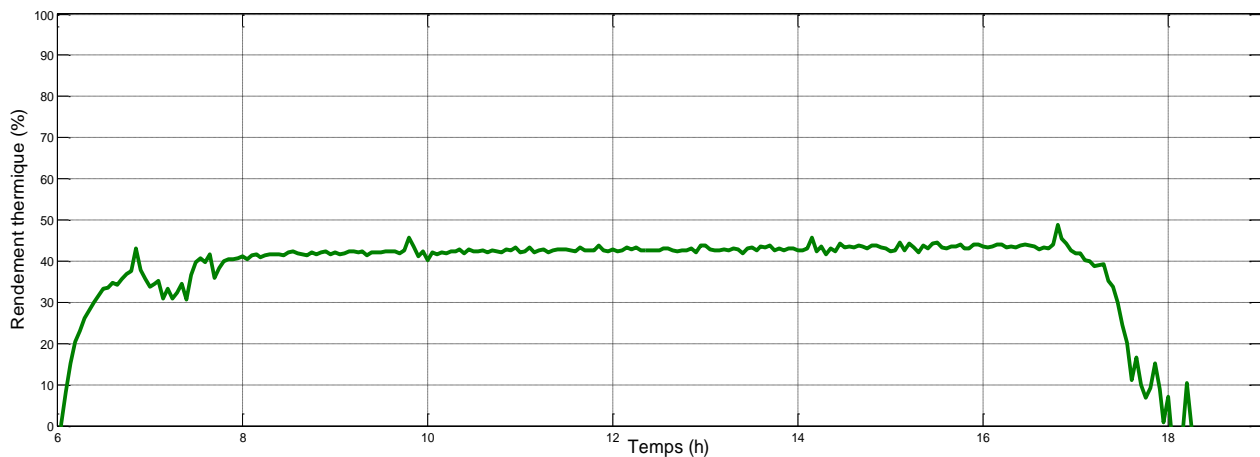


Figure V.15. Évolution du rendement thermique du capteur hybride en fonction du temps.

La figure V.15 représente l'évolution du rendement thermique du capteur hybride en fonction du temps. Les résultats montrent que les valeurs de rendement fluctuent au cours de la journée (à cause de la perturbation météorologique), Au milieu de la journée, la valeur du rendement est presque stable dans la plage de 40%.

La variation temporelle du rendement thermique global pour le module PV et le capteur PV/T en fonction du temps est donnée par la figure V.16.

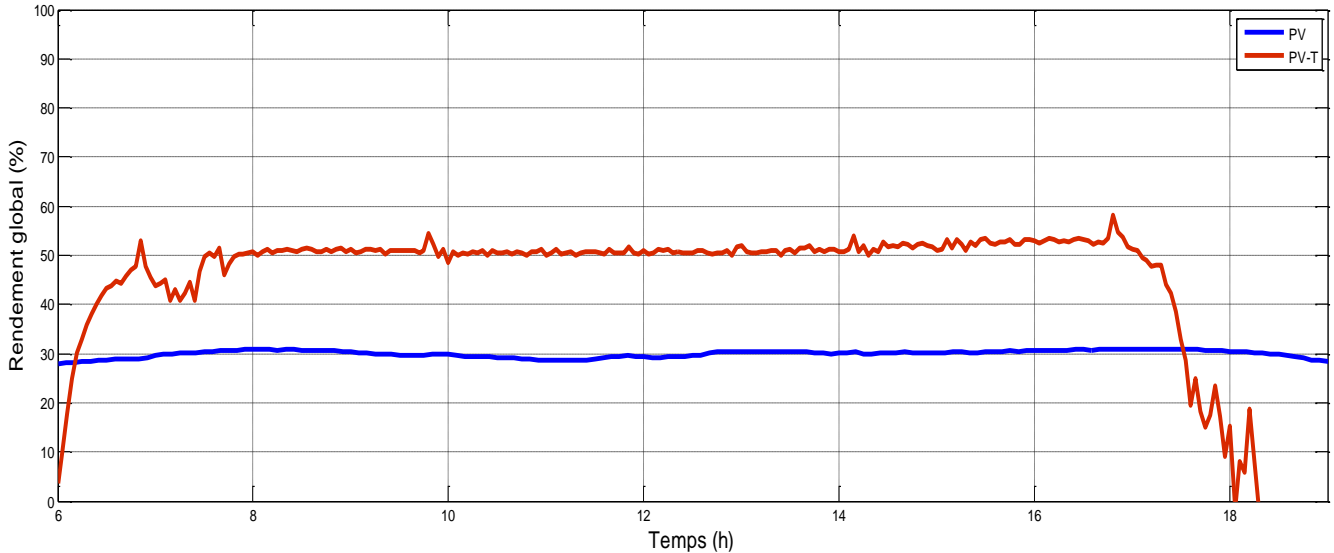


Figure V.16. Variations temporelle du rendement thermique global pour le module PV et le capteur PV/T.

La figure V.16 montre la variation comparative des allures du rendement global pour le capteur PV/T et PV. Les valeurs de rendement dans le module PV ne dépassent pas 30% tandis qu'ils varient rapidement avec un maximum de 51% pour le capteur hybride ce qui montre l'augmentation de l'efficacité totale de la conversion d'énergie solaire pour le capteur hybride.

Étant donné que le module PV n'a pas de puissance thermique utile, donc il n'aura pas de rendement thermique. L'allure montrée dans la figure ci-dessus représente le rendement thermique équivalent à la puissance électrique, défini auparavant par : $\eta_{th,PV} = \frac{\eta_{éle}}{C_{th-éle}}$

$C_{th-éle}$: Le rendement de conversion énergétique dans une centrale thermique, Il est estimé à 36%.

V.5.1.2. Partie électrique

❖ Caractéristiques électriques :

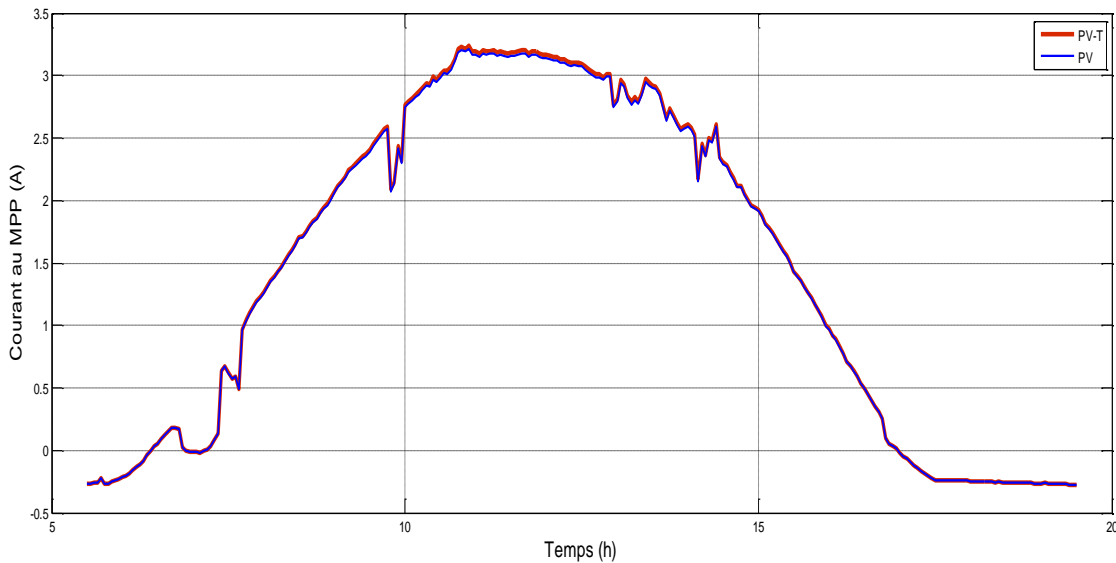


Figure V.17. Variations temporelle du courant au point MPP.

L'évolution du courant au point de fonctionnement maximal (MPP) suit l'évolution de l'éclairement solaire. Les valeurs du courant atteignent une valeur maximale environ 3.25A à 13h00 pour les deux capteurs, les allures du courant au MPP pour le capteur PV et le capteur hybride se coïncident puisque la variation de température n'influence pas sur le courant, comme discuté précédemment (chapitre II).

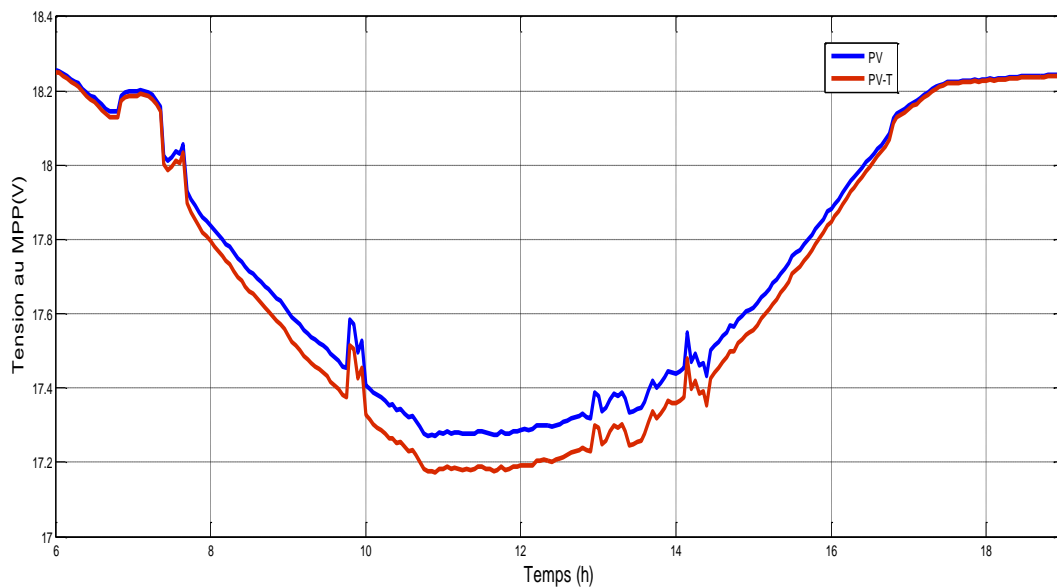


Figure V.18. Variations temporelle de la tension au point MPP.

De la figure V.18, on peut déduire :

- ✓ L'évolution temporelle de la tension prend une forme opposée à la courbe d'évolution temporelle du courant.

- ✓ La tension diminue avec le temps, c'est-à-dire avec l'augmentation de la température du jour jusqu'à ce qu'elle atteigne une valeur minimale (chute de tension), puis elle augmente avec la diminution de la température, comme discuté précédemment (chapitre II).
- ✓ La figure montre que la température des cellules a un effet inversement proportionnel avec la tension (lorsque T_c augmente VMPP diminué).

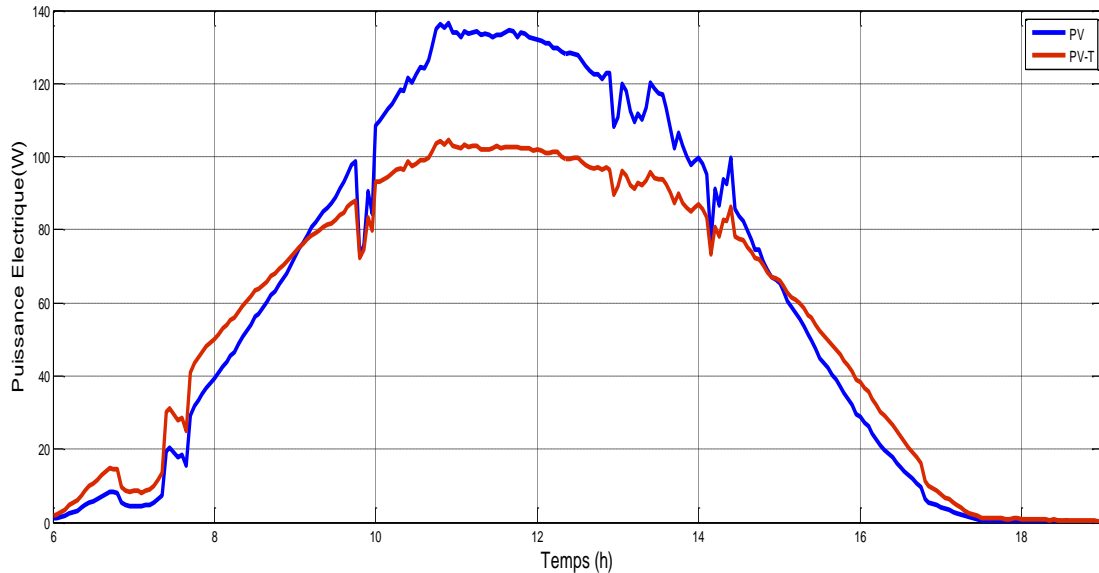


Figure V.19. L'évolution horaire comparative de la puissance électrique du module PV et du capteur PV-T

La figure V.19 représente la variation temporelle de la puissance électrique pour les deux capteurs (PV et PV-T). De cette figure on note qu'il y a une différence d'environ $29\text{W}/\text{m}^2$. Cette différence est due au fait que l'ajoute de la couverture vitrée supplémentaire (Lorsque la température monte, le courant reste relativement constant tandis que la tension diminue).

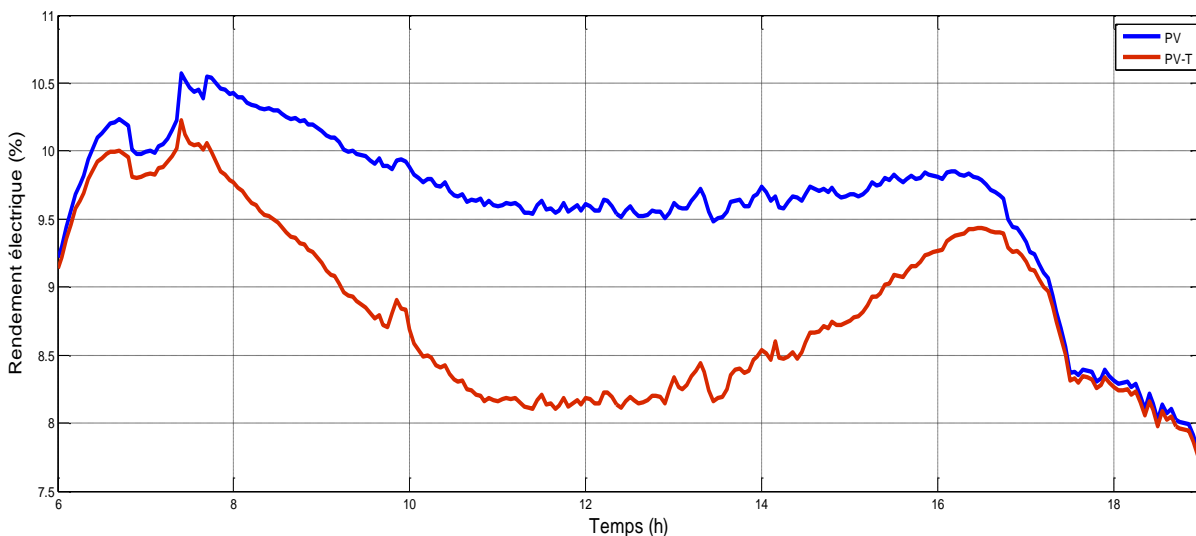


Figure V.20. L'évolution horaire comparative du rendement électrique du module PV et du capteur PV-T

La figure V.20 représente l'évolution horaire de rendement électrique de chaque capteur PV et PV-T, Comme l'ajout de vitrage a une grande influence sur la puissance électrique, cette influence est perceptible aussi sur le rendement électrique. A partir de la figure on remarque qu'il y a une diminution des performances électrique du système hybride de 1,5% en comparant à celui de module PV conventionnel. Il est évident que le vitrage affecte négativement le rendement de conversion électrique.

V.5.2. Capteur thermique bi-fluide

De la même manière que nous avons suivie pour étudier le capteur hybride PV/T, et dans le but de montrer l'efficacité énergétique du système combiné, nous ferons une comparaison par simulation numérique entre le capteur thermique bi-fluide combiné avec le capteur PVT (température d'entrée du capteur bi-fluide est celle de sortie du capteur PVT), et un capteur thermique bi-fluide individuel (température d'entrée du capteur bi-fluide est la température ambiante). Le système fonctionne en convection forcée.

Les données météo (l'éclairement et la température d'air ambiant) ont été prises pour la journée du **17/09/2020**.

V.5.2.1. Capteur thermique bi-fluide combinée

Les figures V.21, V.22, et V.23 montrent l'évolution des températures des différents éléments du capteur thermique bi-fluide combiné.

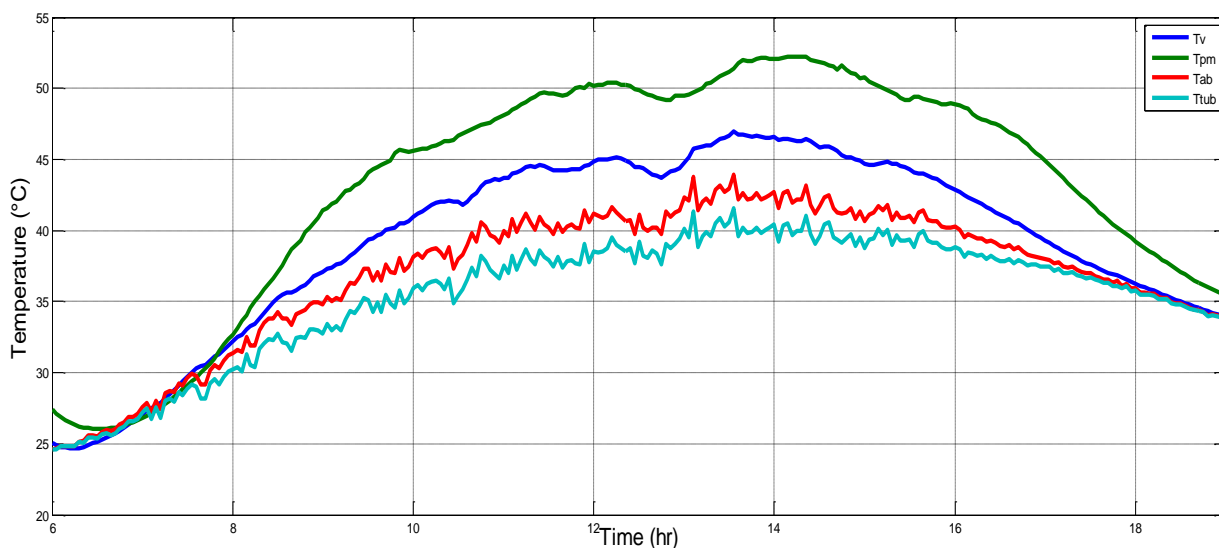


Figure V.21. Variation horaire de température du vitre, plaque absorbante, plaque métallique, et serpentin de capteur bi-fluide

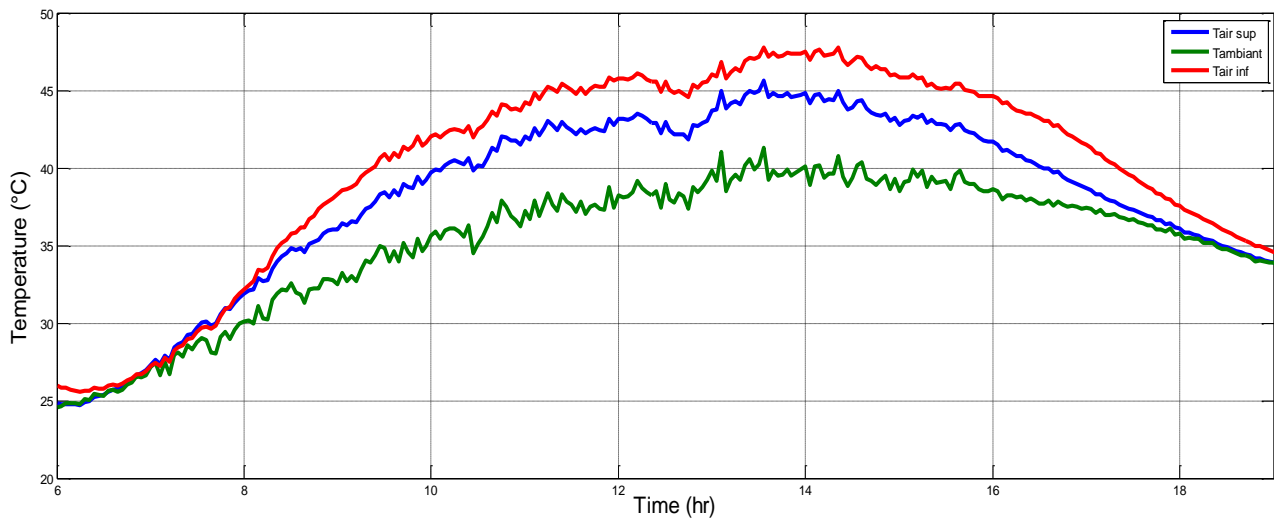


Figure V.22. Variation horaire de la température de l'air en sortie du canal supérieur et du canal inférieur, et la température ambiante.

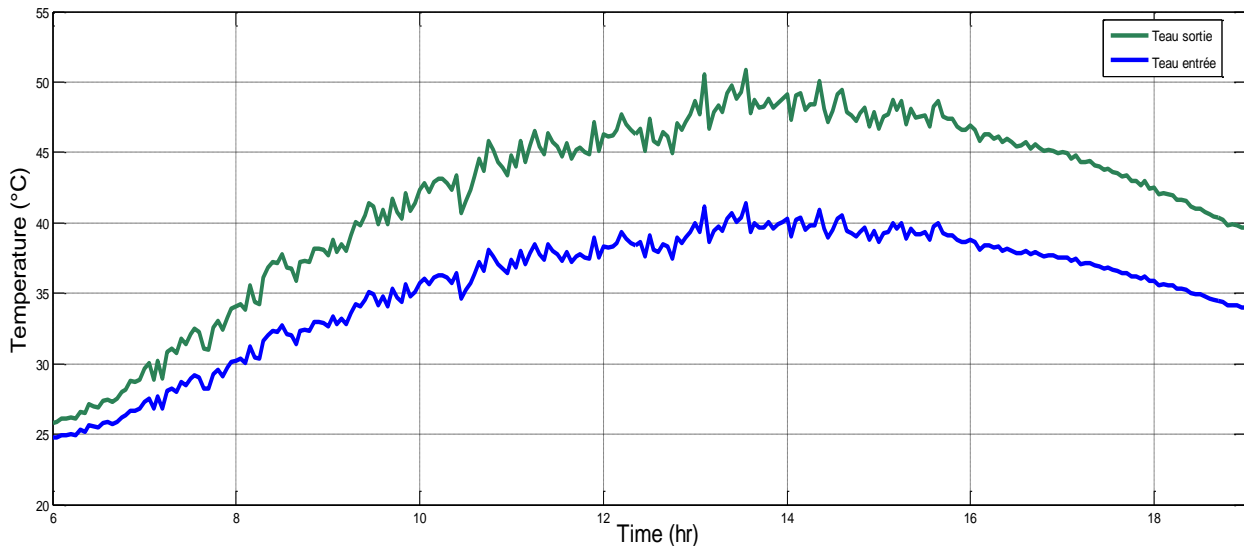


Figure V.23. Variation horaire de la température de l'eau à l'entrée et à la sortie du capteur.

Les températures des composants et des fluides dans le capteur thermique combiné atteignent des valeurs importantes.

- La température la plus élevée dans le capteur bi-fluide combiné est la température de la plaque absorbante, elle atteint $55\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Quant à la température de l'air en sortie dans les deux canaux, elle atteint $48\text{ }^{\circ}\text{C}$ dans le canal inférieur et $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ dans le canal supérieur du capteur bi-fluide combiné.
- Pour l'eau en sortie du capteur : on remarque qu'elle atteint une valeur de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ vers 13h.

V.5.2.2. Comparaison de performances entre un capteur bi-fluide combinée et individuel

Nous présentons ici une comparaison de performances énergétiques de deux cas d'un capteur bi-fluide ; le cas où le capteur est combiné avec le capteur PV/T et le cas où il est seul.

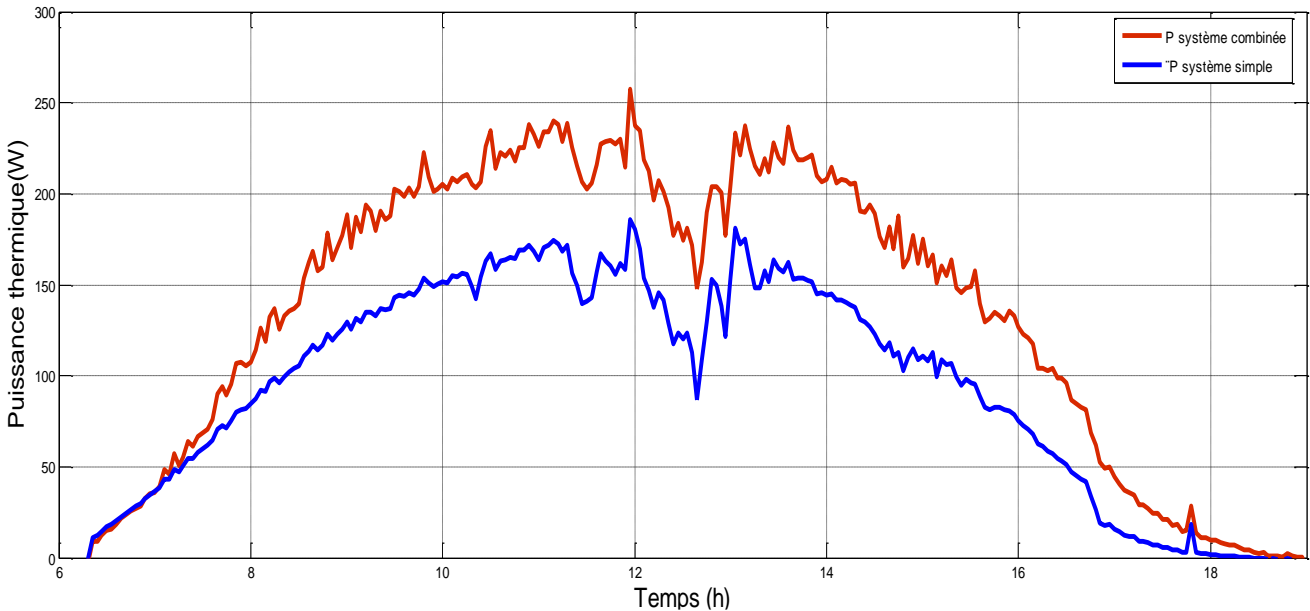


Figure V.24. L'évolution temporelle de la puissance thermique dans les deux cas.

Nous observons que la puissance utile dans le capteur bi-fluide combiné (environ 240 watts) est supérieure à celle du capteur bi-fluide seul (environ 180 watts) car les températures des composants de capteur et des fluides sont plus élevées.

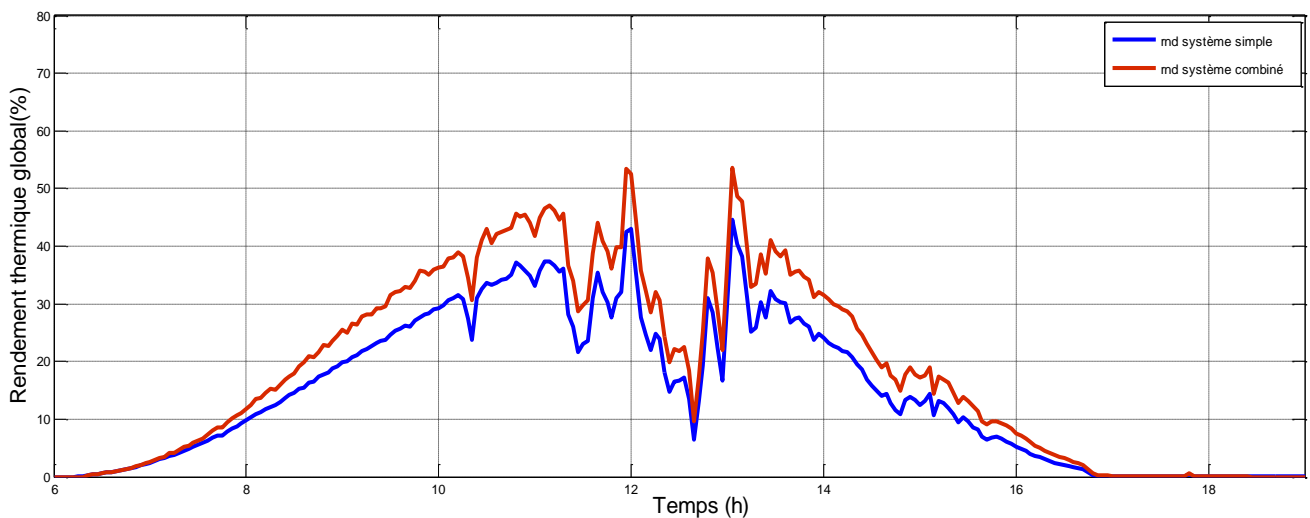


Figure IV.25. Évolution temporelle du rendement thermique dans les deux cas.

En raison de la puissance thermique utile élevée dans le capteur combiné, nous remarquons que le rendement du capteur bi-fluide combiné est supérieur du capteur bi-fluide seul. Sa valeur atteint 50% pour le combiné, et atteint 40 % pour le second. Cette augmentation de rendement (de capteur combinée) peut être justifiée par le préchauffage de fluide caloporteur (air) provenant du capteur hybride.

V.6. Partie III : évaluation expérimentale du système

Dans ce qui suit de cette étude, nous présentons les résultats expérimentaux obtenus d'une série de mesures et tests sur site. Pour le fonctionnement du capteur thermique bi-fluide, nous distinguons deux modes d'opération :

- Mode forcé où l'eau circule dans le serpentin en convection forcée à l'aide d'une pompe ;
- Mode naturel (ou thermosiphon) où l'eau circule dans le serpentin en convection naturelle ;

Dans les deux modes de fonctionnement, l'air circule en convection forcée dans les deux canaux du capteur hybride PV/T et du capteur thermique bi-fluide, et ce à l'aide d'un ventilateur DC.

V.6.1. Capteur hybride PV/T

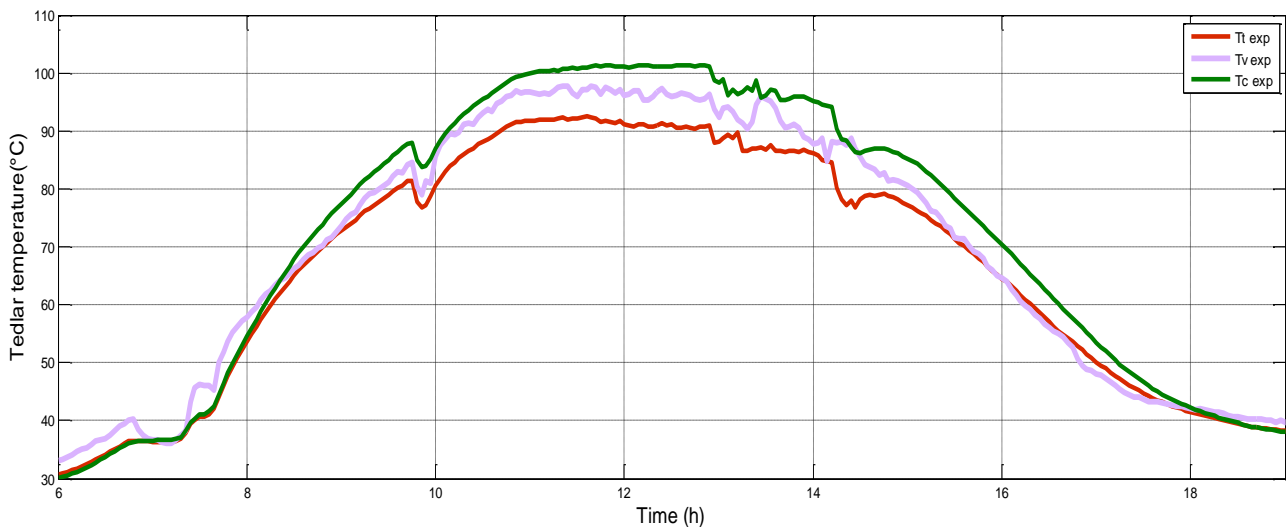


Figure V.26. Évolutions horaire des différentes températures du capteur hybride PV/T.

Les mesures expérimentales ont donné des résultats similaires aux résultats théoriques présentés précédemment. Les évolutions de température des différents composants prennent les mêmes allures logiques que nous avons obtenu précédemment : Tc le plus chaud (environ 102°C) puis Tv (environ 97°C), et Tt le moins chaud (environ 91°C).

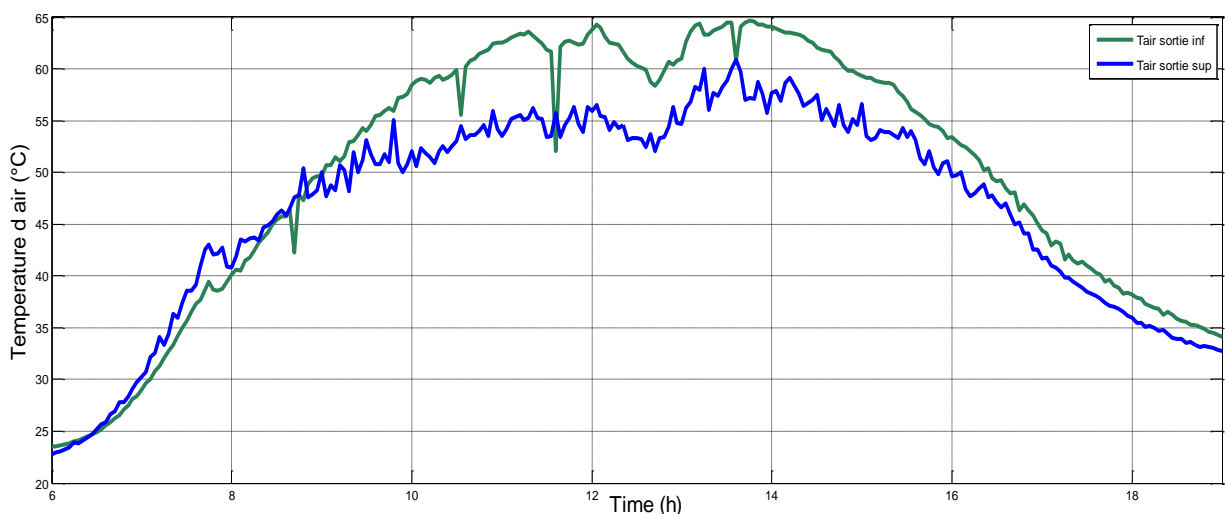


Figure V.27. Évolutions horaire des températures d'air en sortie du système combiné pour les deux canaux.

Notez que la température de l'air sortant du canal inférieur du système est supérieure à celle du canal supérieur en raison de l'isolation thermique du canal inférieur, ce qui réduit les pertes thermiques, contrairement à l'air de canal supérieure, qui perd beaucoup de chaleur aux différents composants du système d'un côté et avec le milieu extérieur d'un autre côté.

V.6.2. Système combiné en Mode forcé et naturel

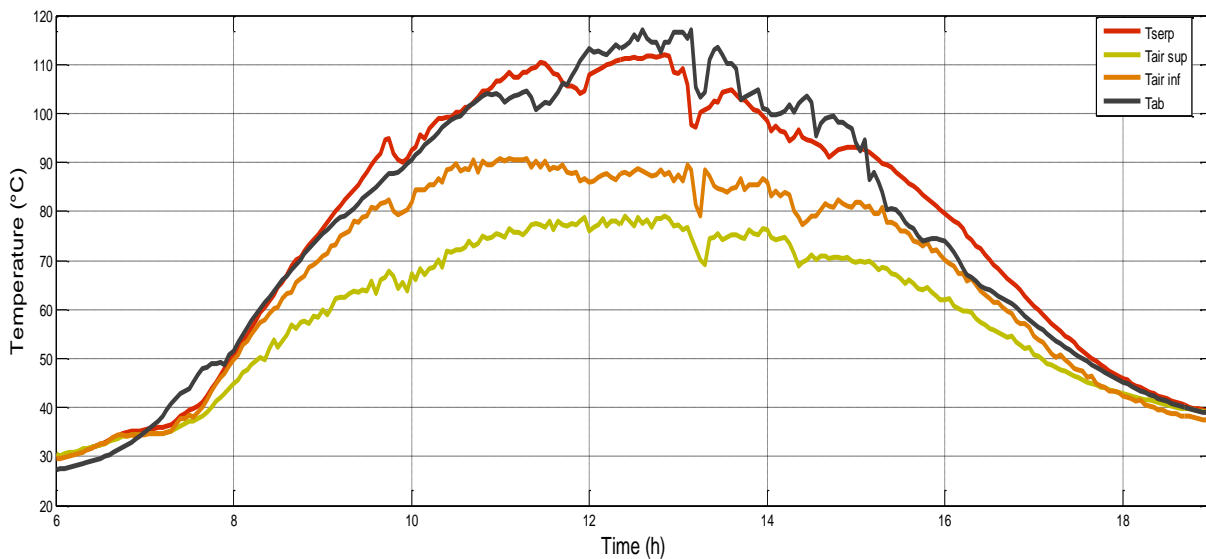


Figure V.28. Évolutions horaire des températures des différents composants du capteur bi-fluide, en mode naturel.

La figure V.28 montre une logique dans la distribution de température pour les différents composants du capteur solaire bi-fluide ainsi que celle des fluides caloporteurs. A partir de ces courbes on remarque que l'évolution des températures des différents éléments est liée au flux solaire reçu. On constate que la température de la plaque absorbante est la plus chaude, elle atteint une valeur maximale de 117°C vers 13h, grâce à l'importante intensité du rayonnement qu'elle reçoit. Concernant les températures de l'air en sortie du capteur solaire, on remarque que la température de l'air en sortie du canal inférieur est relativement élevée par rapport à celle du canal supérieur, et cela est due au fait que dans la partie supérieure on trouve la conduite d'eau qui absorbe une quantité de la chaleur reçue, ainsi qu'aux déperditions thermiques en niveau du vitrage. De plus, le canal inférieur est couvert par une isolation qui réduit les pertes thermiques.

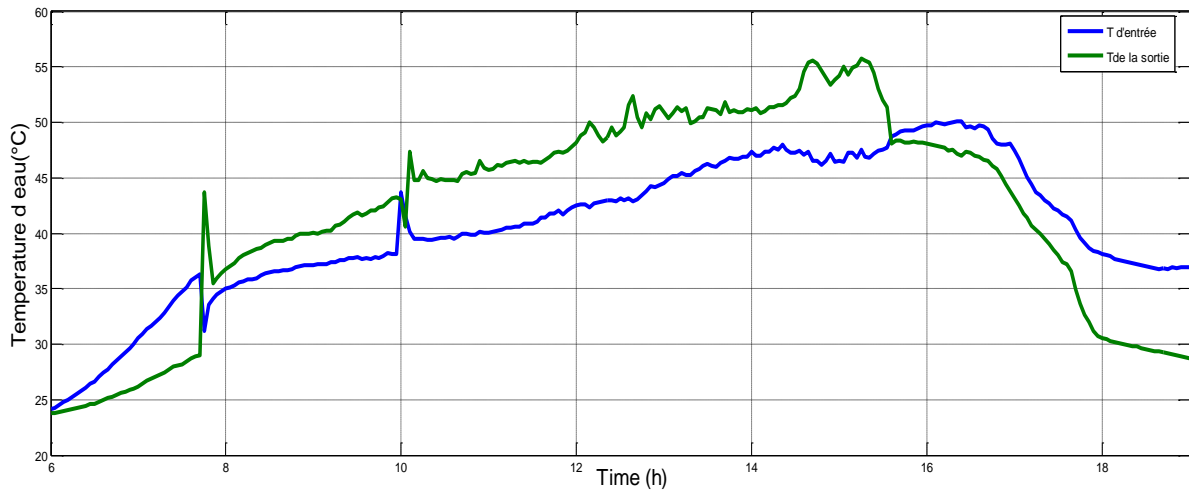


Figure.V.29. Évolutions horaires de la température d'eau en entrée et en sortie du système combiné en mode forcé.

En observant les courbes donnant les évolutions de température de l'entrée et de la sortie de l'eau, on peut distinguer trois phases : deux phases dans lesquelles l'eau à l'entrée est plus chaude que la sortie et l'autre dans laquelle l'eau à la sortie est plus chaude que l'entrée.

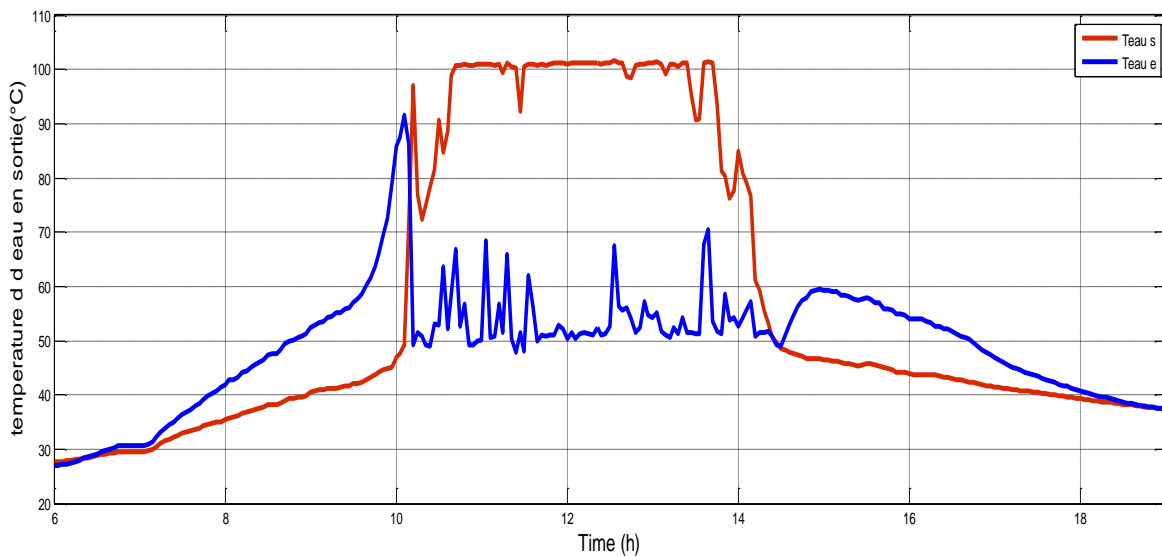


Figure.V.30. Évolutions horaires de la température d'eau en entrée et en sortie du système combiné en mode naturel

A travers la figure ci-dessus donnant les évolutions de températures d'entrée et de sortie de l'eau, on distingue trois phases :

-Dans La première phase : les valeurs de température de l'entrée d'eau soient supérieures à la sortie car la convection naturel est principalement lié au gradient de température, c'est-à-dire que la température de l'eau doit augmenter pour atteindre la sortie et la sortie comprend l'eau descendant du réservoir d'eau dont la température est basse.

-La deuxième phase : dans le régime stationnaire la température de sortie (T_s) est supérieure à la

température d'entrée (T_e) car l'eau a traversé le serpentin, ce qui lui donne de l'énergie thermique qui augmente sa température.

-La troisième phase : la température de l'eau en sortie est inférieure à celle de l'entrée, et c'est dû la faible quantité d'énergie reçue par le capteur (faible rayonnement solaire), et par conséquent l'eau dans le serpentin perd de l'énergie, ce qui diminue sa température.

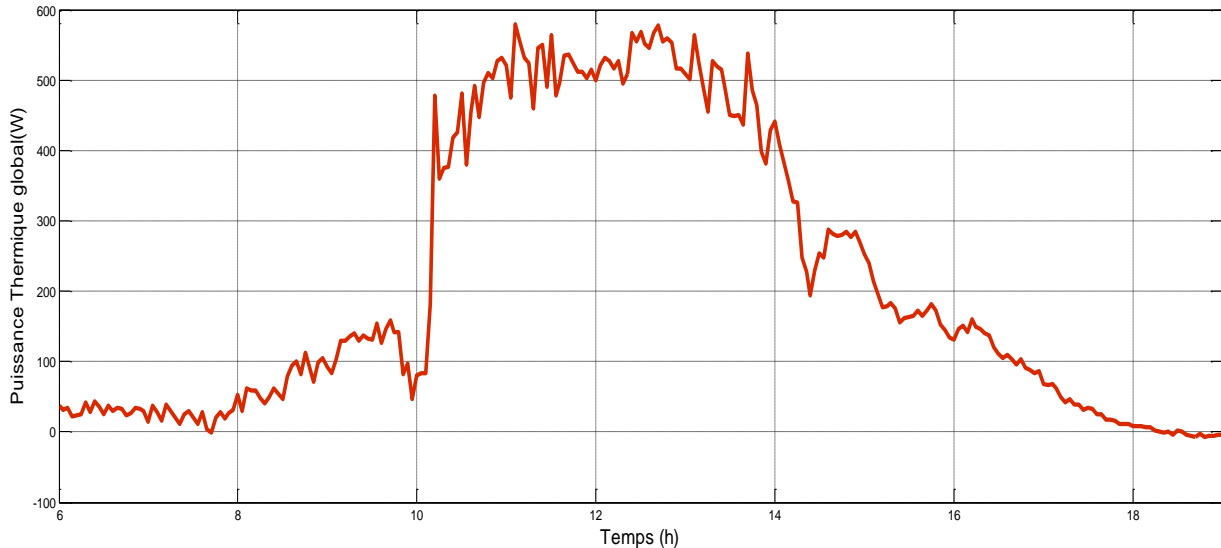


Figure V.31. variation horaire de la puissance thermique globale en mode naturel

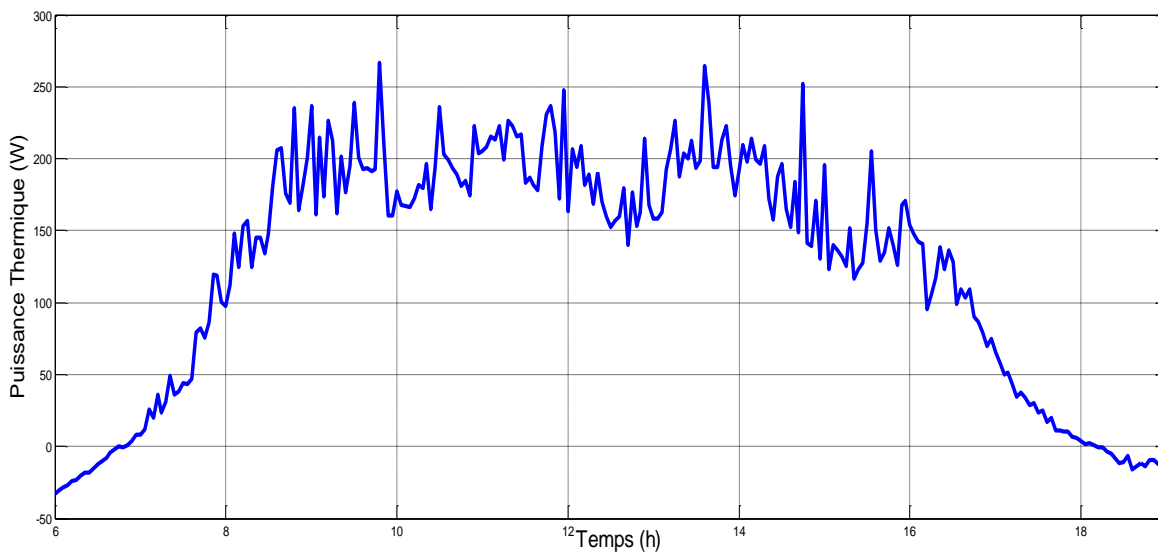


Figure V.32. Variation horaire de puissance thermique en mode forcé.

D'après la figure V.32, on note que les valeurs de la puissance dans le cas de l'écoulement naturel (thermosiphon) atteignent des valeurs supérieures à l'état de l'écoulement forcé (lors de l'utilisation d'une pompe), avec une valeur de 500 W en mode naturel contre 250 watts en mode forcé.

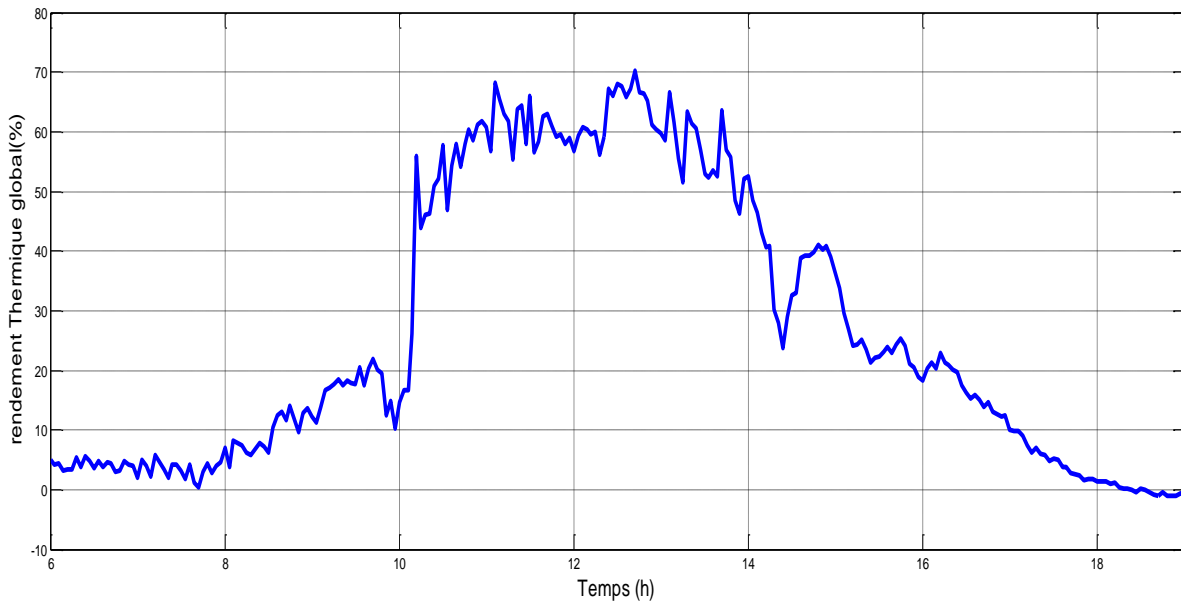


Figure.V.33. Variation horaire du rendement thermique global en mode naturel.

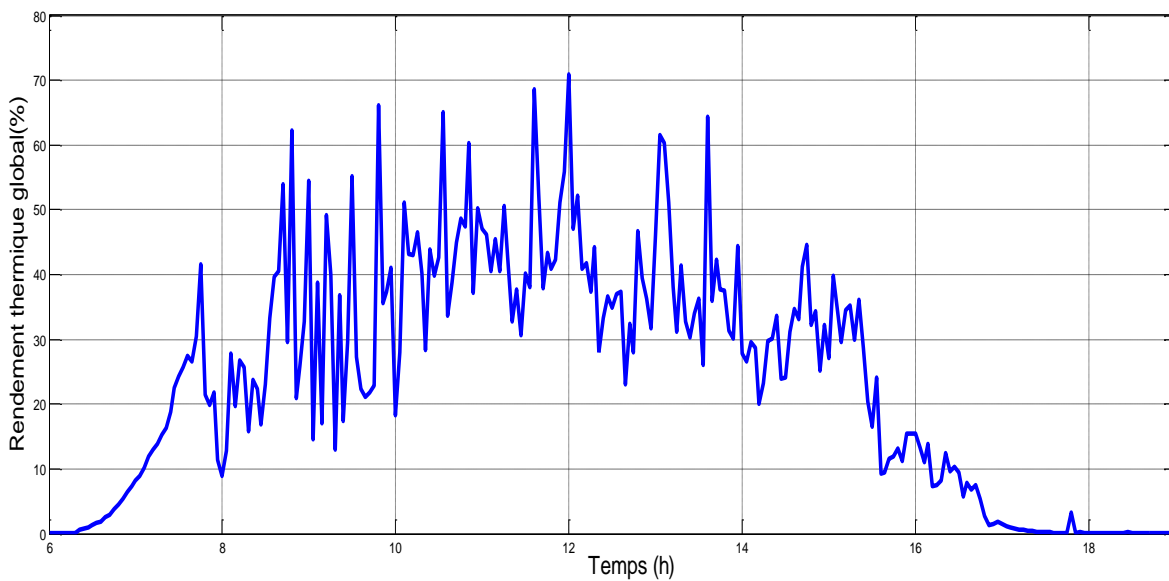


Figure.V.34. Variation horaire du rendement thermique global en mode forcé.

D'après les figure V.33, et V.34, nous pouvons dire que le système est plus efficace dans le cas d'écoulement naturel que celle forcé, où nous enregistrons des rendements thermiques tournent autour de 65%, 40%, respectivement.

En effet, dans un écoulement naturel, le mouvement de l'eau est lent, ce qui donne largement du temps pour s'échauffer contrairement à l'écoulement en convection forcée.

V.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de la simulation numérique et les résultats expérimentaux pour évaluer l'efficacité énergétique du système étudié. Des études comparatives ont été aussi abordées. De ces études on constate que:

- ✓ Les résultats de simulation numérique sont en concordance avec les résultats expérimentaux ; ce qui prouve la validité du modèle physique et numérique développés.
- ✓ Pour le système hybride PV/T, nous avons constaté qu'il est plus performant que le capteur PV conventionnel en termes d'efficacité thermique, mais ses performances électriques ont été réduites en raison de l'influence du vitrage supplémentaire qui affecte sa température, et par l'effet du faible débit massique d'air circulant dans les deux conduites,
- ✓ Pour le capteur bi-fluide combiné, ce capteur donne un rendement de conversion élevé une fois comparé avec le capteur bi-fluide seul.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail effectué dans le cadre de ce mémoire de master, qui tourne autour l'étude d'un système solaire hybride et combiné PV/T – bi-fluide thermique, nous a permis de faire une étude bibliographique sur les travaux qui ont été fait dans la littérature précédente pour se situer dans ce domaine de recherche d'actualité. La mise en équation des différents phénomènes intervenant dans le système constitue un modèle physique basé sur les équations de transfert thermique, de génération électrique, et de corrélations. Le modèle physique développé dans cette étude est ensuite traduit à un modèle numérique sous l'environnement de programmation Matlab en passant par des méthodes de résolution et algorithmes appropriées. La conception et le design adapté du système s'est traduit pratiquement à un prototype à l'échelle réelle en profitant des moyens pratiques mis à notre disposition au niveau l'URERMS. Plusieurs tests et essais expérimentaux ont été effectués sur site. Les données expérimentales nous ont donné l'occasion pour valider le modèle numérique achevé. Prenant la nature de circulation d'eau dans le système, le prototype a été testé et évalué en deux mode de fonctionnement ; mode de circulation naturelle (thermosiphon), et le mode de circulation forcée. L'objectif de cette étude a porté sur plusieurs points d'optimisation de la conception à l'utilisation en exploitant la simulation numérique et la voie expérimentale. Ce système a été proposé pour optimiser l'utilisation de l'énergie solaire en augmentant le taux de conversion, et réduire les pertes qui se produisent lors de l'utilisation des systèmes conventionnels. De plus, le système proposé peut être une solution idéale à intégrer dans les activités du monde rurales et agricole. Nous avons réussi à étudier expérimentalement et numériquement la combinaison d'un capteur hybride PV-T avec le capteur thermique bi-fluide (qui est considéré comme l'un des dispositifs solaires les plus complexes).

✚ L'étude comprenait principalement deux parties :

- Une étude théorique et de simulation visant à évaluer l'efficacité du système en le comparant à d'autres configurations.
- Une étude expérimentale pour valider de modèle de simulation numérique proposé et tester expérimentalement les performances réelles du système.

✚ Les conclusions suivantes ont été tirées :

- Le modèle numérique proposé coïncide avec les résultats expérimentaux.

- L'hybridation du photovoltaïque avec de la thermique optimise le rendement thermique et le rendement globale des capteurs solaires.
- La combinaison de deux systèmes augment le rendement thermique des capteurs bi-fluides, et par conséquent le rendement global de l'installation.
- Prenant en considération les conditions opératoires de l'étude, l'objectif de refroidir le module PV du capteur hybride n'a pas été atteint en raison du faible débit d'air circulant au-dessus et en dessous du module PV.

Le système que nous avons conçu à l'URER-MS est proposé comme solution à une problématique énergétiques locale liée à la disponibilité de l'énergie dans les sites isolés et à des raisons économiques.

Pour élargir la portée des travaux réalisés, nous suggérons comme perspectives les points suivants :

- Mener des études saisonnières (notamment la saison chaude et la saison froide) pour évaluer et tester d'une manière complète les performances électrique et thermique de la configuration développé dans des différentes conditions opératoires possible.
 - Etude d'un système énergétique complet, i.e. l'ajoute d'une enceinte de séchage avec produit à sécher dans le but tester le système avec une application.
 - Intégrer le système de capteurs solaires avec support de tracking (suiveur solaire) pour maximiser le rayonnement solaire reçu par le système, et par conséquent augmenter les performances énergétiques de l'installation.
- ✚ Enfin, nous espérons que ce projet ne restera pas uniquement un objet d'un mémoire de fin d'études, mais nous espérons plutôt le développer et le commercialiser comme une étape efficace pour atteindre un pourcentage de suffisance énergétique, en particulier dans les zones isolées.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : **Mr. FELLAH Boumediene** «Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah», Mémoire de Magister," UNIVERSITE ABOU-BAKR BELKAID de TLEMCEM», SOUTENU EN Octobre 2012
- [2] : http://geog.uoregon.edu/envchange/clim_animations/flash/tmp2m.html
- [3] : **GHECHAM SOUMIA**, « étude et modélisation des transferts thermiques et de l'efficacité énergétique d'un capteur solaire hybride photovoltaïque/thermique (PV/T) a eau destine au secteur résidentiel »2017, mémoire de master, université des sciences et de la technologie houari Boumediene, USTHB.
- [4] : **Mr SLIMANI Mohamed EL-Amine**, Etude d'un capteur de type « PV-THERM » pour un séchoir solaire indirect. Conception d'un modèle de simulation numérique, mémoire de master, université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, USTHB.
- [5] : **KHELIFA Abdelkrim**, étude numérique et modélisation d'un capteur solaire hybride, Mémoire de Magister, université de BATNA faculté des sciences, 2011.
- [6] : **Ludmil Stoyanov**. Thèse de doctorat, Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables. Energie électrique. Université Pascal Paoli, 2011.
- (7) : **Elhadidy, M.A., Shaahid, S.M.**, (1999). Feasibility of hybrid (wind + solar) power systems for Dhahran, Saudi Arabia. Renewable Energy, vol. 16, pp. 970-976, 1999.
- (8) : **J. Munoz, L. Narvarte, E. Lorenzo** « First operating year of two village PV diesel plants in the south of Morocco »19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 7-11 Paris, France, pp. 3462-3465, June 2004.
- (9) : **L. Stoyanov** « Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables », Thèse de doctorat à l'Université Technique de Sofia, octobre 2011.
- [10] : **M. Browne, B. Norton, S. M.-S.** Energy, and undefined 2016, "Heat retention of a photovoltaic/thermal collector with PCM," Elsevier.
- [11] : **N. Θεοδωρόπουλος, Γ. Βόκας, and Φ. Σκιττίδης**, "A theoretical approach of a hybrid photovoltaic thermal air heating system for domestic heating," 2006.

- [12] : **S. BAHRIA** et **M. AMIRAT**, Influence de l'adjonction des chicane longitudinales sur les performances d'un capteur solaire plan à air, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Bab Ezzouar, Alger.
- [13]: **Guo Chao** , **Jie JI**, **Wei SUN**, **Jinwei MA**, **Wei HE**, **Yanqiu WANG**. Numerical simulation and experimental validation of tri-functional photovoltaic/thermal solar collector. *Energy*; v. 87, pp. 470- 480, 2015.
- [14]: **JOSHI A.S**, **A. TIWARI**, **G.N. TIWARI**, **I. DINCER** and **B.V. REDDY**. Performance evaluation of a hybrid photovoltaic thermal (PV/T) (glass-to-glass) system. *International Journal of Thermal Sciences*; v. 48, pp. 154–164, 2009.
- [15]: **SHAHSAVAR .A**, **M. AMERI**. Experimental investigation and modeling of a direct-coupled PV/T air collector. *Solar Energy*; v. 84, pp. 1938–1958, 2010.
- [16]: **Chao Guo**, **Jie Ji**, **Wei Sun**, **Jinwei Ma**, **Wei He**, **Yanqiu Wang**. Numerical simulation and experimental validation of tri-functional photovoltaic/thermal solar collector, *Energy*, 2015; 87:470-480.
- [17]: **Tripanagnostopoulos Yannis**. Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems, *Solar Energy*, 2007; 81:1117–1131.
- [18]: **Assoa YB**, **Menezo C**, **Fraisse G**, **Yezou R**, **Brau J**. Study of a new concept of photovoltaic-thermal hybrid collector. *Solar Energy* 2007 ; 81:1132-1143.
- [19] : **SLIMANI M.E.A**, étude d'un séchoir solaire agricole muni d'un capteur solaire de type « PV-THERM ». Réalisation d'un prototype et caractérisation. Thèse de Doctorat 2017.
- [20]: **L. BOUHAKI*** , **R. SAADANI**, **R. AGOUNOUN**, **K. SBAI**, **M. RAHMOUNE**, Simulation et comparaison des trois technologies des modules photovoltaïques raccordés au réseau, BP 11201, 14 Avril 2017
- [21]: **SLIMANI Mohamed EL-Amine**. Etude d'un capteur de type « PV-THERM » pour un séchoir solaire indirect. Conception d'un modèle de simulation numérique. Thèse master ; Université U.S.T.H.B, 2013.
- [22]:**Orioli A** , **Di Gangi A**.Aprocedure to calculate the five-parameter model of crystalline silicon photovoltaic modules on the basis of the tabular performance data . *Appl Energy* 2012; 102:1160-77.

- [23]: **Mohamed El Amine SLIMANI , Madjid AMIRAT , Sofiane BAHRIA** ,ÉTUDE ET MODELISATION THERMOELECTRIQUE D'UN CAPTEUR HYBRIDE PV/T A AIR. (Décembre 2016), pp 63-68.
- [24]: **SARHADDI F, FARAHAT S, AJAM H, BEHZADMEHR A, ADELI M MAHDAVI**. An improved thermal and electrical model for a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector, Appl Energy, 2010; 87: 2328-39.
- [25]: **Amori KE, Abd-AIRaheem MA**. Field study of various air based photovoltaic/thermal hybrid solar collectors. Renew Energy 2014; 63: 402-14.
- [26]: **Brideau SA, Collins MR**. Development and validation of a hybrid PV/Thermal air based collector model with impinging jets. Sol Energy 2014; 102 234–46.
- [27]: <http://www.thermique55.com/principal/thermique.pdf>.
- [28]: **CHRISTOFARI, C, CANALETTI, J, NOTTON, G, DARRAS, C**. Innovative patented PV/TH solar collector: optimization and performance evaluation, Energy Procedia, 2012; 14: 235- 240.
- [29]: **KOU, Q., KLEIN S.A., BECKMAN, W.A.**, A method for estimating the long-term performance of direct-coupled PV pumping systems, Solar Energy, vol. 64, pp. 33–40, 1998.
- [30]: **CHOW T.T.**, Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model, Sol Energy, 2003, Vol. 75:143-152.
- [31]: Bejan, A., Kraus, A.D.,(2003) Heat Transfer Handbook. John Wiley and Sons, Inc., USA.
- [32]: **Donatien Njomo**, Etude théorique du comportement thermique d'un capteur solaire plan à air à couverture combinée plastique, Rev Gén. Therm (Elsevier), 1998, Vol 37, pp 973-980.

ANNEXES

ANNEXE 'A' : la Suite des équations

A.1. Le développement des quelques équations de chapitre II :**A.1.1. Pour l'air du canal supérieur de capteur bi-fluide :**

$$M_{\text{air1}} C_{p_{\text{air}}} \frac{dT_{\text{air1}}}{dt} = Q_{v,ab-\text{air1}} + Q_{v,s-\text{air1}} + Q_{v,v-\text{air1}} - Q_{u,\text{th}}$$

Alors :

$$M_{\text{air1}} C_{p_{\text{air}}} \frac{dT_{\text{air1}}}{dt} = A_{ab} h_{v,\text{air1-a}} (T_{ab} - T_{\text{air1}}) + A_s h_{v,s-\text{air1}} (T_s - T_{\text{air1}}) \\ + A_v h_{v,v-\text{air1}} (T_v - T_{\text{air1}}) - M_{\text{air1}} C_{p_{\text{air}}} (T_{s,\text{air1}} - T_{e,\text{air1}})$$

$M_{\text{air1}} C_{p_{\text{air}}} \frac{dT_{\text{air1}}}{dt} = 0$: Terme d'accumulation de l'air en écoulement est négligeable et sachant que pour un élément de surface d'échange $dA = l \cdot dx$ qui correspond une variation de la température dT_{air1} Donc :

$$A_{ab} h_{v,\text{air1-a}} (T_{ab} - T_{\text{air1}}) + A_s h_{v,s-\text{air1}} (T_s - T_{\text{air1}}) + A_v h_{v,v-\text{air1}} (T_v - T_{\text{air1}}) - \\ M_{\text{air1}} C_{p_{\text{air}}} (T_{s,\text{air1}} - T_{e,\text{air1}}) = 0$$

Sachant que : $A_v = l_v \cdot dx_v$, $\varepsilon = \frac{A_v}{A_{ab}}$ et $\varepsilon = \frac{A_v}{A_s}$ ce qui nous donne $dx_{ab} = \frac{dx_v}{\varepsilon}$, et de même

$$dx_s = \frac{dx_v}{\varepsilon}$$

Donc (et on divise sur dx_v) :

$$\frac{l_{ab}}{\varepsilon} \cdot h_{v,\text{air1-a}} (T_{ab} - T_{\text{air1}}) + \frac{l_s}{\varepsilon} h_{v,s-\text{air1}} (T_s - T_{\text{air1}}) + l_v \cdot h_{v,v-\text{air1}} (T_v - T_{\text{air1}}) \\ - M_{\text{air1}} C_{p_{\text{air}}} \frac{dT_{\text{air1}}}{dx_v} = 0$$

$$\frac{dT_{\text{air1}}}{dx_v} = \frac{\frac{l_{ab}}{\varepsilon} \cdot h_{v,\text{air1-a}} (T_{ab} - T_{\text{air1}}) + \frac{l_s}{\varepsilon} h_{v,s-\text{air1}} (T_s - T_{\text{air1}}) + l_v \cdot h_{v,v-\text{air1}} (T_v - T_{\text{air1}})}{M_{\text{air1}} C_{p_{\text{air}}}}$$

$$\frac{dT_{\text{air1}}}{dx_v} \\ = \frac{T_{\text{air1}} \left(-\frac{l_{ab}}{\varepsilon} \cdot h_{v,\text{air1-a}} - \frac{l_s}{\varepsilon} h_{v,s-\text{air1}} - l_v \cdot h_{v,v-\text{air1}} \right) + \frac{l_{ab}}{\varepsilon} \cdot h_{v,\text{air1-a}} T_{ab} + \frac{l_s}{\varepsilon} h_{v,s-\text{air1}} T_s + l_v \cdot h_{v,v-\text{air1}} T_v}{M_{\text{air1}} C_{p_{\text{air}}}}$$

La solution de l'équation différentielle :

$$T_{\text{air1}} = T_{\text{air1 H}} + T_{\text{air1 P}} = C e^{ax} - b/a$$

A $x=0$ on a $T_{\text{air1}}(0) = T_{\text{air1 e}}$ donc $C = T_{\text{air1 e}} + b/a$

Où :

$$a = \frac{-\frac{l_{ab}}{\epsilon} \cdot h_{v,air1-a} - \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} - l \cdot h_{v,v-air1}}{M_{air1} C_{p,air}} ; b = \frac{\frac{l_{ab}}{\epsilon} \cdot h_{v,air1-a} T_{ab} + \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} T_s + l \cdot h_{v,v-air1} T_v}{M_{air1} C_{p,air}}$$

$$T_{air1}(x) = \left(T_{air1e} + \frac{-\frac{l_{ab}}{\epsilon} \cdot h_{v,air1-a} T_{ab} - \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} T_s - l \cdot h_{v,v-air1} T_v}{\frac{l_{ab}}{\epsilon} \cdot h_{v,air1-a} + \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} + l \cdot h_{v,v-air1}} \right)$$

$$\times e^{\frac{-\frac{l_{ab}}{\epsilon} \cdot h_{v,air1-a} - \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} - l \cdot h_{v,v-air1}}{M_{air1} C_{p,air}} x} + \frac{\frac{l_{ab}}{\epsilon} \cdot h_{v,air1-a} T_{ab} + \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} T_s + l \cdot h_{v,v-air1} T_v}{\frac{l_{ab}}{\epsilon} \cdot h_{v,air1-a} + \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} + l \cdot h_{v,v-air1}}$$

A x=L

$$T_{air1}(L) = \left(T_{air1e} + \frac{-\frac{l_{ab}}{\epsilon} \cdot h_{v,air1-a} T_{ab} - \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} T_s - l \cdot h_{v,v-air1} T_v}{\frac{l_{ab}}{\epsilon} \cdot h_{v,air1-a} + \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} + l \cdot h_{v,v-air1}} \right)$$

$$\times e^{\frac{-\frac{l_{ab}}{\epsilon} \cdot h_{v,air1-a} - \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} - l \cdot h_{v,v-air1}}{M_{air1} C_{p,air}} L} + \frac{\frac{l_{ab}}{\epsilon} \cdot h_{v,air1-a} T_{ab} + \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} T_s + l \cdot h_{v,v-air1} T_v}{\frac{l_{ab}}{\epsilon} \cdot h_{v,air1-a} + \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} + l \cdot h_{v,v-air1}}$$

Où :

T_{air1e} : température d'entrée de l'air

T_{air1s} : température de la sortie de l'air

La température moyenne du l'air au sein du canal peut être calculée par :

$$T_{air1 \text{ moy}} = \frac{1}{L} \int_0^L T_{air1}(x) \cdot dx$$

$$T_{air1 \text{ moy}} = \frac{M_{air1} C_{p,air}}{\left(\frac{l_{ab}}{\epsilon} \cdot h_{v,air1-a} + \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} + l \cdot h_{v,v-air1} \right) \cdot L} \left(T_{air1e} + \frac{-\frac{l_{ab}}{\epsilon} \cdot h_{v,air1-a} T_{ab} - \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} T_s - l \cdot h_{v,v-air1} T_v}{\frac{l_{ab}}{\epsilon} \cdot h_{v,air1-a} + \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} + l \cdot h_{v,v-air1}} \right) \times$$

$$\left(e^{\frac{-\frac{l_{ab}}{\epsilon} \cdot h_{v,air1-a} - \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} - l \cdot h_{v,v-air1}}{M_{air1} C_{p,air}} L} - 1 \right) + \frac{\frac{l_{ab}}{\epsilon} \cdot h_{v,air1-a} T_{ab} + \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} T_s + l \cdot h_{v,v-air1} T_v}{\frac{l_{ab}}{\epsilon} \cdot h_{v,air1-a} + \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} + l \cdot h_{v,v-air1}} L$$

A.1.2. Pour l'eau :

$$M_{eau} C_{p,eau} \frac{dT_{eau}}{dt} = Q_{v,s-eau} - Q_{u,th}$$

Alors :

$$M_{eau} C_{p,eau} \frac{dT_{eau}}{dt} = A_{s,int} \cdot h_{v,s-eau} (T_s - T_{eau}) - \dot{m}_{eau} C_{p,eau} (T_{s,eau} - T_{e,eau})$$

Et : $A_{s,int} = 2 \pi r_{s,int} L_s$

Pour un élément de volume : $T_s - T_e = dt$

$M_{\text{eau}} C_{p_{\text{eau}}} \frac{dT_{\text{eau}}}{dt} \approx 0$, la quantité d'énergie stockée est négligeable, Car le fluide est en mouvement et sachant que

$dA = 2\pi R_{t,int} \cdot dy$ Donc :

$$dA_{s,int} \cdot h_{v,s-eau} (T_s - T_{\text{eau}}) - \dot{m}_{\text{eau}} C_{p_{\text{eau}}} (T_{s,\text{eau}} - T_{e,\text{eau}}) = 0$$

$$2\pi R_{t,int} \cdot h_{v,s-eau} (T_s - T_{\text{eau}}) - \dot{m}_{\text{eau}} C_{p_{\text{eau}}} \frac{dT_{\text{eau}}}{dy} = 0$$

$$\frac{dT_{\text{eau}}}{dy} = \frac{(-2\pi R_{t,int} \cdot h_{v,s-eau}) T_{\text{eau}} + 2\pi R_{t,int} \cdot h_{v,s-eau} T_s}{\dot{m}_{\text{eau}} C_{p_{\text{eau}}}}$$

La solution de l'équation différentielle :

$$T_{\text{eau}} = T_{\text{eau}H} + T_{\text{eau}P} = Ce^{ay} - b/a$$

A $y=0$: on a $T_{\text{eau}}(0) = T_{\text{eau},e}$ donc $C = T_{\text{eau},e} + b/a$

$$\text{Où : } a = \frac{-2\pi R_{t,int} \cdot h_{v,s-eau}}{\dot{m}_{\text{eau}} C_{p_{\text{eau}}}} \quad ; \quad b = \frac{2\pi R_{t,int} \cdot h_{v,s-eau} T_s}{\dot{m}_{\text{eau}} C_{p_{\text{eau}}}}$$

$$T_{\text{eau}}(y) = (T_{\text{eau},e} - T_s) \cdot e^{\frac{-2\pi R_{t,int} \cdot h_{v,s-eau} y}{\dot{m}_{\text{eau}} C_{p_{\text{eau}}}}} + T_s$$

$A = l_s$

$$T_{\text{eau}}(y) = (T_{\text{eau},e} - T_s) \cdot e^{\frac{-2\pi R_{t,int} \cdot h_{v,s-eau} l_s}{\dot{m}_{\text{eau}} C_{p_{\text{eau}}}}} + T_s$$

Et :

$$T_{\text{eau} \text{ moy}} = \frac{-1}{\frac{2\pi R_{t,int} \cdot h_{v,s-eau} l_s}{\dot{m}_{\text{eau}} C_{p_{\text{eau}}}}} (T_{\text{eau},e} - T_s) \cdot \left(e^{\frac{-2\pi R_{t,int} \cdot h_{v,s-eau} l_s}{\dot{m}_{\text{eau}} C_{p_{\text{eau}}}}} - 1 \right) + T_s l_s$$

A.1.3. Pour l'air de canal inférieur (capteur bi-fluide) :

$$M_{\text{air}2} C_{p_{\text{air}}} \frac{dT_{\text{air}2}}{dt} = Q_{v,a-\text{air}2} + Q_{v,p-\text{air}2} - Q_{u,\text{th}}$$

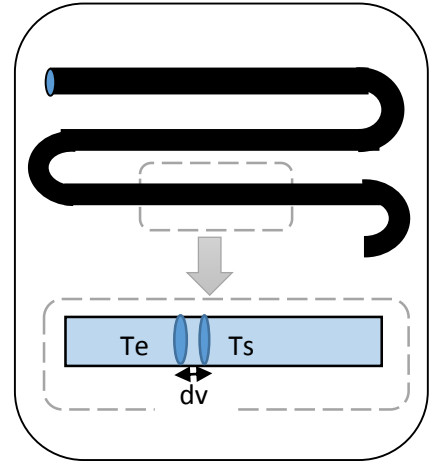
Alors :

$$M_{\text{air}2} C_{p_{\text{air}}} \frac{dT_{\text{air}2}}{dt} = A_{ab} \cdot h_{v,ab-\text{air}2} (T_{ab} - T_{\text{air}2}) + A_p \cdot h_{v,p-\text{air}2} (T_{ab} - T_{\text{air}2}) -$$

$$M_{\text{air}2} C_{p_{\text{air}}} (T_{s,\text{air}2} - T_{e,\text{air}2})$$

Et :

$$A_{ab} = [D_{\text{ext}} \cdot L_t + S_1 \cdot (N_t - 1)]$$



$$A_p = L_p \cdot l_p$$

Pour un élément de volume : $T_s - T_e = dT$

$M_{air2} C_{p_{air}} \frac{dT_{air2}}{dt} = 0$ Terme d'accumulation négligeable et sachant que $dA_p = l \cdot dx_p$ et $\varepsilon = \frac{A_p}{A_{ab}}$ ce qui nous donne $dx_{ab} = \frac{dx_p}{\varepsilon}$ donc :

$$\frac{l_{ab}}{\varepsilon} \cdot h_{v,ab-air2} (T_{ab} - T_{air2}) + l_p \cdot h_{v,p-air2} (T_p - T_{air2}) - M_{air2} C_{p_{air}} \frac{dT_{air2}}{dx_p} = 0$$

$$\frac{dT_{air2}}{dx_p} = \frac{\frac{l_{ab}}{\varepsilon} \cdot h_{v,ab-air2} (T_{ab} - T_{air2}) + l_p \cdot h_{v,p-air2} (T_p - T_{air2})}{M_{air2} C_{p_{air}}}$$

$$\frac{dT_{air2}}{dx_p} = \frac{T_{air2} \cdot \left(-\frac{l_{ab}}{\varepsilon} \cdot h_{v,ab-air2} - l_p \cdot h_{v,p-air2} \right) + \frac{l_{ab}}{\varepsilon} \cdot h_{v,ab-air2} \cdot T_{ab} + l_p \cdot h_{v,p-air2} \cdot T_p}{M_{air2} C_{p_{air}}}$$

La solution de l'équation différentielle :

$$T_{air2} = T_{air2 H} + T_{air2 P} = C e^{ax} - b/a$$

A : $x=0$ on a $T_{air2}(0) = T_{air2 e}$ donc $C = T_{air2 e} + b/a$

Où : $a = \frac{-\frac{l_{ab}}{\varepsilon} \cdot h_{v,ab-air2} - l_p \cdot h_{v,p-air2}}{M_{air2} C_{p_{air}}}$; $b = \frac{\frac{l_{ab}}{\varepsilon} \cdot h_{v,ab-air2} \cdot T_{ab} + l_p \cdot h_{v,p-air2} \cdot T_p}{M_{air2} C_{p_{air}}}$

$$T_{air2}(x) = \left(T_{air2 e} - \frac{\frac{l_{ab}}{\varepsilon} \cdot h_{v,ab-air2} \cdot T_{ab} + l_p \cdot h_{v,p-air2} \cdot T_p}{\frac{l_{ab}}{\varepsilon} \cdot h_{v,ab-air2} - l_p \cdot h_{v,p-air2}} \right) \cdot e^{\frac{-\frac{l_{ab}}{\varepsilon} \cdot h_{v,ab-air2} - l_p \cdot h_{v,p-air2}}{M_{air2} C_{p_{air}}} x} + \frac{\frac{l_{ab}}{\varepsilon} \cdot h_{v,ab-air2} \cdot T_{ab} + l_p \cdot h_{v,p-air2} \cdot T_p}{\frac{l_{ab}}{\varepsilon} \cdot h_{v,ab-air2} - l_p \cdot h_{v,p-air2}}$$

A : $x = L$

$$T_{air2}(L) = \left(T_{air2 e} - \frac{\frac{l_{ab}}{\varepsilon} \cdot h_{v,ab-air2} \cdot T_{ab} + l_p \cdot h_{v,p-air2} \cdot T_p}{\frac{l_{ab}}{\varepsilon} \cdot h_{v,ab-air2} - l_p \cdot h_{v,p-air2}} \right) \cdot e^{\frac{-\frac{l_{ab}}{\varepsilon} \cdot h_{v,ab-air2} - l_p \cdot h_{v,p-air2}}{M_{air2} C_{p_{air}}} L} + \frac{\frac{l_{ab}}{\varepsilon} \cdot h_{v,ab-air2} \cdot T_{ab} + l_p \cdot h_{v,p-air2} \cdot T_p}{\frac{l_{ab}}{\varepsilon} \cdot h_{v,ab-air2} - l_p \cdot h_{v,p-air2}}$$

Alors :

$$T_{\text{air2,moy}}(L) = \frac{-M_{\text{air2}}C_{p_{\text{air}}}}{\left(\frac{l_{\text{ab}}}{\varepsilon} \cdot h_{v,\text{ab-air2}} - l_{\text{p}} \cdot h_{v,\text{p-air2}}\right)L} \left(T_{\text{air2e}} - \frac{\frac{l_{\text{ab}}}{\varepsilon} \cdot h_{v,\text{ab-air2}} \cdot T_{\text{ab}} + l_{\text{p}} \cdot h_{v,\text{p-air2}} \cdot T_{\text{p}}}{\frac{l_{\text{ab}}}{\varepsilon} \cdot h_{v,\text{ab-air2}} - l_{\text{p}} \cdot h_{v,\text{p-air2}}} \right) \\ \times \left(e^{\frac{-\frac{l_{\text{ab}}}{\varepsilon} \cdot h_{v,\text{ab-air2}} - l_{\text{p}} \cdot h_{v,\text{p-air2}}}{M_{\text{air2}}C_{p_{\text{air}}}}L} - 1 \right) + \frac{\frac{l_{\text{ab}}}{\varepsilon} \cdot h_{v,\text{ab-air2}} \cdot T_{\text{ab}} + l_{\text{p}} \cdot h_{v,\text{p-air2}} \cdot T_{\text{p}}}{\frac{l_{\text{ab}}}{\varepsilon} \cdot h_{v,\text{ab-air2}} - l_{\text{p}} \cdot h_{v,\text{p-air2}}} L$$

A.2. le bilan thermique de ballon de stockage :

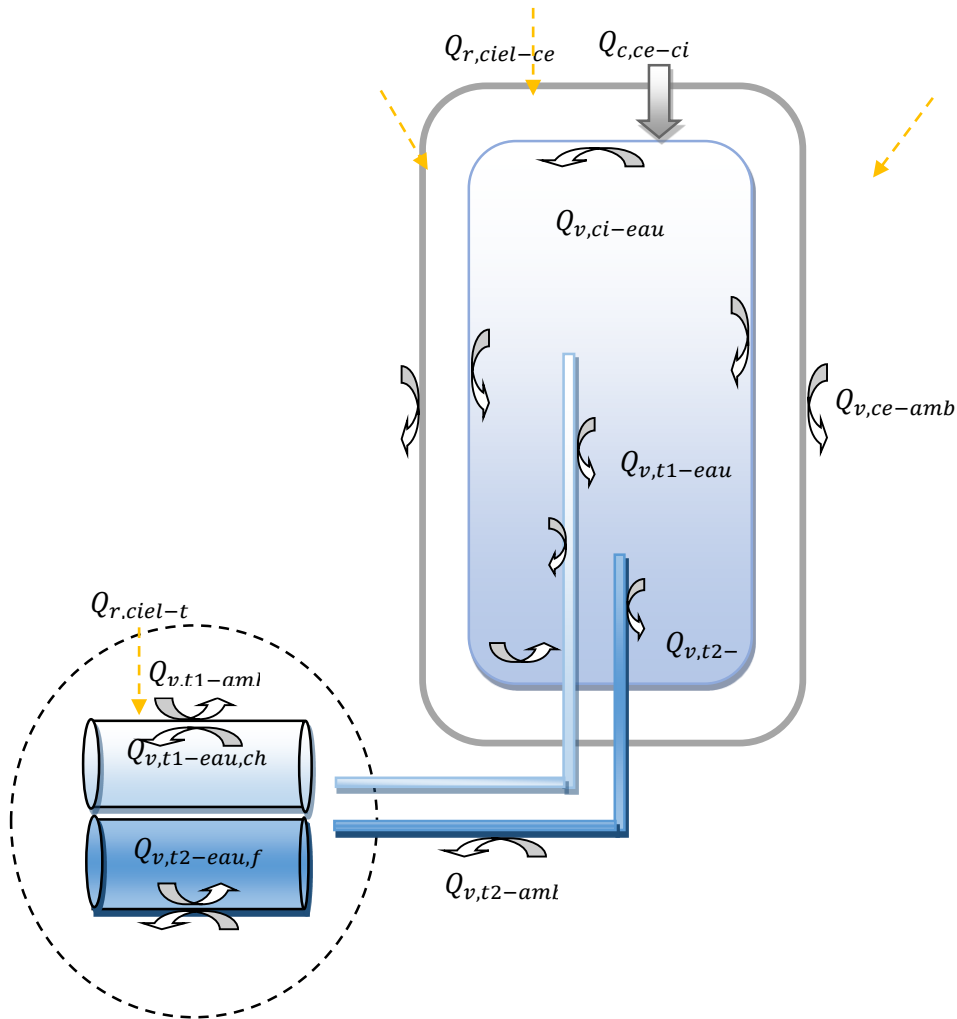


Figure A.1. les échanges thermiques dans le ballon de stockage

A.2.1. Pour la paroi de ballon de stockage :

Pour la paroi du ballon de stockage, les échanges thermiques sont relativement négligeables ou inexistantes avec le milieu extérieur.

A.2.2. Pour l'eau dans le ballon de stockage :

$$M_{\text{eau}}C_{p_{\text{eau}}} \frac{dT_{\text{eau}}}{dt} = Q_{v,t1-eau} + Q_{v,t2-eau} + Q_{v,ci-eau}$$

$$M_{\text{eau}} C_{p_{\text{eau}}} \frac{dT_{\text{eau}}}{dt} = A_{t1} \cdot h_{v,t1-\text{eau}} (T_{t1} - T_{\text{eau}}) + A_{t2} \cdot h_{v,t2-\text{eau}} (T_{t2} - T_{\text{eau}}) + A_{c,\text{int}} \cdot h_{c,\text{eau-ci}} (T_{ci} - T_{\text{eau}})$$

$$\frac{dT_{\text{eau}}}{dt} = \frac{(-A_{t1} \cdot h_{v,t1-\text{eau}} - A_{t2} \cdot h_{v,t2-\text{eau}} - A_{c,\text{int}} \cdot h_{c,\text{eau-ci}}) T_{\text{eau}}}{M_{\text{eau}} C_{p_{\text{eau}}} + \frac{A_{t1} \cdot h_{v,t1-\text{eau}} T_{t1} + A_{t2} \cdot h_{v,t2-\text{eau}} T_{t2} + A_{c,\text{int}} \cdot h_{c,\text{eau-ci}} T_{ci}}{M_{\text{eau}} C_{p_{\text{eau}}}}$$

A.2.3. Pour le tube(1) :

$$m_{t1} C_{p_{t1}} \frac{dT_{t1}}{dt} = Q_{r,\text{ciel-t}} + Q_{v,t1-\text{amb}} + Q_{v,t1-\text{eau,ch}}$$

Alors :

$$m_{t1} C_{p_{t1}} \frac{dT_{t1}}{dt} = A_{t1} h_{r,\text{ciel-t}} (T_{\text{ciel}} - T_{t1}) + A_{t1} h_{v,t1-\text{amb}} (T_{\text{amb}} - T_{t1}) +$$

$$A_{t1} h_{v,t1-\text{eau,ch}} (T_{\text{eau,ch}} - T_{t1})$$

Et :

$$A_{t1} = \pi \cdot R \cdot L_{t1}$$

$$A'_{t1} = \pi \cdot R (L_{t1} + L_{t1'})$$

L_{t1} : la longueur du tube qui branchée entre le ballon de stockage et le capteur.

$L_{t1'}$: la longueur du tube au sein de ballon de stockage.

A.2.4. Pour l'eau chaude :

$$M_{\text{eau,ch}} C_{p_{\text{eau}}} \frac{dT_{\text{eau,ch}}}{dt} = Q_{v,t1-\text{eau,ch}}$$

$$M_{\text{eau,ch}} C_{p_{\text{eau}}} \frac{dT_{\text{eau,ch}}}{dt} = A_{t1} h_{v,t1-\text{eau,ch}} (T_{t1} - T_{\text{eau,ch}})$$

$$\frac{dT_{\text{eau,ch}}}{dt} = \frac{A_{t1} h_{v,t1-\text{eau,ch}} (T_{t1} - T_{\text{eau,ch}})}{M_{\text{eau,ch}} C_{p_{\text{eau}}}}$$

A.2.5. Pour le tube(2) :

$$m_{t2} C_{p_{t2}} \frac{dT_{t2}}{dt} = Q_{r,\text{ciel-t}} + Q_{v,t2-\text{amb}} + Q_{v,t2-\text{eau,f}}$$

$$m_{t2} C_{p_{t2}} \frac{dT_{t2}}{dt} = A_{t2} h_{r,\text{ciel-t2}} (T_{\text{ciel}} - T_{t2}) + A_{t2} h_{v,t2-\text{amb}} (T_{\text{amb}} - T_{t2}) +$$

$$A_{t2} h_{v,t2-\text{eau,f}} (T_{\text{eau,f}} - T_{t2})$$

Et :

$$A_{t2} = \pi \cdot R \cdot L_{t2}$$

$$A'_{t2} = \pi \cdot R (L_{t2} + L_{t2'})$$

A.2.6. Pour l'eau froide :

$$M_{\text{eau},f} C_{p\text{eau}} \frac{dT_{\text{eau},f}}{dt} = Q_{v,t2-\text{eau},f}$$

$$\frac{dT_{\text{eau},f}}{dt} = \frac{A_{t2} h_{v,t2-\text{eau},f} (T_{t2} - T_{\text{eau},f})}{M_{\text{eau},f} C_{p\text{eau}}}$$

A.3. Le bilan thermique global :

Le bilan thermique qui donne le comportement thermique du capteur et qui nous permet de prédire la température au niveau de chaque couche est donné par le système d'équations différentielles ci-dessous :

❖ Capteur solaire hybride PVT :

<ul style="list-style-type: none"> • $M_v C_{p_v} \frac{dT_{v2}}{dt} = S [G \cdot \alpha_v + h_{r,v2-\text{ciel}} \cdot (T_{\text{ciel}} - T_{v2}) + h_{r,v2-v1} \cdot (T_{v1} - T_{v2}) - h_{v,v2-f2} (T_{v2} - T_{f2}) + h_{v,a-v2} (T_a - T_{v2})]$
<ul style="list-style-type: none"> • $T_{f2,s} = \left[\left(T_{f,e} - \frac{(T_{v1} h_{v,f2-v1} + T_{v2} h_{v,f2-v2})}{(h_{v,f2-v1} + h_{v,f2-v2})} \right) \cdot e^{\frac{S \cdot (h_{v,f2-v1} + h_{v,f2-v2})}{\dot{m}_{f2} C_{p_{f2}}}} + \frac{(T_{v1} h_{v,f2-v1} + T_{v2} h_{v,f2-v2})}{(h_{v,f2-v1} + h_{v,f2-v2})} \right]$ • $T_{f2,\text{moy}}(x) = \left[\left(\frac{(T_{v1} h_{v,f2-v1} + T_{v2} h_{v,f2-v2})}{(h_{v,f2-v1} + h_{v,f2-v2})} - T_{f,e} \right) \cdot e^{\frac{S \cdot (h_{v,f2-v1} + h_{v,f2-v2})}{\dot{m}_{f2} C_{p_{f2}}}} + \frac{(T_{v1} h_{v,f2-v1} + T_{v2} h_{v,f2-v2})}{(h_{v,f2-v1} + h_{v,f2-v2})} \right]$
<ul style="list-style-type: none"> • $M_c C_{p_c} \frac{dT_c}{dt} = \tau_v^2 \cdot \alpha_c \cdot G \cdot \beta - h_{c,c-v1} \cdot S \cdot (T_c - T_{v1}) - h_{c,c-t} \cdot S \cdot (T_c - T_t) - \tau_v \cdot G \cdot S \cdot \eta_{\text{éle,ref}} \left[1 - \beta_T (T_c - T_{c,\text{ref}}) + \delta \ln \left(\frac{G}{G_{\text{ref}}} \right) \right]$
<ul style="list-style-type: none"> • $M_t C_t \frac{dT_t}{dt} = \tau_v^2 \cdot \alpha_t \cdot G \cdot S \cdot (1 - \beta) + h_{c,c-t} \cdot S \cdot (T_c - T_t) - h_{v,f1-t} \cdot S \cdot (T_t - T_f) - h_{r,p-t} \cdot S \cdot (T_t - T_p)$
<ul style="list-style-type: none"> • $T_{f1,s}(x) = \left[\left(T_{f,e} - \frac{(T_t h_{v,f1-t} + T_p h_{v,f1-p})}{(h_{v,f1-t} + h_{v,f1-p})} \right) \cdot e^{\frac{S \cdot (h_{v,f1-t} + h_{v,f1-p})}{\dot{m}_{f1} C_{p_{f1}}}} + \frac{(T_t h_{v,f1-t} + T_p h_{v,f1-p})}{(h_{v,f1-t} + h_{v,f1-p})} \right]$ • $T_{f1,\text{moy}}(x) = \left[\left(\frac{(T_t h_{v,f1-t} + T_p h_{v,f1-p})}{(h_{v,f1-t} + h_{v,f1-p})} - T_{f,e} \right) \cdot e^{\frac{S \cdot (h_{v,f1-t} + h_{v,f1-p})}{\dot{m}_{f1} C_{p_{f1}}}} + \frac{(T_t h_{v,f1-t} + T_p h_{v,f1-p})}{(h_{v,f1-t} + h_{v,f1-p})} \right]$ •
<ul style="list-style-type: none"> • $M_p C_{p_p} \frac{dT_p}{dt} = S [h_{c,p-i} (T_i - T_p) - h_{v,f1-p} (T_p - T_{f1}) - h_{r,p-t} (T_p - T_t)]$
<ul style="list-style-type: none"> • $M_i C_{p_i} \frac{dT_i}{dt} = S [h_{c,i-p} (T_p - T_i) - h_{v,a-i} (T_i - T_a) - h_{r,t-s} (T_i - T_s)]$

❖ **Capteur thermique bi-fluide :**

<ul style="list-style-type: none"> • $m_v C_{p_v} \frac{dT_v}{dt} = \alpha_v G A_v + A_v h_{v,v-amb} (T_{amb} - T_v) + A_v h_{v,v-air1} (T_v - T_{air1}) + A_v h_{r,v-ciel} (T_{ciel} - T_v) + A_s h_{r,s-v} (T_s - T_v) + A_{ab} h_{r,a-v} (T_a - T_v)$
<ul style="list-style-type: none"> • $T_{air1}(L) = \left(T_{air1 e} + \frac{-\frac{l_{ab}}{\epsilon} h_{v,air1-a} - \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} - l_{h,v,v-air1}}{\frac{l_{ab}}{\epsilon} h_{v,air1-a} T_{ab} + \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} T_s + l_{h,v,v-air1} T_v} \right) \times e^{-\frac{l_{ab}}{\epsilon} h_{v,air1-a} - \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} - l_{h,v,v-air1} L} + \frac{\frac{l_{ab}}{\epsilon} h_{v,air1-a} T_{ab} + \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} T_s + l_{h,v,v-air1} T_v}{\frac{l_{ab}}{\epsilon} h_{v,air1-a} + \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} + l_{h,v,v-air1}}$ • $T_{air1 moy} = \frac{M_{air1} C_{p_{air}}}{\left(\frac{l_{ab}}{\epsilon} h_{v,air1-a} T_{ab} + \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} T_s + l_{h,v,v-air1} T_v \right) L} \left(T_{air1 e} + \frac{-\frac{l_{ab}}{\epsilon} h_{v,air1-a} - \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} - l_{h,v,v-air1}}{\frac{l_{ab}}{\epsilon} h_{v,air1-a} T_{ab} + \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} T_s + l_{h,v,v-air1} T_v} \right) \times \left(e^{-\frac{l_{ab}}{\epsilon} h_{v,air1-a} - \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} - l_{h,v,v-air1} L} - 1 \right) + \frac{\frac{l_{ab}}{\epsilon} h_{v,air1-a} T_{ab} + \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} T_s + l_{h,v,v-air1} T_v}{\frac{l_{ab}}{\epsilon} h_{v,air1-a} + \frac{l_s}{\epsilon} h_{v,s-air1} + l_{h,v,v-air1}} L$
<ul style="list-style-type: none"> • $m_s C_{p_s} \frac{dT_s}{dt} = A_{s1} \cdot h_{r,s-v} (T_v - T_s) + A_{s,ext} \cdot h_{v,s-air1} (T_{air1} - T_s) + A_{s,int} \cdot h_{v,s-eau} (T_{eau} - T_s) + A_{s,ext} \cdot h_{c,s-ab} (T_{ab} - T_s)$
<ul style="list-style-type: none"> • $m_{ab} C_{p_{ab}} \frac{dT_{ab}}{dt} = A_{ab} h_{r,a-v} (T_a - T_v) + A_{ab} h_{v,air1-a} (T_{ab} - T_{air1}) + A_{ab} \cdot h_{ab-air2} (T_{air2} - T_{ab}) + A_{s,ext} \cdot h_{c,s-ab} (T_{ab} - T_s) + A_{ab} \cdot h_{r,p-ab} (T_p - T_{ab})$
<ul style="list-style-type: none"> • $T_{eau moy} = \frac{-1}{\frac{2\pi R_{t,int} h_{v,s-eau} l_s}{m_{eau} C_{p_{eau}}}} (T_{eau,e} - T_s) \cdot \left(e^{-\frac{2\pi R_{t,int} h_{v,s-eau} l_s}{m_{eau} C_{p_{eau}}}} - 1 \right) + T_s l_s$
<ul style="list-style-type: none"> • $T_{air2}(L) = \left(T_{air2 e} - \frac{\frac{l_{ab}}{\epsilon} h_{v,ab-air2} \cdot T_{ab} + l_p \cdot h_{v,p-air2} \cdot T_p}{\frac{l_{ab}}{\epsilon} h_{v,ab-air2} - l_p \cdot h_{v,p-air2}} \right) \cdot e^{-\frac{l_{ab}}{\epsilon} h_{v,ab-air2} - l_p \cdot h_{v,p-air2} L} + \frac{\frac{l_{ab}}{\epsilon} h_{v,ab-air2} \cdot T_{ab} + l_p \cdot h_{v,p-air2} \cdot T_p}{\frac{l_{ab}}{\epsilon} h_{v,ab-air2} - l_p \cdot h_{v,p-air2}}$ • $T_{air2,moy}(L) = \frac{-M_{air2} C_{p_{air}}}{\left(\frac{l_{ab}}{\epsilon} h_{v,ab-air2} - l_p \cdot h_{v,p-air2} \right) L} \left(T_{air2 e} - \frac{\frac{l_{ab}}{\epsilon} h_{v,ab-air2} \cdot T_{ab} + l_p \cdot h_{v,p-air2} \cdot T_p}{\frac{l_{ab}}{\epsilon} h_{v,ab-air2} - l_p \cdot h_{v,p-air2}} \right) \times \left(e^{-\frac{l_{ab}}{\epsilon} h_{v,ab-air2} - l_p \cdot h_{v,p-air2} L} - 1 \right) + \frac{\frac{l_{ab}}{\epsilon} h_{v,ab-air2} \cdot T_{ab} + l_p \cdot h_{v,p-air2} \cdot T_p}{\frac{l_{ab}}{\epsilon} h_{v,ab-air2} - l_p \cdot h_{v,p-air2}} L$
<ul style="list-style-type: none"> • $m_p C_{p_p} \frac{dT_p}{dt} = A_p \cdot h_{c,p-i} (T_i - T_p) + A_p \cdot h_{r,p-ab} (T_{ab} - T_p) + A_p \cdot h_{v,p-air2} (T_{air2} - T_p)$
<ul style="list-style-type: none"> • $m_i C_{p_i} \frac{dT_i}{dt} = A_p \cdot h_{c,p-i} (T_p - T_i) + A_i \cdot h_{r,i-sol} (T_{sol} - T_i) + A_i \cdot h_{v,i-amb} (T_{amb} - T_i)$

❖ ballon de stockage :

$$\bullet M_{\text{eau}} C_{p_{\text{eau}}} \frac{dT_{\text{eau}}}{dt} = A_{t1} \cdot h_{v,t1-\text{eau}} (T_{t1} - T_{\text{eau}}) + A_{t2} \cdot h_{v,t2-\text{eau}} (T_{t2} - T_{\text{eau}}) + A_{c,\text{int}} \cdot h_{c,\text{eau-ci}} (T_{\text{ci}} - T_{\text{eau}})$$

$$\bullet m_{t1} C_{p_{t1}} \frac{dT_{t1}}{dt} = A_{t1} h_{r,\text{ciel-t}} (T_{\text{ciel}} - T_{t1}) + A_{t1} h_{v,t1-\text{amb}} (T_{\text{amb}} - T_{t1}) + A_{t1} h_{v,t1-\text{eau,ch}} (T_{\text{eau,ch}} - T_{t1})$$

$$\bullet M_{\text{eau,ch}} C_{p_{\text{eau}}} \frac{dT_{\text{eau,ch}}}{dt} = A_{t1} h_{v,t1-\text{eau,ch}} (T_{t1} - T_{\text{eau,ch}})$$

$$\bullet m_{t2} C_{p_{t2}} \frac{dT_{t2}}{dt} = A_{t2} h_{r,\text{ciel-t2}} (T_{\text{ciel}} - T_{t2}) + A_{t2} h_{v,t2-\text{amb}} (T_{\text{amb}} - T_{t2}) + A_{t2} h_{v,t2-\text{eau,f}} (T_{\text{eau,f}} - T_{t2})$$

$$\bullet M_{\text{eau,f}} C_{p_{\text{eau}}} \frac{dT_{\text{eau,f}}}{dt} = A_{t2} h_{v,t2-\text{eau,f}} (T_{t2} - T_{\text{eau,f}})$$

ANNEXE 'B' : Partie du programme de simulation numérique

« The inputs » et « Outputs » de programme simulation de capteur hybride PV-T :The inputs

```

%1-1 Géométrie du capteur :
N=1 ; % nombre des module connectés en série
L=N*1.28 ; % Longueur du capteur [m]
l= 0.32 ; % Largeur du capteur [m]
ef= 0.02 ; % Epaisseur de la veine de passage du fluide [m]
S=l*ef ;
Scap=L*l ; % Surface de captation
Beta=36.8 ;
  %2 Propriétés physiques du capteur :
  % 2-1 Couche du verre
  ev=0.88 ; % Emissivité du verre
  tov=0.95 ; % Transmittivité du verre
  refv=0.1 ; % Réflectivité du verre
  av=0.06 ; % Absorptivité du verre
  Cpv=500 ; % Chaleur spécifique du verre
  rov=2530 ; % la masse volumique du verre
  epv=0.0032 ; % Epaisseur du verre
  kv=1 ; %conductivité thermique du verre
  %2-2 Cellules Photovoltaïque
  acv=0.85 ; % Absorptivité des cellules photovoltaïques
  ecv=0.95 ; % Emissivité des cellules photovoltaïques
  Cpc=677 ; % Chaleur spécifique des cellules photovoltaïques
  roc=2702 ; % masse volumique de cellules
  kc=0.036 ; % Conductivité thermique des cellules photovoltaïques
  r=0.83 ; % Taux de remplissage des cellules photovoltaïques sur le Module
  epc=0.0003 ; % Epaisseur de la couche de cellules photovoltaïque
  % 2-3 Couche du Tedlar :
  et=0.87 ; % Emissivité du Tedlar
  ept=0.0005 ; % Epaisseur
  at=0.5 ; % absorptivité du Tedlar
  Cpt=1250 ; % chaleur spécifique de Tedlar
  rot=1200 ; % masse volumique de tedlar
  kt=0.033 ; % Conductivité thermique de la couche
  %2-4 plaque métallique
  ep=0.25 ; % Emissivité du Tedlar
  epp=0.001 ; % Epaisseur de la plaque
  ap=0.95 ; % absorptivité de la plaque
  Cpp=52 ; % chaleur spécifique de la plaque
  rop=2700 ; % masse volumique de la plaque
  kp=250 ; % Conductivité thermique de la plaque
  % 2-4 Isolation
  % Bois
  epi=0.05 ; % Epaisseur du bois [m]
  Cpi=2310 ; % Chaleur spécifique du bois
  roi=700 ; % masse volumique
  ki=0.035 ; % Conductivité thermique de l'isolant

```

```

ei=0.1 ; % Emissivité du bois% 3 CONSTANTES ET VALEURS DE REFERENCES
% paramètres électriques de référence
Pmax_ref=50*N ;
Vmax_ref=17.5*N ;
Imax_ref=2.9 ;
Vco_ref=21.6*N;
Isc_ref=3.18;
%bitta_V=-0.0017;
bitta_V=-0.0034;
%bitta_I=0.0045;
  bitta_I=0.0009 ;
Rs=0.25 ;
aref=1.017 ;

stf=5.67e-8 ; % Constante de Stefan Boltzmann
Tcref=25+273.15 ; % Température de référence
Gref=1000 ; %l'éclairement de référence
Gnoct=800 ;
NOCT=47;
B=0.0045 ;
seg=0.12;
a2=0.052;
rdr=0.12 ;
Cf=0.36;
dt=300;
alpha=tov*(acv*r+at*(1-r)-acv*r*rdr);
Albedo=0.2 ;
Vfinf=0.72 ;
Vfsup=0.41 ;

                                     % les masses

Mv=rov*Scap*epv ;
Mc=roc*r*Scap*epc ;
Mt=rot*Scap*ept ;
Mi=roi*Scap*epi ;
Mp=rop*Scap*epv ;

```

Outputs

```

figure(1)
plot(t,Tac,t,Tv1c,t,Tfsupc,t,Tfinfc,t,Tpc,t,Tvc,t,Tcc,t,Ttc)
xlabel('Time (hr)')
ylabel('Temperature (°C)')
  grid on
  hold all
  figure(2)
plot(t,Tfsupsc,t,Tfinfsc)
xlabel('Temps (h)')
ylabel('Température (°C)')
  figure(3)
plot(t,Tcc)
xlabel('Time (h)')
ylabel('Solar cell temperature(°C)')

```

```
hold all
figure(4)
plot(t,rdelec)
xlabel('Temps (h)')
ylabel('Rendement électrique (%)')
grid on
hold all
figure(5)
plot(t,rdther)
xlabel('Temps (h)')
ylabel('Rendement thermique (%)')
hold all
figure(6)
plot(t,rdglob)
xlabel('Temps (h)')
ylabel('Rendement global (%)')
hold all
figure(7)
plot(t,Quelecl)
xlabel('Temps (h)')
ylabel('Puissance Electrique(W)')
grid on
hold all
figure(8)
plot(t,Quther)
xlabel('Temps (h)')
ylabel('Puissance Thermique(W)')
hold all
figure(9)
plot(t,Vcol)
xlabel('Temps (h)')
ylabel('Tension de circuit ouvert(V)')
grid on
hold all
figure(10)
plot(t,Vmax)
xlabel('Temps (h)')
ylabel('Tension au MPP(V)')
grid on
hold all
figure(11)
plot(t,Isc)
xlabel('Temps (h)')
ylabel('Courant de court circuit (A)')
grid on
hold all
figure(12)
plot(t,Imax)
xlabel('Temps (h)')
ylabel('Courant au MPP (A)')
grid on
hold all
```

« The inputs » et « Outputs » de programme simulation de thermique bi-fluide :

The inputs	
<pre> %1-1 Géométrie du capteur : clc clear all Lc=1.41; lc=0.27; epc=0.145; bita=28; Lab=1.375; lab=0.29; epab=0.002; eab=0.87; aab=0.95; Cpp=897; rop=2700; Kp=250; Lv=1.375; lv=0.395; epv=0.004; ev=0.93; tov=0.84; av=0.06; Cpv=500; rov=2530; kv=1; Nt=21; lt=0.34; ls=8.305; Dext=0.015; Dint=0.014; as=0.95; es=0.87; ros=8920; Cps=385; ks=390; Lp=1.375; lp=0.395; epp=0.003; ep=0.87; rop=2700; ap=0.95; Cpp=897; kp=250; </pre>	<pre> %%propriétés géométrique%% %%l'absorbeur%% %%%vitrage%% %%serpentine%% %%%plaque métallique%% %%isolation%% </pre>

```

%%bois%%
Lisb=1.375;
lisb=0.395;
episb=0.015;
Cpi=2310;
roi=700;
ki=0.05;
%%polystyrène%%
Lisp=1.375;
lisp=0.395;
episp=0.02;
eisp=0.962;

%%paramètres de référence%%

dt=5/60;
stf=5.67e-8;
g=9.81;

%% les surfaces%%

S1=0.05*lt;
Sv=Lv*lv;
Sps=(S1*(Nt+1));
Svt=Dext*ls;
Sat=pi*(Dext/2)*ls;
Stp=pi*(Dext/2)*ls;
Ste=2*pi*(Dint/2)*ls;
Saba1=(pi*ls*(Dext/2)+S1*(Nt+1));
Saba2=S1*(Nt+1);
Spma=Lp*lp;
r=(Spma/Saba1);
Sis=Lisb*lisb;
Sabp=Lab*lab;

%%propriétés de l'air%%

Cpf=1006.43;
rof=1.177;
kf=0.0262;
vis_f=1.85*10^-5;
Vfsup=0.42;
Vfinf=0.72;
ef=0.02;

%%propriété de l'eau%%

roe=998.2;
Cpe=4182;
ke=0.6;
vis_e=1.003*10^-3;

%%calcul les masses%%

Mv=rov*Sv*epv;
Mab=rop*Sps*epab;
Ms=(ros.*((pi*(Dext^2/4)-(pi*(Dint)^2/4))*ls));
Mpm=rop*Spma*ep;
Mis=roi*Sis*episp;

```


Outputs

```

figure(1)
plot(t,Tvc,t,Tpmc,t,Tabc,t,Ttubc)
xlabel('Time (hr)')
ylabel('Temperature (°C)')
grid on
hold all
figure(2)
plot(t,Tairsupsc,t,Tac,t,Tairinfsc)
xlabel('Time (hr)')
ylabel('Temperature (°C)')
hold all
figure(3)
plot(t,Teausc,t,Teauec)
xlabel('Time (hr)')
ylabel('Temperature (°C)')

figure(21)
plot(t,rend)
xlabel('Time (hr)')
ylabel('rendement thermique')

figure(4)
plot(t,rdther_glo)
xlabel('Temps (h)')
ylabel('Rendement thermique global(%)')

figure(5)
plot(t,Quther2_inf)
xlabel('Temps (h)')
ylabel('Puissance thermique(W)')

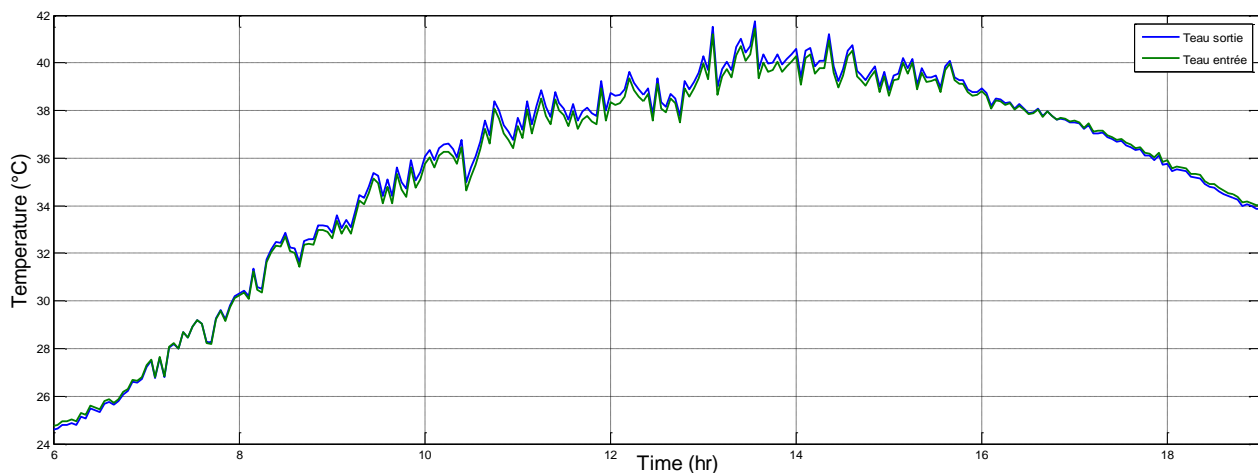
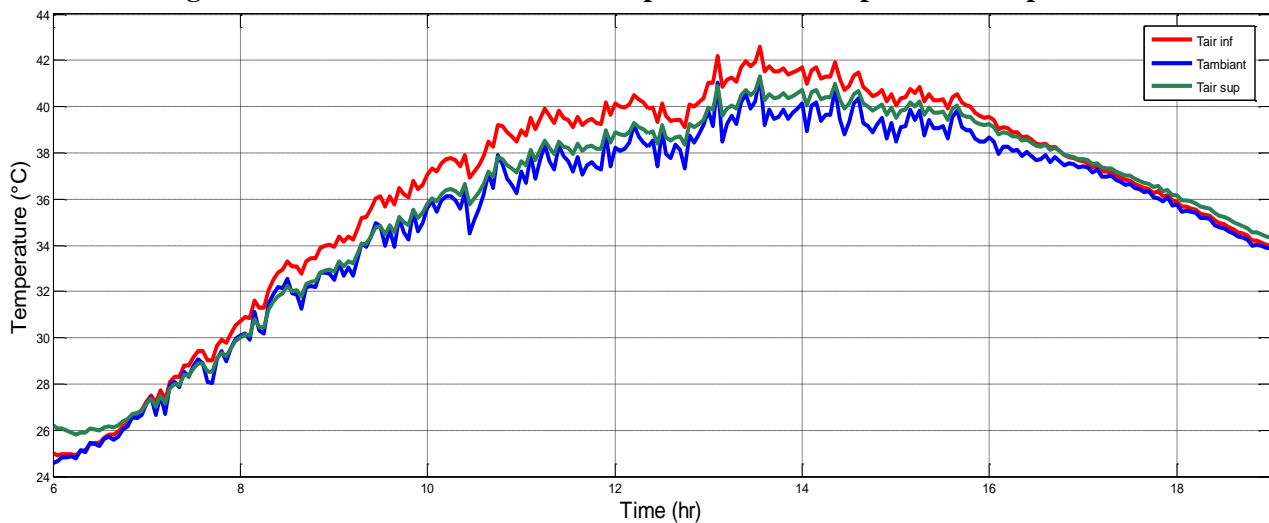
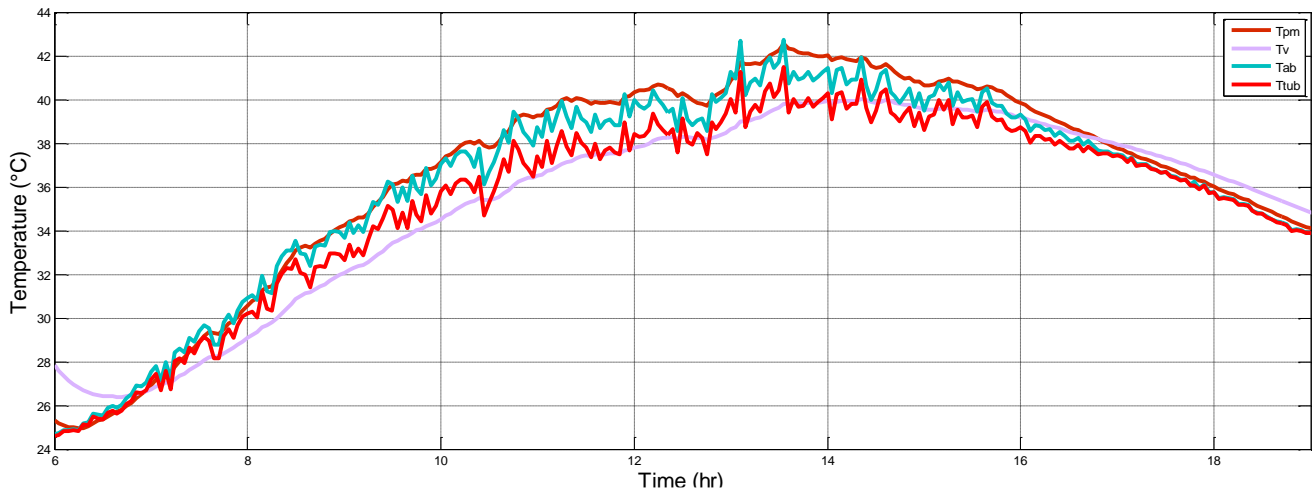
figure(6)
plot(t,Quther2_sup)
xlabel('Temps (h)')
ylabel('Puissance thermique(W)')
grid on
hold all
figure(8)
plot(t,Quther1)
xlabel('Temps (h)')
ylabel('Puissance Thermique(W)')
hold all
figure(7)
plot(t,Quther_glo)
xlabel('Temps (h)')
ylabel('Puissance Thermique global(W)')

```

ANNEXE 'C' : la Suite des résultats

C.1. Capteur thermique bi-fluide simple :

Les résultats numérique d'un capteur thermique bi-fluide individuel c.-à-d. la température d'air entrée est la température ambiante $T_{\text{entrée}} = T_{\text{ambiant}}$.



- **Analyse comparative :**

On note que les températures des composants et des fluides dans le capteur thermique combiné sont généralement plus élevées que celles du capteur thermique simple. (chapitre V 'figures 21,22,23').

- Concernant les températures des composants du capteur : la température la plus élevée possible dans le capteur indépendant est la température de la plaque métallique de séparation ne dépassant pas 42 ° C, alors qu'elle atteint 55 ° C dans le capteur combiné.
- Quant à la température de l'air dans les deux canaux, la valeur la plus élevée dans le capteur indépendant est la température de l'air du canal inférieure d'environ 42 ° C, alors qu'elle atteint 48 ° C dans le capteur combiné.
- pour l'eau : on remarque qu'elle chauffe dans le capteur combiné plus que le capteur thermique indépendant.



Journée sur les **Stratégies**
De la Transition **Énergétique**
(JSTE'2020)

Republique Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Ahmed DRAIA Adrar-Algérie

Faculté des Sciences et de la Technologie

Laboratoire de Développement Durable et

Informatique (LDDI)



Journée sur les **Stratégies**
De la Transition **Énergétique**
(JSTE'2020)

*Journée sur les **Stratégies** de la **Transition Énergétique***
JSTE'2020, 12 Mars 2020

Attestation de Participation

Le comité scientifique de la 1^{ère} Journée sur les Stratégies de la Transition Énergétique (JSTE'2020) atteste que :

Melle Z. BENZID a participé à cet événement scientifique par une communication intitulée :

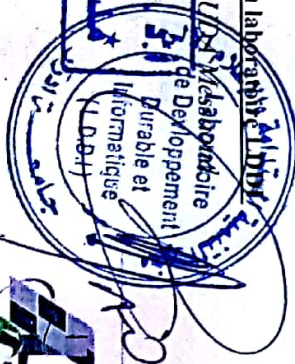
Etude expérimentale et numérique d'un système solaire hybride combiné photovoltaïque thermique

Co-auteurs : **Z. SLIMANI**

Directeur du laboratoire

Pr. **HAMOU**

de Développement Durable et Informatique



BP 124 Targuimie-Angroun-Adrar
Tel : +213 49 908 431 Fax : +213 49 908 190
Email : sb.en.boudi@univ-adrar.dz - fb.en@fbconstruction.dz

Dr. **OUDRANE Abdelatif**
Maître de Conférences des Universités
Université Ahmed Draïa d'Adrar
Faculté des Sciences et de la Technologie
Laboratoire de Développement Durable et Informatique





Journée sur les Stratégies De la Transition Énergétique (JSTE'2020)

Laboratoire de Développement Durable et Informatique (LDDDI)

(LDDDI)

Journée sur les Stratégies De la Transition Énergétique (JSTE'2020)



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Ahmed DRAIA Adrar - Algérie

Faculté des Sciences et de la Technologie

Journée sur les Stratégies de la Transition Énergétique
 JSTE'2020, 12 Mars 2020

Best Paper Award

C'est certifier que :

Slimani Zahia et Benzid zohra

Ont reçu le prix du meilleur article intitulé :

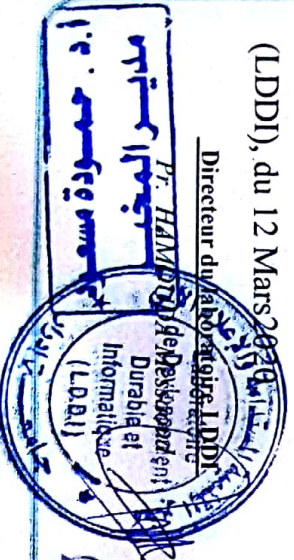
Etude expérimentale et numérique d'un système solaire hybride combiné photovoltaïque thermique.

Présenté à :

Journée sur les Stratégies de la Transition Énergétique 'JSTE'2020, au Laboratoire de Développement Durable et Informatique (LDDDI), du 12 Mars 2020

Directeur du Laboratoire LDDDI

Présidentant de la journée JSTE'2020
 Dr. OUDRANE Abdellatif



FB Construction & Services
 BP 124 Tigherghine-Angin - Adrar
 Tel : +213 49 908 431 Fax : +213 49 908 190
 Email : fb.construction@orange.dz - fb.construction@orange.dz



Journée sur les Stratégies De la Transition Énergétique (JSTE'2020)

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Ahmed DRAÏA Adrar-Algérie

Faculté des Sciences et de la Technologie

Laboratoire de Développement Durable et Informatique (LDDI)

Informatique (LDDI)



Journée sur les Stratégies De la Transition Énergétique (JSTE'2020)



Journée sur les Stratégies de la Transition Énergétique
JSTE'2020, 12 Mars 2020

Attestation de Participation

Le comité scientifique de la 1^{ère} Journée sur les Stratégies de la Transition Énergétique (JSTE'2020) atteste que :

Melle **Z. SLIMANI** a participé à cet événement scientifique par une communication intitulée :

Etude expérimentale et numérique d'un système solaire hybride combiné photovoltaïque thermique

Co-auteurs : **Z. BENZID**

Directeur du Laboratoire LDDI

Pr

A. MOUDDA
Directeur
Lab. Dev. de l'Énergie

أ. د. حسودة مسعود
مدير المختبر



Z. SLIMANI
Président de la Journée sur les Stratégies de la Transition Énergétique (JSTE'2020)

Président de la Journée sur les Stratégies de la Transition Énergétique (JSTE'2020)
Faculté des Sciences et Technologies
Université Ahmed Draïa d'Adrar



FB Construction & Services
BP 133 Tamphamne-Aououn-Adrar
Tél : +213 49 908 431 Fax : +213 49 904 190
Email: fb@fbcs.com.dz - fb@fbcs.adrar.dz