

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –



THESE

Présentée pour l'obtention du **grade de DOCTORAT 3^{ème} Cycle**

En : Génie mécanique

Spécialité : Energétique et thermique appliquée

Par : DJELAILI Abdelbaqi

Sujet

***Etude des performances de la ventilation naturelle
d'un habitat passif avec une paroi solaire hybride***

Jury de soutenance :

SELADJI Chakib	Professeur	UAB Tlemcen	Président
KORTI Abdel Illah Nabil	Professeur	UAB Tlemcen	Directeur de thèse
AZZI Ahmed	MCA	UAB Tlemcen	Examineur 1
BOUKLI HASSENE Fouad	MCA	ESSA TLEMCEEN	Examineur 2

Le présent travail a été effectué à l'université de Tlemcen, faculté de technologie département de génie Mécanique, laboratoire ETAP.

Louange à Allah de m'avoir guidé vers le bon chemin de la lumière et du savoir.

Je tiens à remercier vivement mon directeur de recherche, le professeur KORTI Abdel ILLAH Nabil, pour avoir dirigé ce travail et pour ses enseignements très enrichissants.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à mes parents pour leur sacrifice et soutien inestimables durant toutes mes études.

J'exprime ma reconnaissance à tous les membres de jury d'avoir accepté de lire ce travail et d'apporter les critiques nécessaires à la mise en forme finale de cette thèse.

Enfin, mes remerciements vont aussi à tous mes amis de ma vie et mes collègues de laboratoire ETAP, comme je remercie tous ceux qui ont aidés de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Résumé

Les bâtiments consomment une bonne partie de l'énergie produite sur notre planète. Le mur solaire hybride a été conçu afin de réduire cette consommation d'énergie. Cependant, ce système peut être plus performant si on procède à son optimisation. Le but de cette étude est d'élaborer un modèle numérique d'un mur solaire hybride intégré à un modèle d'une chambre afin d'étudier l'effet engendré sur celle-ci. De plus, dans cette thèse nous présentons les résultats d'une étude numérique tridimensionnelle d'une chambre chauffée passivement à l'aide d'un mur solaire hybride. Les résultats obtenus montrent que pour un rayonnement solaire maximal de 470 W/m^2 , l'efficacité de la conversion électrique et la température moyenne de l'air intérieur de la chambre peuvent atteindre 12.54 % et $28 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivement. On a étudié aussi l'effet de la subdivision de la serre de la paroi solaire hybride en plusieurs parties sur le comportement thermique de la chambre. Les résultats obtenus montrent que la fenêtre a un impact non négligeable et elle participe considérablement dans le chauffage passif d'air.

Mots-clés : Ventilation naturelle, mur solaire, cellule photovoltaïque.

Abstract

Actually building designers have to think about new strategies to achieve the best sustainable building designs. Well-planned passive heating strategies in building design may reduce significantly building's energy consumption. In this, paper a proposed design of south façade of a room by integrating a hybrid solar wall and a window in case to heat passively a room is studied. The simulations for three-dimensional model of BIPV Trombe wall system have been carried out for December 10th. The temperature and velocity distribution of indoor air in different position inside the room are obtained from the simulation results. The obtained results show that the temperature difference between the inlet and the outlet of the solar wall can reach 9°C. The 3D analysis of the proposed model show clearly that the window's thermal effect on the passive heating can't be neglected. Mean-while, the daily electrical efficiency conversion and average indoor air temperature of this system can reach 12.54% and 28°C respectively for maximum solar radiation of 470 W/m². We also studied the effect of the subdivision of the greenhouse of the hybrid solar wall into several parts on the thermal behavior of the room. The results obtained show that the window has a non-negligible impact and it participates considerably in passive air heating.

Keywords: natural ventilation, Trombe wall, photovoltaïque cells, hybrid solar wall

المخلص

في الواقع يجب على المهندسين المعماريين التفكير في استراتيجيات جديدة لتحقيق أفضل تصاميم المباني المستدامة. استراتيجيات التسخين السلبي في المباني قد تقلل بشكل كبير من استهلاك الطاقة للمبنى. في هذا، تمت دراسة تصميم مقترح للواجهة الجنوبية للغرفة من خلال دمج جدار شمسي هجين ونافذة بهدف التسخين السلبي للغرفة. الهدف من هذه الرسالة هو تحليل نتائج النموذج ثلاثي الأبعاد لغرفة مرفقة بمستقبل شمسي هجين. تمكنا النتائج من الحصول على درجة الحرارة وسرعة توزيع الهواء الداخلي في مواقع مختلفة داخل الغرفة. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن الفرق في درجة الحرارة بين المدخل ومخرج الجدار الشمسي يمكن أن يصل إلى 9 درجات مئوية. يوضح التحليل ثلاثي الأبعاد للنموذج المقترح بوضوح أنه لا يمكن إهمال التأثير الحراري للنافذة على التسخين السلبي. وفي الوقت نفسه، يمكن أن يصل تحويل الكفاءة الكهربائية ومتوسط درجة حرارة الهواء الداخلي باعتماد الجدار الشمسي إلى 12.54% و 28 درجة مئوية على التوالي مع إشعاع شمسي يبلغ 470 واط / متر مربع.

الكلمات المفتاحية: التهوية الطبيعية، جدار trombe، الخلايا الكهروضوئية، الجدار الشمسي الهجين

Liste des abréviations

<i>Unités physiques</i>		
<i>Lettres grecques</i>		
α	Coefficient d'absorbions	
ε	Emissivité	
τ	Coefficient de transmission	
β	Coefficient de dilatation thermique	[s ⁻¹]
λ	Conductivité thermique,	[W/m.K]
ρ	Densité,	[kg/m ³]
μ	Viscosité dynamique	[Pa.s]
η_c	Efficacité de conversion des cellules photovoltaïque	%
<i>Symboles</i>		
C_p	Chaleur spécifique de fluide caloporteur,	[J/kg.K]
g	L'accélération gravitationnelle	[m/s ²]
H	Enthalpie spécifique	[J/kg]
I	L'intensité du courant électrique	[A]
P	Pression	[Pa]
Q	Quantité d'énergie	J
S_h	Terme source dans l'équation de l'énergie,	[J/m ³ .s]
S_x	Terme source dans l'équation du mouvement, le long de l'axe x,	[kg/m ² .s ²]
S_y	Terme source dans l'équation du mouvement, le long de l'axe y,	[kg/m ² .s ²]
S_z	Terme source dans l'équation du mouvement, le long de l'axe z,	[kg/m ² .s ²]
T	Température,	[K]
t	Temps,	[s]
T_{amb}	Température ambiante,ù2	[K]

Liste d'abréviation

U	La tension du courant électrique	[V]
<i>u</i>	Vecteur vitesse composant dans <i>x</i> -direction,	[m/s]
<i>v</i>	Vecteur vitesse composant dans <i>y</i> -direction,	[m/s]
<i>w</i>	Vecteur vitesse composant dans <i>z</i> -direction,	[m/s]

Chapitre 01 : Introduction générale et description du concept

1.1. Contexte énergétique :	2
1.2. Introduction au problème.....	4
1.3. Description des capteurs solaires.....	6
1.3.1 Panneau photovoltaïque :	6
1.3.2. Capteurs solaires thermiques :	8
1.3.3. Capteurs solaires hybrides	9

Chapitre 02 : Synthèse bibliographique

2.1. Capteurs solaires thermique et hybrides.....	13
2.2. Les capteurs solaires hybrides PVT plan :	21
2.2.1. Les capteurs solaires hybrides PVT à eau :	21
2.2.2. Les capteurs solaires hybrides PVT à air	25
2.2. 3. Les capteurs solaires hybrides PVT bi-fluide	30
2.3. Capteur solaire hybride à concentration CPVT.....	31
2.4. Les capteurs solaires PV avec MCP (PV-MCP)	33
2.5. Les capteurs solaires hybrides avec un MCP (PVT-MCP).....	35
2.6 Modèles mathématiques pour calculer les performances d'un capteur solaire hybride :	37
2.6.1. Calcul du débit massique de l'air :	37
Calcul de la puissance utile :	37
Calcul de rendement thermique.....	38
Puissance électrique :	38
Calcul du rendement électrique :	38
2.7. Objectif de la thèse :	38

Chapitre 03 : Rayonnement solaire

3.2. Trajectoire apparente du soleil dans l'espace local et rayonnement extraterrestre	41
3.2.1. Les systèmes de coordonnées	41
a. Le système de coordonnées horizontales.....	42
b. Système de coordonnées équatoriales.....	42
3.3. Le rayonnement à la surface de la terre.....	43
3.3.1. Le rayonnement électromagnétique du soleil.....	44

3.3.2. Les rayonnements directs, diffus et global	44
3.3.3. Les normes pour l'application et l'exploitation des données météorologiques pour le PV :	45
a. La mesure d'éclairement	46
b. La mesure de température ambiante	46
c. La mesure de vitesse du vent	46
3.4. Cellule photovoltaïque :	46
3.4.1. Le principe de la conversion photovoltaïque	47
3.4.2. Dopage et silicium	48
3.4.3. L'absorption de la lumière dans le matériau	49
3.4.4. Le transfert de l'énergie des photons aux charges électriques :	49
3.5. Différents types de cellules solaires	49
3.5.1. Cellules solaires au silicium	49
3.5.2. Cellules solaires à couche mince :	50
3.5.3. Cellules solaires organiques :	50
3.6. Cellules photovoltaïques semi-transparente :	50
3.7. Solutions pour protéger une cellule solaire :	52
3.8. Système photovoltaïque	52
3.8.1. Avantages et inconvénient	53
a. Avantages :	53
b. Inconvénients	53
3.9. Loi de Beer, épaisseur optique :	54
3.10. Choisir un modèle de rayonnement :	55
3.10.1. Rayonnement externe :	56
3.10.2. Avantages et limites du model DTRM (Direct Transfert Radiation Model) :	56
3.10.3. Avantages et limites du modèle P-1 :	57
3.10.4. Avantages et limites du modèle Rosseland :	57
3.10.5. Avantages et limites du modèle DO (Discrete Ordinate) :	57
3.10.6. Avantages et limites du modèle S2S :	58

Chapitre 04 : Gisement solaire Algérie

4.1 Réseau météorologique Algérien.....	60
4.2. Gisement solaire en Algérie	60
4.2.1. La variation spatio-temporelle de La durée d'insolation	62
4.3. Mesures par télédétection	63
4.3.1. Plates-formes et capteurs.....	65
4.3.2. Caractéristiques des satellites - l'orbite	65
A. Satellites à orbite Géostationnaire	65
B- Satellites à orbite héliosynchrone	66
4.3.3. Traitement numérique des images.....	67
4.4. EUMETSAT	68

Chapitre 05 : Position du problème et modélisation mathématique

5.1. Positionnement du problème :.....	72
5.1.1. Modèle physique	72
5.1.2. Modélisation mathématique :	75
5.1.2.1. Mécanique des fluides :.....	75
5.1.2.2. Equation de conservation de l'énergie :	76
5.1.3. Conditions initiales et aux limites :	79
5.2. Modèle numérique :.....	81
5.2.1. Modélisation numérique du problème :	82
5.2.2. Utilisation du GAMBIT :.....	83
5.2.3. Utilisation du Fluent	86

Chapitre 06 : Résultats et discussions

6.1. Validation du modèle numérique	91
6.2. Résultats et discussions	94
6.2.1. Paroi solaire hybride simple (sans séparation) :	94

6.2.2. Paroi solaire hybride avec séparation :.....	98
6.2.3. L'impact de la paroi solaire hybride dans la période d'été :	106
6.3. Solutions proposés pour la période chaude.....	108

Liste des figures

Chapitre 01 : Introduction générale et description du concept

Figure 1.1 : Exemple de panneaux PV intégrés en toiture en Malaisie.

Figure 1.2 : schéma explicatif d'une paroi solaire hybride.

Figure 1.3 : Principe de fonctionnement du générateur photovoltaïque.

Figure 1.4 : Exemple de panneaux PV non-intégrés au bâti.

Figure 1.5 : Schéma de principe d'un panneau PV connecte au réseau.

Figure 1.6 : Exemple de panneaux PV connectes au réseau et montes sur la toiture d'un bâtiment

Figure 1.7 : Intégration de 900 m² de modules PV Sarnasol sur la toiture (inclinée à 20°) d'une école à Lugano en Suisse (12 branches de 5 modules PV Sarnasol)

Figure 1.8 : Schéma de principe d'un capteur solaire thermique plan.

Figure 1.9 : Exemple de capteurs solaires plans vitres [Bak'05], non vitres [Med'03] et de capteurs solaires à tube sous-vide.

Chapitre 02 : Synthèse bibliographique

Figure 2.1 : Mur trombe.

Figure 2.2 : Description de la cheminée solaire.

Figure 2.3 : Cheminée solaire inclinée.

Figure 2.4 : Schéma fonctionnelle d'un dessiccateur solaire.

Figure 2.5 : Capteur hybride à eau.

Figure 2.6 : Système PVT avec réflecteur

Figure 2.7 : Photo du système PVT à eau

Figure 2.8 : Système PVT et de la plate-forme d'essai extérieure.

Figure 2.9 : Capteur PVT avec ballon de stockage

Figure 2.8 : PVT à air avec et sans vitrage, avec et sans tedlar

Figure 2.9 : Photographie de l'installation expérimentale d'un collecteur d'air hybride PV / T

Figure 2.12 : Systèmes PVT avec circulation d'air

Figure 2.13 : Les différentes configurations étudiées : (a) système conventionnel (b) système avec une feuille de métal (c) système avec ailettes

Figure 2.14 : Section transversale du système PVT

Figure 2.15 : Schéma de la conception de capteur PVT

Figure 2.16 : Capteur solaire PVT à deux fluides et à fonctions superposées

Figure 2.17 : Capteur solaire CPVT

Figure 2.18 : Prototype concentrateur CPVT type ANU

Figure 2.19 : Concentrateur CPVT

Figure 2.20 : Prototype CPVT lors des essais à l'Université de Padoue

Figure 2.21 : Schéma de la configuration expérimentale

Figure 2.22 : Schéma du PV-MCP

Figure 2.23 : Bureau vitré intégré avec le module PV (a) avec MCP, (b) sans MCP

Figure 2.24 : Schéma de principe du système PVT à base d'eau

Figure 2.25 : Schéma de principe du système PVT-MCP à base d'eau

Figure 2.26 : Système PVT-MCP

Chapitre 03 : Rayonnement solaire

Figure 3.1 : Intensité lumineuse par longueur d'onde d'un corps noir à 5780 K en fonction de la longueur d'onde.

Figure 3.2 : Systèmes de coordonnées pour repérer la position apparente du soleil.

Figure 3.3 : Système de coordonnées plan horizontales.

Figure 3.4 : Système de coordonnées équatoriales.

Figure 3.5 : Représentation schématique de la quantité d'atmosphère traversée par les rayons solaires.

Figure 3.6 : Différentes composantes du rayonnement solaire.

Figure 3.7 : Atomes tels que le bore ou le phosphore sont des dopants du silicium.

Figure 3.8 : Section du capteur solaire hybride à eau étudié.

Figure 3.9 : Prototypes I, II, III et IV de capteur solaire PVT à air.

Figure 3.10 : Capteur solaire CPVT.

Chapitre 04 : Gisement solaire Algérie

Figure 4.1 : Réseau pyranométrique (ONM et CDER)..

Figure 4.2 : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel.

Figure 4.3 : Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale Cas d'un ciel totalement clair.

Figure 4.4 : Moyenne des sommes annuelles d'irradiation globale inclinée.

Figure 4.5 : Carte de la durée d'ensoleillement moyen annuel en Heure (1983-2012).

Figure 4.6 : Moyenne annuelle de la durée d'insolation mesurée.

Figure 4.7 : Processus de télédétection.

Figure 4.8 : Satellites à orbite Géostationnaire.

Figure 4.9 : Satellites à orbite héliosynchrone.

Figure 4.10 : Carte satellite METEOSAT.

Figure 4.11 : Le satellite Météosat Second Génération.

Chapitre 05 : Position du problème et modélisation mathématique

Figure 5.1 : Dimension du domaine à étudier en 3 dimensions.

Figure 5.2 : Dimensions adaptées pour le mur solaire hybride.

Figure 5.3 : Schémas du domaine physique : (a) sans séparation, (b) avec séparation.

Figure 5.4 : Evolution du rayonnement solaire pendant une journée dans la ville de TLEMCEM

Figure 5.5 : Volume de contrôle principal (2D).

Figure 5.6 : Géométrie et maillage construit sous GAMBIT.

Figure 5.7 : Indépendance du nombre de nœuds sur l'évolution instationnaire de la température de la cellule photovoltaïque, (a) sans séparation, (b) avec séparation.

Figure 5.8 : Indépendance de pas du temps sur l'évolution de la température de la cellule PV, (a) sans séparation, (b) avec séparation.

Chapitre 06 : Résultats et discussions

Figure 6.1. Géométrie du problème en 2 dimensions.

Figure 6.2 : Validation des résultats.

Figure 6.3 : Evolution de la température à l'entrée et à la sortie de la paroi solaire hybride pendant deux jours successifs.

Figure 6.4 : Distribution de la température dans la chambre (a) 09h , (b)14h.

Figure 6.5 : Dimension du domaine à étudier en 3 dimensions.

Figure 6.6 : Dimensions adaptées pour le mur solaire hybride.

Figure 6.7 : Les contours de la température enregistrés chaque 2 heures ($z = 2.4\text{m}$).

Figure 6.8 : Les contours de la température enregistrés chaque 2 heures ($z=1\text{m}$).

Figure 6.9 : Les contours de la température enregistrés à côté de la cellule photovoltaïque (a) et la fenêtre (b).

Figure 6.10 : distribution de la température à 1, 2 et 3m selon l'axe des absis.

Figure 6.11 : L'évolution de la température à l'entrée et à la sortie du mur solaire hybride.

Figure 6.12 : schémas du model à étudier avec plaques séparatrices.

Figure 6.13 : distribution de la température des parois de la chambre.

Figure 6.14 : Les contours de la température et de la vitesse d'air enregistrés à 13⁰⁰ pour les deux modèles (a) avec plaques séparatrices, (b) sans plaques séparatrices.

Figure 6.15 : L'évolution de la température à l'entrée et à la sortie du mur solaire hybride.

Figure 6.16 : L'évolution de la température d'air ambiant et la température moyenne d'air à l'intérieur de la chambre.

Figure 6.17 : Coefficient d'échange convectif entre la cellule photovoltaïque et l'air dans la cheminée du mur solaire à 14h.

Figure 6.18 : Evolution de coefficient d'échange convectif (H) et le Nu dans le temps.

Figure 6.19 : L'évolution de l'efficacité et la température de cellule photovoltaïque dans les deux modèles (avec et sans séparations).

Figure 6.20 : Distribution de la température de l'air à l'intérieur de la chambre enregistrée à 14 :00.

Figure 6.21 : l'évolution de température de la cellule photovoltaïque et l'efficacité de la conversion électrique.

Figure 6.22 : prototype proposé avec des volets mobiles

Figure 6.23 : Techniques proposées pour éliminer le sur-chauffage durant la période chaude de l'année.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1. Potentiel solaire en Algérie.

Tableau 5.1. Maillages adoptés.

Tableau 5.2 : Facteurs de sous relaxation.

Tableau 5.3 : Critère de convergence sur les résidus.

Tableau 6.1 : Propriétés physiques et optiques des matériaux.

Chapitre 01

Introduction générale et description du concept

1.1. Contexte énergétique :

En raison de l'accroissement de la consommation mondiale d'énergie, notamment dans le domaine du bâtiment, les ressources d'énergies fossiles se réduisent progressivement. Ainsi, les gisements de pétrole brut et de gaz naturel seront pratiquement épuisés avec le temps. De plus, la forte utilisation de combustibles fossiles et de bois est la cause de graves dommages environnementaux et d'un réchauffement climatique au niveau mondial.

Les conséquences économiques des chocs pétroliers des années 1970 ont attiré l'attention sur le problème d'énergie et sur les solutions pouvant être apportées. De plus, elles ont lancé, le développement de la technologie solaire dans de nombreux pays, l'énergie solaire étant une source inépuisable d'approvisionnement en énergie. Ces dernières années, plusieurs pays ont intensifié leurs mesures en faveur de l'utilisation de l'énergie solaire. Ces pays ont notamment institué des taxes environnementales, des programmes de subventions et d'autres incitations en faveur des systèmes liés aux énergies renouvelables. La plupart de ces actions s'inscrivent dans l'objectif général du livre blanc consacré à la politique énergétique de la commission européenne de 1997 (basé sur le protocole de Kyoto de 1990), et visant à porter à hauteur de 12 % la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie primaire de l'union, avant fin 2010 [1].

Depuis 1995 jusqu'en 2006, les surfaces de capteurs solaires thermiques installés annuellement au sein des pays européens sont passées de 640 000 à 3.08 millions de m², soit une surface totale cumulée de 20.4 millions de m². L'Allemagne, la Grèce et l'Autriche représentaient environ 72 % de l'ensemble de ce parc solaire thermique européen en fin 2006 [2]. Les prévisions basées sur la dynamique actuelle du marché des capteurs solaires thermiques estiment que 41.1 % des objectifs du livre blanc sur l'énergie seront atteints en 2010.

Le recours à l'énergie solaire est d'autant plus nécessaire que la consommation d'électricité est en forte croissance. Cependant, la production d'électricité sans source d'énergie fossile est limitée car peu développé ou maîtrisé. Ainsi, se distinguent la pile à combustible dont la production propre d'hydrogène de base est obtenue pour l'instant à partir de méthane et pose des problèmes de transport et de stockage, les éoliennes (aux échelles micro et macro) nécessitant un gisement local de vent, etc.

Énergies renouvelables, efficacité énergétique, intermittence et stockage

En effet, les énergies renouvelables sont parfois critiquées pour leur plus faible efficacité énergétique par rapport aux énergies fossiles. Les coûts de production sont également souvent considérés comme plus élevés à court terme. Mais surtout, elles sont caractérisées par une

disponibilité plus aléatoire : par exemple, le solaire et l'éolien ne produisent pas en permanence de l'électricité. On appelle ce phénomène l'intermittence : une éolienne ne produit que par intermittence, quand il y a du vent. De ce fait, pour être utilisables à grande échelle, les énergies renouvelables intermittentes doivent être accompagnées d'une infrastructure de stockage d'électricité. Autrement dit, il faut être capable de stocker l'énergie que l'on produit en surplus pendant les périodes propices (quand il y a beaucoup de soleil et de vent) afin de la redistribuer pendant les périodes creuses, où la production est basse. Cela implique donc de construire des batteries ou des systèmes de stockage complexes qui nécessitent de nombreuses ressources naturelles et augmentent la pollution liée aux énergies renouvelables

Concernant le photovoltaïque dont la durée de vie est de 30 ans, diverses études et en particulier celle réalisée par l'Association Européenne pour l'Industrie Photovoltaïque (EPIA) [3] en avril 2006 ont permis de mieux appréhender les avantages et les inconvénients. Ce programme de recherche a ainsi montré que le temps de retour énergétique des panneaux PV (et des connexions électroniques) en fonction de l'irradiation du site, varie entre 19 mois et 40 mois pour un système installé en toiture et entre 32 mois et 56 mois pour un système monté en façade. Le facteur de retour énergétique varie entre 8 et 18 fois pour les systèmes installés en toiture et entre 5.4 et 10 fois pour les systèmes montés en façade. Cette étude a de même, permis la limitation des controverses récurrentes liées à un impact néfaste pour l'environnement de la production des cellules PV à travers l'évaluation de l'indicateur de CO₂ de 26 pays. Elle montre pour cela, que 1 kWe produit d'un panneau PV (représentant 10 m² de panneau PV) permet d'éviter la production de 40 tonnes en moyenne de CO₂ pour un système PV intégré en toiture et de 23.5 tonnes pour un système en façade pendant son cycle de vie.

Cependant, le photovoltaïque (PV) a un faible rendement et nécessite donc une intégration à grande échelle (figure 1.1). L'intégration de composants solaires permet une optimisation des surfaces de captation de l'énergie solaire. De ce fait, différents projets sont lancés en vue du développement de composants d'enveloppe (façade ou toiture) multifonctionnels à la fois performants et esthétiques.



Figure 1.1 : Exemple de panneaux PV intégrés en toiture en Malaisie [3]

L'intégration des systèmes PV aux bâtiments favorise leur autonomie énergétique [4-5]. Outre, elle peut provoquer l'échauffement des modules PV et par conséquent, la baisse de leur rendement électrique. Plusieurs études ont mené sur cette phase d'intégration en vue de définir des solutions permettant de maintenir le rendement de photo-conversion à un niveau équivalent à celui obtenu avec des composants PV non intégrés.

Une des solutions proposées est la conception de composants dits hybrides permettant la production simultanée d'énergie thermique et d'énergie électrique. Les capteurs solaires hybrides permettent la réduction de la température de fonctionnement des panneaux photovoltaïques et par conséquent l'amélioration de leur rendement électrique par la récupération de l'énergie thermique qu'ils dissipent à l'aide d'un fluide caloporteur.

Ainsi, différents programmes de recherche tels que le projet de Recherche Intégré PRI6.2 inscrit dans le cadre du Programme Energie CNRS et intitulé « *Intégration de capteurs solaires hybrides photovoltaïques-thermiques au bâti* [6] » ont été lancés.

1.2. Introduction au problème

Ce travail de thèse étudie le comportement dynamique et thermique de la ventilation naturelle d'une chambre muni d'un capteur solaire hybride dans sa façade sud (Figure 1.2). Il fait appel aux notions de thermique et d'électricité à différentes échelles. Ainsi, il englobe les trois modes de transferts thermiques, à savoir, la conduction, la convection et le rayonnement. En électricité, il concerne aussi bien les principes de base de l'électricité que les caractéristiques plus particulières des semi-conducteurs et des panneaux photovoltaïques.

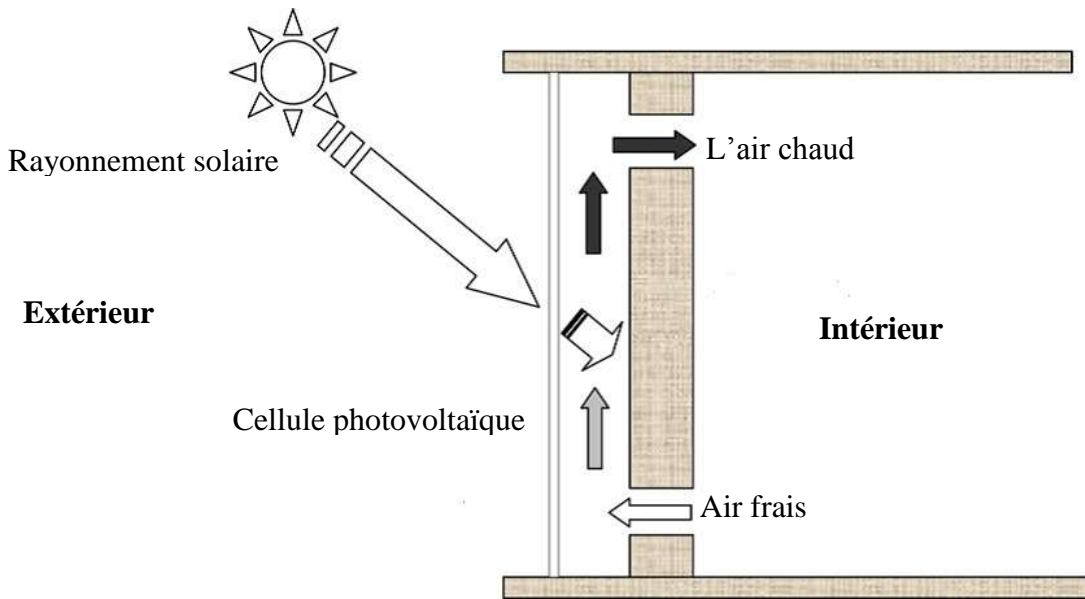


Figure 1.2 : schéma explicatif d'une paroi solaire hybride

Les murs solaires hybrides sont orientés au sud et ils sont composés d'une cellule photovoltaïque semi-transparente placée devant un élément de maçonnerie lourde (mur en brique ou en béton). La cellule photovoltaïque permet de capter et amplifier le rayonnement solaire par effet de serre. Cette énergie thermique pourra ensuite chauffer le mur placé en arrière. Comme il s'agit d'un mur « lourd » et de couleur sombre, la chaleur sera absorbée, accumulée puis véhiculée à l'intérieur du bâtiment par convection naturelle avec un certain déphasage qui dépend de la nature du mur.

Une grande partie du rayonnement solaire absorbé par les cellules solaires n'est pas convertie en électricité. Elle entraîne ainsi l'augmentation de leur température et donc une baisse de leur rendement électrique. Les capteurs solaires hybrides PV/T sont des systèmes utilisant des panneaux PV comme absorbeur thermique et permettent la production simultanée d'énergies thermique et électrique. Ce paragraphe présente le concept de composant hybride étudié ainsi que les principaux paramètres intervenant dans cette étude en vue d'en faciliter la compréhension. Nous passons pour cela brièvement en revue les caractéristiques des systèmes photovoltaïques et des capteurs solaires thermiques plans.

1.3. Description des capteurs solaires

1.3.1 Panneau photovoltaïque :

Les panneaux solaires sont composés de l'assemblage en série et en parallèle de plusieurs modules photovoltaïques. Ces modules photovoltaïques sont composés de la connexion en série d'un certain nombre de cellules solaires.

La cellule solaire (ou cellule photovoltaïque) est l'élément de base de l'effet photovoltaïque (ou conversion par photopiles) permettant la production de l'électricité à partir de l'énergie solaire. Ce phénomène implique la production et le transport de charges négatives et positives sous l'effet de la lumière dans un matériau semi-conducteur (qui est généralement, le silicium). En heurtant la surface de ce matériau, les photons transfèrent leur énergie aux électrons contenus dans la matière dopée négativement et positivement (jonction p-n). Ceux-ci se mettent alors en mouvement dans une direction particulière en créant ainsi un courant électrique continu qui est recueilli par des fils métalliques très fins micro-soudés en surface [7].

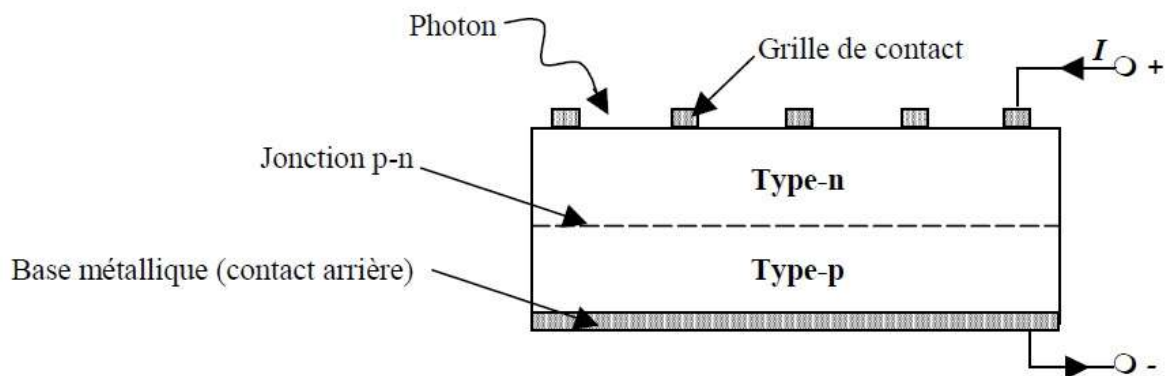


Figure 1.3 : Principe de fonctionnement du générateur photovoltaïque

Les principaux types de cellules au silicium sont : les cellules cristallines (c-Si) et les cellules amorphes (a-Si). Les cellules en silicium cristallin sont les plus commercialisées et comprennent les cellules monocristallines qui offrent un bon rendement électrique situé entre 10 et 17 % et les cellules poly-cristallines ayant un rendement électrique compris entre 11 et 15 %. Les cellules monocristallines offrent un meilleur rendement électrique mais font appel à une méthode de production plus complexe et donc coûteuse. En effet, une grande quantité d'énergie est nécessaire pour l'obtention d'un cristal pur. Les cellules poly-cristallines nécessitent un procédé de fabrication consommant moins d'énergie. Elles ont ainsi un coût de production plus faible

bien qu'ils ont un rendement légèrement inférieur à celui des cellules monocristallines, d'où leur utilisation dans les composants solaires hybrides étudiés dans le cadre de cette thèse.

Dans ce qui concerne les cellules PV en silicium amorphe, elles ont notamment été utilisées pour le développement de capteurs solaires PV/T à eau [8], en raison de la faible sensibilité de leur rendement électrique à leur température de fonctionnement. Cependant, le rendement électrique de ces technologies amorphes reste faible et est compris entre 4 et 7 %, bien qu'elles soient moins coûteuses que les précédentes. Elles sont adaptées aux installations solaires PV/T hybrides à grande superficie car la faiblesse du rendement électrique est compensée par un bon rendement thermique [9].

Avec les cellules PV à base de silicium, il existe des cellules en Cadmium Telluride (Cds-CdTe), en Diséléniure Cuivre Indium (CIS) ou en matériaux organiques (cellules amorphes à hydrogène) dont le rendement est faible, malgré leur coût plus bas en le comparant avec les cellules en silicium cristallin. L'Arséniure de Gallium (GaAS) sont des cellules solaires généralement adaptées à des applications spatiales, sont de même commercialisées. Mais, elles peuvent être employées pour des applications terrestres à grande échelle. Malgré leur coût très élevé, elles montrent un haut rendement électrique (supérieur à 30 %). Cependant, elles contiennent un matériau potentiellement toxique, l'arséniure. Enfin, en 2001, environ 80% des cellules solaires produites dans le monde sont en silicium cristallin. 13.23 % des cellules sont en silicium amorphe, 0.39 % en Cadmium et 0.18 % en Diséléniure [10].



Figure 1.4 : Exemple de panneaux PV non-intégrés au bâti

Les panneaux PV peuvent être intégrés dans un système photovoltaïque permettant la production et le stockage de l'énergie électrique si nécessaire [3].

1.3.2. Capteurs solaires thermiques :

Les capteurs solaires thermiques assurent la production d'énergie thermique à partir du rayonnement solaire. Ils sont composés d'un absorbeur qui absorbe le rayonnement solaire en s'échauffant, d'un système de refroidissement à l'aide d'un fluide caloporteur (air ou liquide), d'un isolant thermique latéralement et en sous-face, le plus souvent d'une couverture transparente (en face avant et exposée au rayonnement) qui assure l'effet de serre, et éventuellement d'un coffrage étanche à l'eau et d'un système de support mécanique de l'ensemble [11]. L'énergie solaire récupérée par le capteur solaire transforme l'énergie solaire en énergie thermique est cette dernière sera cédée au fluide caloporteur (air ou eau) (Figure 1.5).

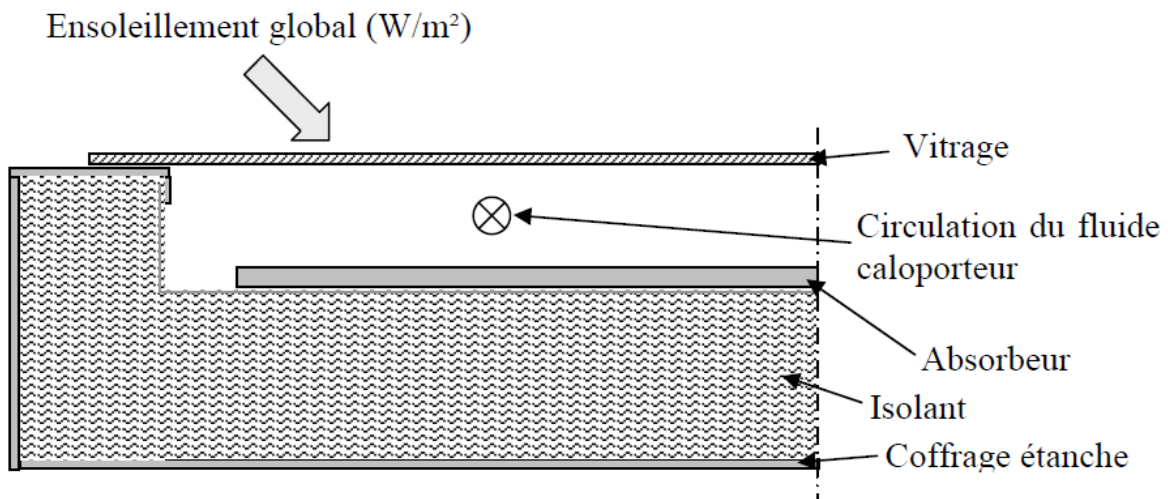


Figure 1.5 : Schéma de principe d'un capteur solaire thermique plan

L'énergie thermique peut être transférée vers un réservoir de stockage d'énergie ou utilisée directement. Le transfert thermique se fait soit par circulation naturelle, soit par circulation forcée du fluide. Les principaux types de capteurs solaires indépendamment du fluide caloporteur, sont les capteurs solaires à concentration et les capteurs solaires thermiques plans. Ces capteurs solaires plans se distinguent par leur fonction, leur forme géométrique ou leur température d'application (Figure 1.6).



Figure 1.6 : Exemple de capteurs solaires plans vitrés, non vitrés et de capteurs solaires à tube sous-vide

Il existe aussi des capteurs dites capteurs solaires plans vitrés convenant mieux à des applications à température modérée (comprises entre 30 et 70 °C) tels que le chauffage de l'eau sanitaire, des piscines d'intérieur et le chauffage des bâtiments. Il existe aussi les capteurs solaires plans sans vitrage convenant à des applications à basse température (inférieure à 30°C), telles que le chauffage des piscines d'extérieur et d'intérieur. De plus, se rencontrent les capteurs solaires sous vide (ou caloducs) qui sont parmi les types de capteurs solaires les plus efficaces mais aussi les plus coûteux. Ces derniers conviennent mieux à des applications à hautes températures pour lesquelles la température demandée atteint 50 à 95°C (couplage au froid solaire). Ils sont particulièrement utilisés pour le chauffage de l'eau des résidences, des bâtiments commerciaux, ainsi que celui des piscines d'intérieur.

1.3.3. Capteurs solaires hybrides

Le fonctionnement d'un panneau solaire hybride est relativement simple à comprendre. Il est constitué de capteurs thermiques à haut rendement sur lesquels reposent des cellules solaires photovoltaïques. Ces dernières transforment le rayonnement solaire en électricité, tandis que les capteurs thermiques récupèrent la chaleur émise par le soleil grâce à un fluide caloporteur injecté par un échangeur ou grâce à un collecteur d'air chaud.

Le panneau solaire hybride permet ainsi de générer simultanément de l'électricité et de la chaleur grâce à ses deux faces au fonctionnement distinct :

Chapitre 01 : Introduction générale et description du concept

- En couche supérieure (côté soleil) : ses cellules photovoltaïques produisent de l'électricité dès qu'elles sont exposées au rayonnement solaire.
- En couche inférieure (côté intérieur) : un capteur solaire thermique capte la chaleur émanant du soleil.

Associant les caractéristiques des panneaux photovoltaïques et thermiques, ces panneaux solaires hybrides, aussi appelés « panneaux PV/T », reposent ainsi sur le principe de la cogénération solaire permettant de :

- Générer de l'électricité pour éclairer votre logement et alimenter tous vos appareils installés dans votre maison à partir d'énergie naturelle.
- Produire de la chaleur pour chauffer votre eau, une piscine, l'air ambiant ou même pour faire fonctionner votre plancher chauffant.

Certains panneaux solaires hybrides présentent un système de transfert de chaleur optimisé entre la face avant photovoltaïque et la circulation d'eau antigel, grâce à un échangeur thermique intégré. Contrairement à un capteur solaire thermique, l'hybride ne contient pas systématiquement un isolant en sous-face afin d'éviter toute perte de chaleur.

Permettant de générer une hausse du rendement à hauteur de 40% pour une même surface de panneaux solaires, ce système hybride à la fois innovant et écologique est une solution à considérer dans le cadre de vos travaux d'économies d'énergie.

Réunissant en une unique technologie les possibilités du solaire thermique et du photovoltaïque, cette cogénération permet d'optimiser la surface. En effet, cela permet d'éviter de multiplier les systèmes utilisés et donc de réduire la surface d'exposition nécessaire.



Figure 1.7 : Exemple de capteurs solaires hybrides

VI. Structure de la thèse :

Le manuscrit de thèse s'articule de la manière suivante :

- Le chapitre 2 récapitule une recherche bibliographique sur les différents types des capteurs solaire (thermiques ou photovoltaïques-thermique) et leur utilisation soit dans le domaine d'habitat (chauffage ou ventilation) ou bien dans l'agriculture (séchage des produits agricoles). Il vise également à décrire les différents paramètres étudiés dans ce qui concerne la géométrie, la position et le comportement thermique de la pièce lors de l'intégration d'un capteur solaire.

- ❖ Le troisième chapitre, présente des généralités sur les cellules photovoltaïques et le rayonnement solaire. Dans ce chapitre on cite les différents modèles de rayonnement utilisés dans la simulation sous fluent et leurs avantages et inconvénients.
- ❖ Le quatrième chapitre présente le problème physique étudié et les équations mathématiques gouvernantes qui régissent la modélisation du phénomène de la convection naturelle.
- ❖ Le cinquième chapitre présente l'analyse des résultats obtenus pour les deux model étudiés (model sans séparation, model avec plaques séparatrices).
- ❖ On termine notre thèse par une conclusion générale et perspective.

Chapitre 02

Synthèse bibliographique

2.1. Capteurs solaires thermique et hybrides

Afin de mener à bien la conception de notre mur solaire hybride, une synthèse bibliographique des capteurs solaires thermique et PV/T hybrides a été réalisée. La recherche sur les capteurs solaires a débuté dans les années 70 et a été intensifiée dans les années 80. En 2005, Zondag [12] a réalisé un état de l'art sur les capteurs solaires PV/T hybrides en se basant sur le rapport du projet européen PV-Catapult [13]. Parmi les premières études recensées par Zondag [12], certaines mettent la main sur l'évolution de la configuration géométrique des composants et d'autres sur les méthodes de modélisation. Ainsi, il cite un travail qui traite l'analyse d'un capteur solaire thermique comportant des modules PV à base de silicium et couplé à un système de stockage de chaleur [14].

En 1978, Kern et Russel [15] ont réalisés une étude qui donne les principes de base des capteurs solaires employant de l'eau ou de l'air comme fluide caloporteur. Par la suite, Hendrie en 1982 [16] développe un modèle théorique de système PV/T hybride en se basant sur des corrélations liées à des capteurs solaires standards. Des méthodes numériques permettant la prévision des performances des capteurs solaires plans PV/T à eau ou à air sont établies par Raghuraman [17]. Plus tard, des logiciels de simulations développés en 1985, par Cox et Raghuraman [18] permettant l'étude des performances des systèmes PV/T hybrides à air, et mettent l'accent sur l'influence des propriétés optiques du vitrage sur les rendements thermique et électrique de ces composants solaires. En 1986, Lalovic et al. [19] proposent un nouveau type de cellules amorphes a-Si transparentes comme solution économique pour la construction de modules PV. L'utilisation de l'énergie solaire dans le domaine de l'habitat pour réduire sa consommation énergétique a fait l'objet de plusieurs études. Une technique de chauffage se basant sur un système de captation solaire, de stockage et de restitution de la chaleur a été développée au C.N.R.S (France) par le Professeur Trombe.

Le mur Trombe ou le mur solaire est un système simple et intéressant de captage de l'énergie solaire. Il est constitué d'un mur vertical en maçonnerie lourde orienté vers le sud et muni de deux orifices permettant la circulation de l'air entre le local et la serre formée par la surface réceptrice du mur et le vitrage qui le précède.

Le mur capteur transmet l'énergie solaire captée par deux moyens, une partie est transmise par conduction à travers le mur qui la restitue à l'intérieur du local par convection, alors que la deuxième partie se transmet par circulation naturelle de l'air chaud se trouvant dans la cheminée solaire à travers les orifices. Le débit de cet air peut être calculé par la relation suivante [20] :

$$M = \rho A_d \sqrt{\frac{2gH(T_m - T_{in})}{c T_m}} \quad (1)$$

Avec :

$$C = 8 \left(\frac{A_d}{A_v} \right)^2 + 2$$

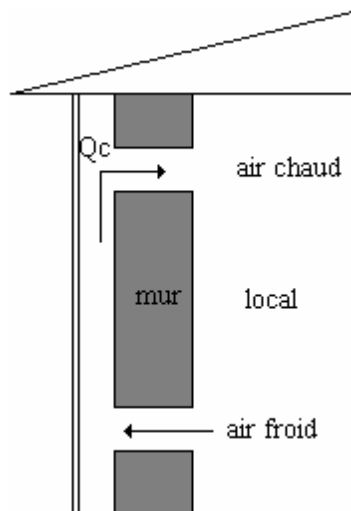


Figure 2.1 : Le mur trombe.

Les applications des cheminées solaires attirent l'intention de beaucoup de chercheurs pour découvrent les paramètres significatifs qui affectent son applicabilité. Beaucoup de chercheurs étudient l'amélioration de la ventilation naturelle par différentes configurations des cheminées solaire. La figure 2.1 montre une configuration qui a été conçue pour maximiser le gain solaire et pour maximiser de ce fait l'effet de ventilation. La cheminée solaire est essentiellement divisée en deux parts, la première c'est le réchauffeur d'air solaire (collecteur) et la deuxième c'est la cheminée, les paramètres de conception critiques étant la taille, la section de captage et la différence dans la température à l'admission et à la sortie du système.

Cette configuration donne la possibilité d'un potentiel de production de 100 à 350 m³/hr comme taux de la ventilation pour une surface de collecteur de 2,25 m² et pour des valeurs de rayonnement solaire de 100 à 1 000 W/m² sur la surface horizontale [21]. Les valeurs de ces circulations d'air induites dépendent également de la géométrie du collecteur d'air, de la section transversale du conduit et des paramètres d'optimisation du traitement du capteur solaire.

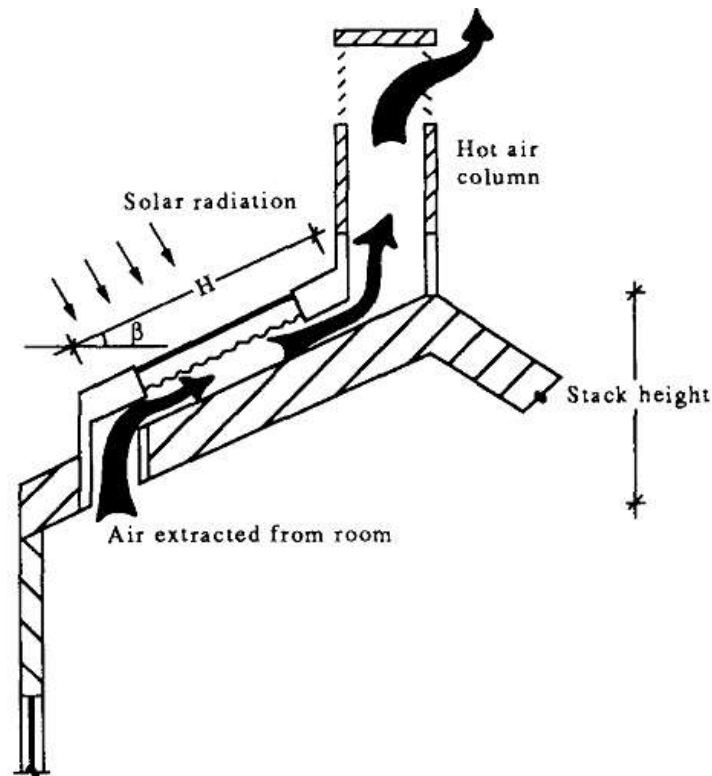


Figure 2.2 : Description de la cheminée solaire

Bassiouny et al. [22] ont également étudiés en (2008) l'influence de certains paramètres sur le comportement thermique de la cheminée solaire pour optimiser sa conception figure 2.2 Les résultats obtenus montrent que la largeur de la cheminée a une influence très importante sur l'ACH (renouvellement d'air par heure) comparé à celle de la section d'admission. Les résultats prouvent qu'il y a une section optimale d'admission au-delà de laquelle l'ACH commence à diminuer. Il a été conclu que l'augmentation de la taille d'admission trois fois seulement améliore l'ACH par presque 11%. Cependant, l'augmentation de la largeur de la cheminée par un facteur de trois améliore l'ACH par presque 25%, en gardant la section d'admission fixée. Les mêmes chercheurs ont étudiés par la suite [23] une cheminée solaire placée sur un toit incliné figure 2.3 pour voir l'influence de l'inclinaison sur le comportement thermique de la cheminée. Les résultats montrent que l'inclinaison influe considérablement sur le taux de ventilation et sur le débit d'air qui traverse la cheminée. Cette étude montre que l'angle optimal d'inclinaison de la cheminée varie entre 45° et 75° pour une latitude de 28.4° .

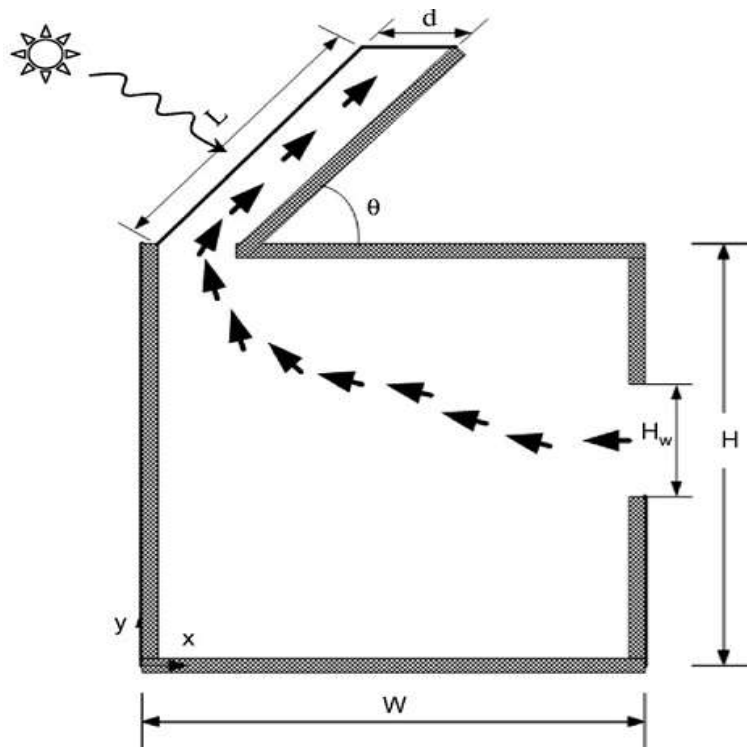


Figure 2.3 : cheminée solaire inclinée.

Un model CFD a été utilisé pour la simulation de la ventilation naturelle à travers une cheminée solaire verticale proposé par Gan [24]. La simulation est réalisée en utilisant deux domaines, le première (s) de taille identique à celle de la cavité de la cheminée, et le deuxième (L) est étendu. Les résultats montrent que l'utilisation de deux domaines pour la simulation est efficace pour toutes sortes de ventilation, cependant l'utilisation d'un seul domaine de taille identique de celle de la cavité de la cheminée est favorisée pour les longues cheminées là où la résistance des parois est dominante.

Le mur de stockage joue un rôle primordial dans la conception des parois solaires pour assurer l'effet cheminée. Zlaweski [25] a consacré une étude sur l'utilisation d'un mur composite dans une cheminée solaire. Le mur est composé de neuf briques de PCM pour exploiter les caractéristiques de stockage thermique des MCP pour prolonger le temps de fonctionnement de la cheminée solaire dans les heures non ensoleillées.

Une simulation numérique réalisée par Bourdeau et al. [26] a montré que l'utilisation d'un mur de 3.5cm d'épaisseur en MCP peut remplacer un mur de 15cm en béton. L'utilisation des MCP réduit 90% de masse de mur de stockage et augmente leur efficacité thermique par un facteur de 20% [27].

Beaucoup de chercheurs travaillent sur l'analyse de la cheminée verticale, tandis que d'autres ont étudié la cheminée solaire inclinée. Bansal et al. [28] sont les premiers qui ont étudiés la performance de la cheminée solaires. Ils ont développé un modèle mathématique pour étudier l'effet de l'utilisation des cheminées solaires sur la ventilation naturelle induite dans les bâtiments. Une simulation numérique du modèle proposé a révélé que pour des valeurs de rayonnement solaire compris entre 100 et 1000 W le taux de renouvellement d'air par heure (ACH) varie entre 50 et 165 m³ pour chaque mètre carré de surface de captage de la cheminée solaire. De plus, ils ont constaté que le débit d'air induit dépend de la géométrie de la cheminée, de la section transversale du capteur et des paramètres de transfert thermique, tels que les coefficients de perte de charge à l'entrée et la sortie et les coefficients d'absorption et transmission du vitrage utilisé.

Une étude théorique et expérimentale a été réalisée par Mathur et al. [29] pour évaluer la possibilité d'utiliser le rayonnement solaire pour le rafraîchissement d'air dans les climats chauds. Les résultats théoriques du modèle proposé sont en bonne concordance avec ceux expérimentaux. Ils ont découvert que le débit d'air augmente linéairement avec l'augmentation du rayonnement solaire et l'augmentation de l'espace entre l'absorbeur et le vitrage.

Macias et al. [30] ont présenté une approche pratique pour améliorer la ventilation passive dans la nuit dans un logement social en appliquant le concept de la cheminée solaire. Au lieu d'utiliser la ventilation forcée par ventilateur, ils ont utilisé un grand mur absorbeur dans la construction de bâtiments pour recueillir l'énergie solaire pendant l'après-midi (~50 °C). Pour chaque appartement il y avait une cheminée séparée avec un clapet au sommet, et pendant la collecte d'énergie le clapet a été fermé. Ensuite, pendant la nuit, lorsque la température ambiante chute à environ 20 °C, on ouvre les clapets en haut en créant un courant d'air qui va nous refroidir les plafonds et les murs.

Herreo et al. [31] ont proposé un modèle mathématique pour évaluer la performance énergétique d'une cheminée solaire de 2 m de haut avec un mur de béton de 0,24 m d'épaisseur comme absorbeur. Les données météorologiques réelles pour la Méditerranée ont été utilisées comme conditions initiales pour le modèle. Le mur de béton a atteint sa température maximale 2 heures plus tard que la température ambiante. En outre, le mur de stockage a gardé la chaleur emmagasinée même après le début de la nuit, induisant la ventilation naturelle de nuit. Ils ont recommandé de poursuivre les études sur l'inertie thermique des murs de stockage utilisés dans les cheminées solaires.

Une étude expérimentale réalisée par Chungloo et al. [32] sur l'effet de la cheminée solaire et / ou de l'eau pulvérisée sur un toit sur la ventilation naturelle. Lorsque la température ambiante était de 40 ° C, ils ont obtenu une réduction maximale de 3,5 °C de la température pour le cas de la cheminée séparée et une réduction maximale de 6,2 °C de la température pour l'effet combiné entre la cheminée solaire et l'eau pulvérisée. En outre, ils ont indiqué que la différence de température entre l'entrée et la sortie de la cheminée solaire tend à diminuer pendant les jours-là où on aura des valeurs de rayonnement solaire et de la température ambiante élevées. D'autre part, la pulvérisation d'eau augmente la différence de température et par conséquent l'augmentation de débit d'air renouvelé à travers la cheminée. Enfin, ils ont recommandé de poursuivre les études sur l'effet de la cheminée sur la ventilation naturelle avec des valeurs faibles de Reynolds.

Mathur et al. [33] ont aussi étudié l'effet de l'utilisation d'une cheminée solaire pour améliorer la ventilation naturelle. Ils ont constaté qu'il y avait une relation inversement proportionnelle entre l'inclinaison de l'absorbeur et la hauteur de la cheminée. Les expériences ont montré que l'angle optimal d'inclinaison de l'absorbeur varie de 40° et 60°, selon la latitude du lieu. Ils ont comparé les résultats expérimentaux avec le modèle mathématique proposé et ont trouvé un bon accord entre les deux.

Les DSF (Double Skin Facade) assurent d'une façon ou d'une autre l'économie de la consommation énergétique lors du chauffage d'habitat. Tout d'abord, la cavité entre les peaux interne et externe forme une couche supplémentaire d'isolation du bâtiment, empêchant la perte de chaleur. Deuxièmement, l'air chaud dans la cavité peut être utilisé pour préchauffer l'air frais introduit dans le bâtiment pour la ventilation. Troisièmement, des vitrages extensifs permettent d'utiliser le soleil pour le chauffage passif de l'intérieur du bâtiment [34].

Battle McCarthy, une entreprise d'ingénierie et d'architecture paysagère basée au Royaume-Uni, indique sur son site Web que «... Les bâtiments à double peau sont capables de réduire la consommation d'énergie de 65%, les coûts de fonctionnement de 65% et de réduire les émissions de CO₂ de 50%, dans le climat tempéré froid prévalent au Royaume-Uni par rapport à la construction avancée de peau unique.

Mostafa M. et al. [35] a consacré une étude pour examiner des différents types de systèmes de façades à double peau, en explorant leurs caractéristiques et leur fonctionnement. La recherche contient plusieurs définitions référencées des DSF, avantages et inconvénients et les types des DSF existants. Les auteurs ont évalués et analysés des recherches récentes et des exemples pour

essayer de parvenir à une conclusion que les façades à double peau minimisent la consommation énergétique dans la construction.

Nazanin et al. [36] ont étudiés par la suite les performances de la ventilation naturelle dans les habitats à double peau (DSF) et ils ont conclu que la subdivision de la cavité du DSF en plusieurs cheminées n'a pas un impact significatif sur le comportement thermique du DSF. Ils ont montré aussi que le facteur vent joue un rôle important dans ce qui concerne la réduction de la chaleur dans les cavités des DSF (le problème de sur-chauffage des cavités dans les façades à double peau), et ils ont déduit que le contrôle de l'écoulement de vent en optimisant la position de l'entrée et de la sortie d'air selon un désigne bien définis améliore la ventilation naturelle des habitats munis des DSF et résoudre le problème de sur-chauffage dans les cavités.

Hanan [37] a démontré qu'une combinaison des systèmes de refroidissement actifs et de solutions de ventilation passive naturelle a le potentiel de fournir un résultat amélioré par la diminution de la température et les frais de charge du refroidissement et par conséquent réduction des coûts pour les résidents.

Certains chercheurs avaient analysés l'application des cheminées solaire dû pour le séchage des récoltes (dessiccateur solaire), le dessiccateur peut être combiné avec un toit convenablement incliné de chambre de séchage pour l'amélioration de ventilation dans le dessiccateur (figure 2.4).

Des modèles mathématiques et un code informatique sont maintenant développés pour simuler la ventilation par rapport à la conception du dessiccateur. Les résultats des études paramétriques ont analysés avec le code indiquent que, le flux maximum d'air peut être réalisé quand le rapport des sections admission/sortie est vers 4/1, au-dessus duquel le système alors approche de la saturation.

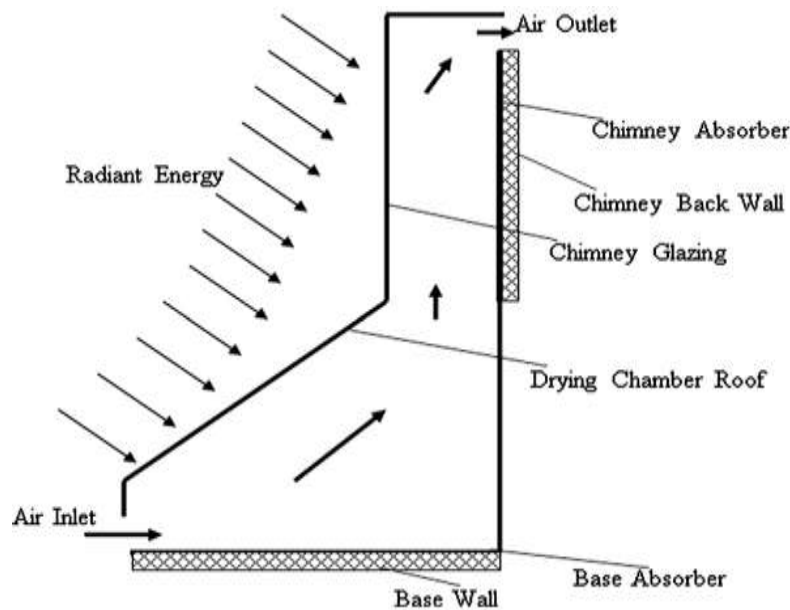


Figure 2.4 : Schéma fonctionnelle d'un dessiccateur solaire

J.K. Afriyie et al [38] déduit que l'inclinaison de la toiture de la chambre de séchage et la taille de cheminée sont critiques pour la conception dans les régions géographiques loin de l'équateur, tandis que les paramètres décisifs dans les régions près de l'équateur sont la taille de la chambre de séchage et le rapport des sections absorbeur et la section transversale de cheminée. Une chambre de séchage élevée avec une cheminée solaire courte est généralement favorisée aux endroits près de l'équateur, tandis qu'une chambre de séchage courte avec une haute cheminée solaire convient aux régions lointaines de l'équateur.

- ✓ Les résultats de la simulation numérique montre qu'il y a une relation proportionnelle entre l'angle d'inclinaison et la surface d'entrée.
- ✓ Le renouvellement d'air par heure peut être estimé à l'aide d'une corrélation conclue de la forme :

$$ACH = 0.795 \sin(\theta^{0.3189} I^{0.3818} d^{0.1658}) \quad (2)$$

Avec une erreur de 20% approximativement sous les limitations suivantes :
intensité $\geq 500 \text{ W/m}^2$, et entrefer(d) de 0.1 à 0.35m.

Des cellules photovoltaïques sont adaptées pour bénéficier du gain électrique à l'aide d'un mur solaire hybride. Kundakci et al. [39] ont étudiés en (2012) les paramètres de conception qui influent sur l'efficacité thermique de mur solaire telle que la façade sud. Cette étude a montré que la conception de la façade sud influe sur le rendement thermique du mur solaire hybride.

Cependant, l'utilisation d'une fenêtre dans la façade sud apporte des gains solaires qui seront automatiquement utilisés pour le chauffage de la chambre, mais dans l'autre côté elle réduit considérablement l'efficacité thermique du PVTW (Photovoltaïque Trombe Wall).

Une étude effectuée par Sun et al. [40] Montre qu'une couverture PV de 34% et 100% sur le vitrage réduit la capacité de chauffage de mur trombe par un facteur de 0.07 et 0.17 respectivement, par contre, l'efficacité électrique sera automatiquement proportionnelle avec le taux de couverture PV sur le vitrage

2.2. Les capteurs solaires hybrides PVT plan :

Les capteurs solaires hybrides PVT plan peuvent être classés selon le fluide caloporteur utilisé (l'eau, l'air ou les deux simultanément).

2.2.1. Les capteurs solaires hybrides PVT à eau :

En 2015, Baloch et al [41] ont étudié expérimentalement et numériquement l'influence de l'écoulement d'air dans un passage convergeant à différents angles sur le refroidissement du module PV. Par rapport au système non refroidi, ce système permet une réduction de température de 26 et 12 °C durant les mois de juin et de décembre, respectivement (Figure. 2.1). Fujisawa et Tani [42] ont conçu un capteur solaire PVT hybride à eau placé dans une cité universitaire à Tokyo, Japon. Il s'agit d'un capteur plan (1,3 m de longueur et 0,5 m de largeur) avec un absorbeur en aluminium non-sélective et de modules PV en silicium monocristallin (rendement électrique 13%), Figure.2.5. Concernant le gain total d'énergies (thermique et électrique), les auteurs ont montré que le système le plus performant est le capteur solaire hybride vitré avec une production totale de 615 KWh/an, suivi par le capteur solaire hybride non vitré (480 KWh/an) et enfin le capteur solaire PV (72,6 KWh/an).

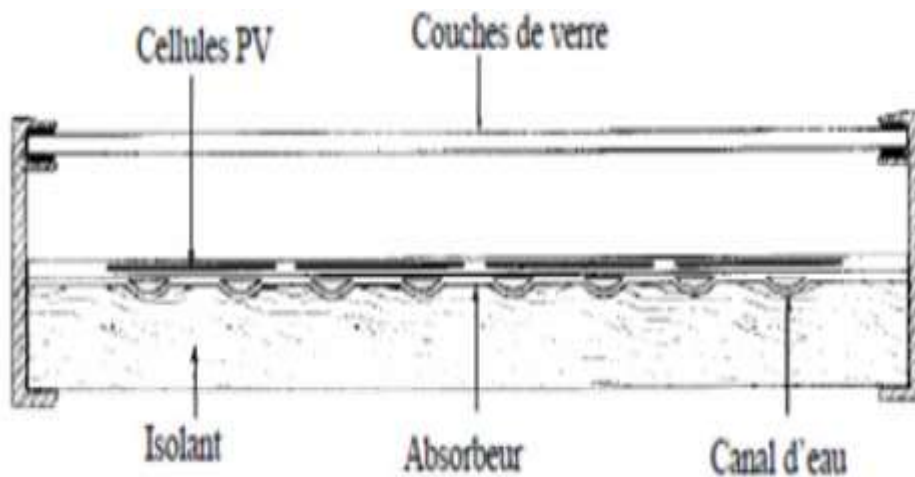


Figure. 2.5. Capteur hybride à eau [42].

Tripanagnostopoulos et al. [43] ont réalisé une étude expérimentale sur des systèmes PVT (Fig. 2.6) en utilisant l'eau pour extraire la chaleur de la surface arrière du module PV. Ceci permet de maintenir son efficacité électrique à un niveau satisfaisant par la réduction de sa température de fonctionnement. Les résultats ont montré que le refroidissement des cellules PV permet d'augmenter leur efficacité électrique, et d'augmenter ainsi l'efficacité totale des systèmes. L'amélioration des performances du système peut être obtenue par l'utilisation d'un vitrage supplémentaire pour augmenter la puissance thermique et d'un réflecteur pour augmenter la puissance électrique et thermique.

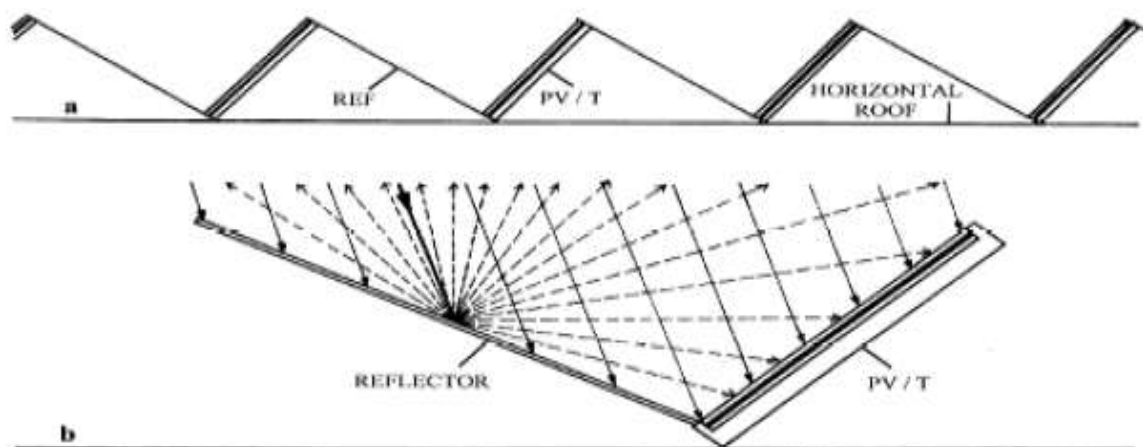


Figure. 2.6. Système PVT avec réflecteur [43].

Chapitre 02 : Synthèse bibliographique

Alzaabi et al. [44] ont proposé une conception pour améliorer l'efficacité électrique des panneaux PV à l'aide d'un système PVT hybride refroidi à eau, Figure. 2.7. Les performances électriques et thermiques du système sont étudiées dans des conditions de température ambiante dans SHARJAH (Emirats Arabes Unis) en avril 2014. Le système est composé d'un panneau PV polycristallin avec un capteur solaire thermique adhérent à son arrière. Les expériences ont été effectuées avec et sans processus de refroidissement pour observer l'amélioration de l'efficacité du panneau PV. Les résultats ont montré que la puissance électrique du système PVT a augmenté de 15 à 20% par rapport au panneau PV. L'efficacité thermique du système est située entre 60 et 70%.



Figure. 2.7. Photo du système PVT à eau [44].

Un système PVT contenant un module PV sur un absorbeur avec écoulement d'eau en spirale a été étudié par Ibrahim et al. [45]. Les résultats montrent que l'efficacité énergétique varie entre 55 et 62% et que l'efficacité électrique varie entre 12 à 14%. L'amélioration de la production électrique augmente entre 98 et 404 W avec l'augmentation du rayonnement solaire. D'autre part, l'efficacité énergétique du système PVT a été d'environ 73 à 81%.

Une analyse de la performance d'un système PVT refroidi à eau (Figure.2.8) a été réalisée par Kiran et Devadiga [46]. L'efficacité électrique moyenne développée sans refroidissement est de 7,58 % et celle avec le refroidissement est de 8,16%. L'efficacité thermique moyenne du panneau est de 50,81 %. L'efficacité globale du panneau est la somme des efficacités électrique et

thermique, 58,97%. Elle est plus importante que celle d'un chauffe-eau conventionnel et du panneau PV autonome.



Figure. 2.8. Système PVT et de la plate-forme d'essai extérieure [46].

Hazami et al. [47] ont étudié le potentiel offert par l'utilisation d'un capteur solaire PVT (Figure.2.9) dans les foyers tunisiens pour fournir simultanément l'électricité et l'eau chaude domestique. Les expériences sont faites sous différentes conditions climatiques pendant des jours sélectionnés en juillet 2014 durant le mode passif (sans refroidissement) et actif (avec refroidissement). Les résultats ont montré que l'efficacité énergétique thermique et électrique instantanée maximale en mode actif est d'environ 50 et 15%, respectivement. On a également constaté que le rendement électrique maximum en mode passif était d'environ 14,8%. La deuxième approche consiste à évaluer les performances mensuelles et annuelles du système solaire PVT en utilisant le code TRNSYS. Les résultats ont montré que les modes actifs améliorent l'efficacité électrique du système PVT de 3%.



Figure. 2.9. Capteur PVT avec ballon de stockage [47].

2.2.2. Les capteurs solaires hybrides PVT à air

Le capteur hybride PVT à air produit l'énergie électrique et l'énergie thermique sous forme d'air chaud. Ce dernier est utilisé dans plusieurs applications (chauffage, séchage, etc). Tiwari et Sodha [48] proposent une étude paramétrique et comparative de quatre types des capteurs solaires à air, Figure. 2.10. Les systèmes étudiés se différencient par la présence ou non d'un vitrage et d'un support en Tedlar. Les modèles thermiques développés ont été validés avec une étude expérimentalement montée à New Delhi. Les résultats obtenus ont montré que le capteur à air vitré et sans Tedlar est le plus performant avec une amélioration significative du rendement global (thermique et électrique). Les capteurs solaires à air non vitré avec et sans Tedlar donnent des températures des cellules PV assez identiques.

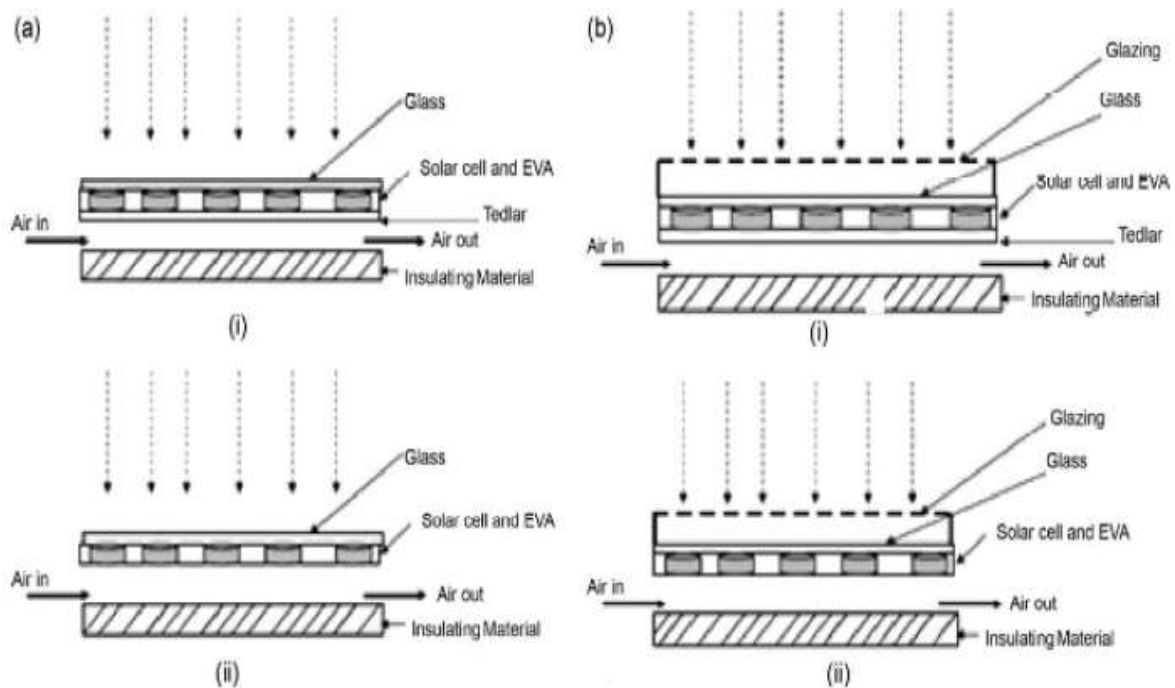


Figure. 2.8. PVT à air avec et sans vitrage, avec et sans tedlar [48].

Joshi et Tiwari [49] présentent l'étude des rendements énergétique et exégétique d'un capteur solaire hybride PVT à air sans vitrage et comportant une couche de Tedlar. Les résultats validés expérimentalement indiquent que les rendements thermique et électrique du capteur solaire varient entre 55 à 65 % et 14 à 15 %, respectivement (Figure. 2.11). Une étude expérimentale qui porte sur la conception et le développement des systèmes PVT avec circulation d'air intégrée dans un toit (Figure.2.12) a été réalisé par Aste et al. [50].

Les expériences sont faites dans le site expérimental Parco Lambro à Milan. Les efficacités thermique et électrique sont évaluées pendant plusieurs jours. Les auteurs ont analysé l'effet des paramètres suivant : débit d'air, inclinaison du capteur et l'épaisseur du canal d'air. Le but est de définir les performances du collecteur en termes d'efficacité électrique et thermique dans plusieurs conditions de travail.



Figure. 2.9. Photographie de l'installation expérimentale d'un collecteur d'air hybride PV / T [49].



Figure. 2.12. Systèmes PVT avec circulation d'air [50].

Tonui et Tripanagnostopoulos [51] ont présenté un système de capteur solaire PVT avec refroidissement à air (Figure.2.13). Ils proposent d'utiliser une mince feuille métallique ou des ailettes dans le canal d'air pour améliorer l'extraction de la chaleur des modules PV. Un modèle numérique a été développé et validé expérimentalement. Les systèmes proposés présentent de

meilleures performances par rapport à un système classique. Les résultats montrent que les deux systèmes contribuent de manière positive à améliorer l'extraction de la chaleur à partir du module PV avec une meilleure production d'énergie électrique et thermique.

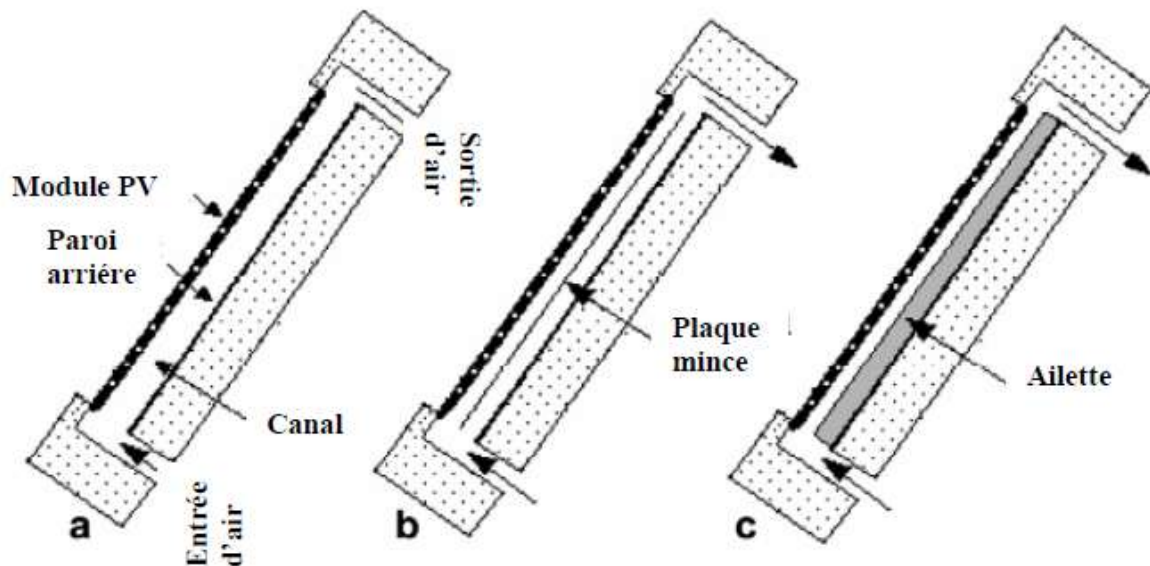


Figure. 2.13. Les différentes configurations étudiées : (a) système conventionnel (b) système avec une feuille de métal (c) système avec ailettes [51].

Agwaral et Tiawri [52] ont étudié un système PVT installé comme toit d'un bâtiment (Figure.2.14). La performance de ce système est comparée avec celle d'un système PV simple. Bien que le système BIPVT (building integrated photovoltaic thermal) monocristallin soit plus performant pour les consommateurs résidentiels du point de vue efficacité thermique et électrique, le système BIPVT au silicium amorphe s'avère plus économique. Les efficacités thermique et électrique du système BIPVT en silicium amorphe se situent respectivement à 33,54 et 7,13 % dans les conditions climatiques de New Delhi.

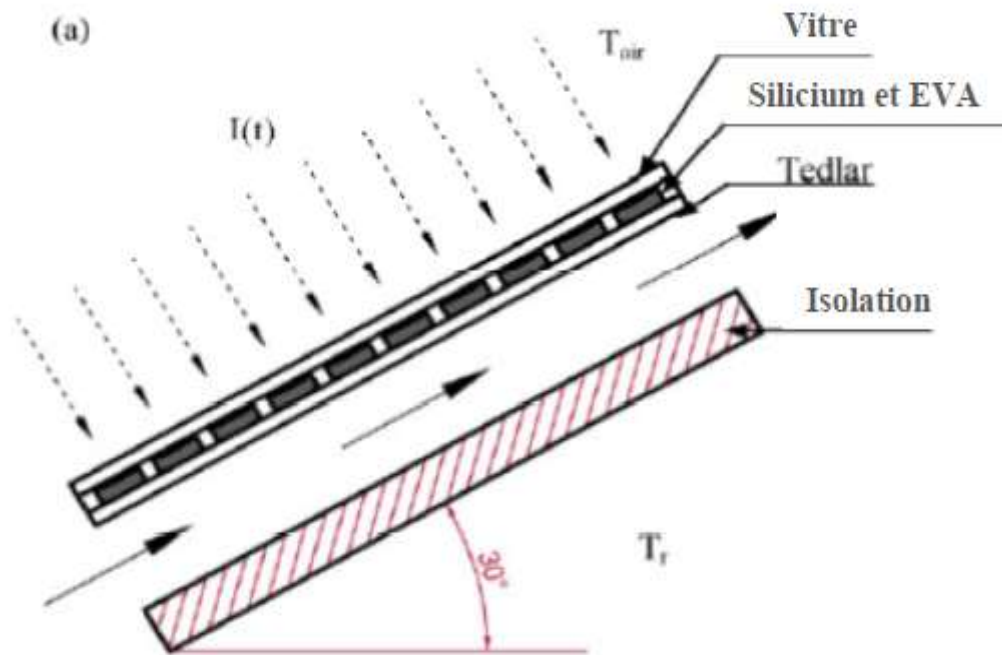


Figure. 2.14. Section transversale du système PVT [52].

Ahn et al. [53] ont couplé un capteur PVT à air avec un système de ventilation à récupération de chaleur (VRC). Les résultats expérimentaux montrent que les performances thermique et électrique du capteur PVT sont respectivement de 23 et 15%. Par conséquent, l'efficacité globale du système couplé est de 38%. Alors, l'efficacité du système VRC a été améliorée par environ 20%. Les auteurs ont conclu que le système VRC couplé avec un capteur PVT a donné une efficacité supérieure à un système VRC simple.

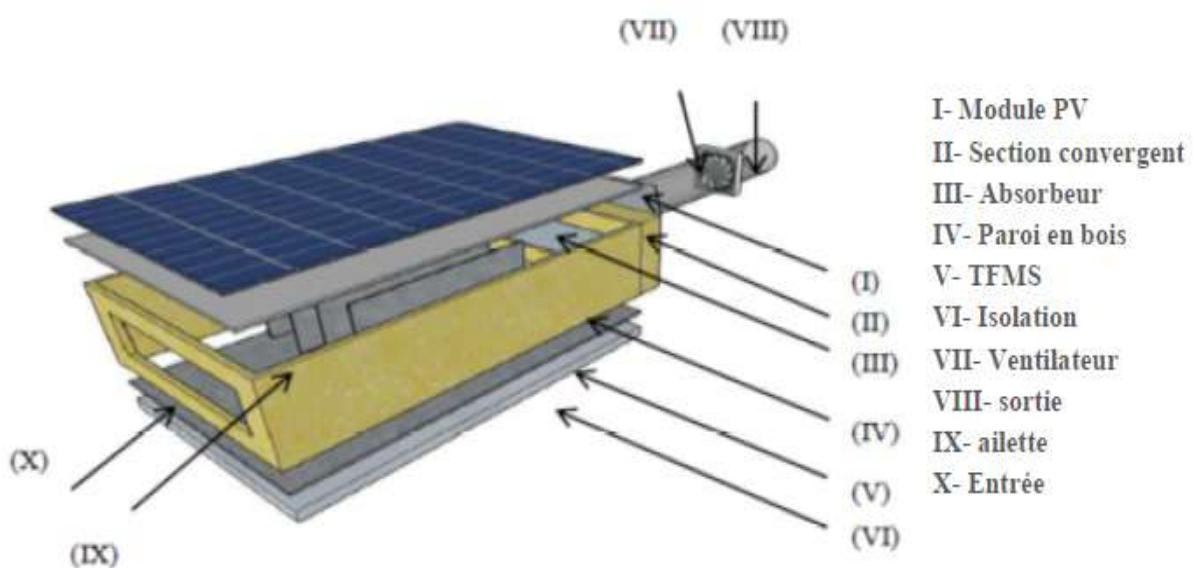


Figure. 2.15. Schéma de la conception de capteur PVT [54].

Un capteur solaire PVT à air avec ailettes rectangulaires minces est proposé par Mojumder et al. [54], Figure. 2.15. L'étude expérimentale est réalisée sous différentes conditions et configurations. Les efficacités électrique et thermique maximales obtenues (13,75 et 56,19 %) étaient avec quatre ailettes, un débit massique de 0,14 kg/s et un rayonnement solaire de 700 W/m².

2.2. 3. Les capteurs solaires hybrides PVT bi-fluide

Tripanagnostopoulos [55] a étudié un capteur solaire hybride utilisant deux types de fluide caloporteurs (air et eau) disposés de manière superposée. Trois configurations ont été conçues et analysées expérimentalement afin d'évaluer le comportement de chacune des formes de production thermique. Le système le plus performant (Figure.2.16) comporte un absorbeur avec des tubes en cuivre, une plaque métallique plane et des ailettes disposées sur la paroi inférieure de la lame d'air. Des cellules PV en silicium poly-cristallin ont été utilisées à cause de leur bon rendement et du coût réduit par rapport aux cellules PV en silicium monocristallin. Les résultats des tests ont montré une augmentation de la production d'énergie totale du système d'environ 30 %.

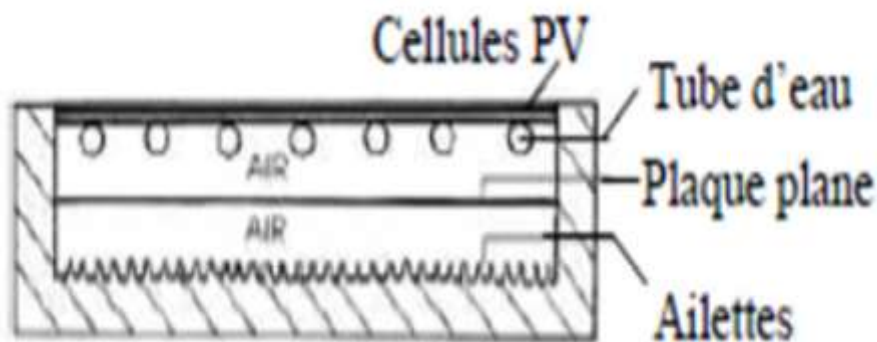


Figure. 2.16. Capteur solaire PVT à deux fluides et à fonctions superposées [55].

Une étude comparative expérimentale et numérique a été effectuée par Assoa et al. [56]. Le capteur hybride étudié se compose d'un échangeur thermique à air avec un absorbeur plan en acier, un module PV poly-cristallin (240 × 1980mm), isolation (avec du polystyrène et un réflecteur mince) et un tuyau d'eau. Ils ont conclu que le débit massique influe sur le comportement de l'échangeur thermique à air à cause des pertes thermique avec l'échangeur thermique à eau. Ils proposent d'améliorer l'isolation est la forme des échangeurs. Les performances de l'échangeur thermique montre que l'efficacité thermique peut atteindre approximativement 80 % avec un débit massique et une longueur de l'échangeur optimisés.

L'estimation de rendement électrique indique un refroidissement des cellules PV satisfaisant avec possibilité d'amélioration.

2.3. Capteur solaire hybride à concentration CPVT

Actuellement, la recherche s'oriente vers le développement des capteurs CPVT pour générer plus d'électricité et de chaleur. Cependant, peu de travaux existent dans ce domaine pour assurer un meilleur développement de ces systèmes et de subvenir à la demande croissante d'énergie, tant électrique que thermique, en protégeant l'environnement. Afin d'améliorer la production d'énergie thermique et électrique, des réflecteurs de rayonnement solaire plats ont été montés sur un capteur PVT (Figure. 2.17) par Kostic et al. [57]. Pour augmenter l'intensité de rayonnement solaire concentré sur le capteur PVT, la position des réflecteurs a été modifiée et optimisée par des mesures expérimentales et des calculs numériques. Les résultats montrent que l'énergie thermique totale produite par le capteur PVT avec des réflecteurs a augmenté par 25% par rapport à un capteur PVT sans réflecteurs.

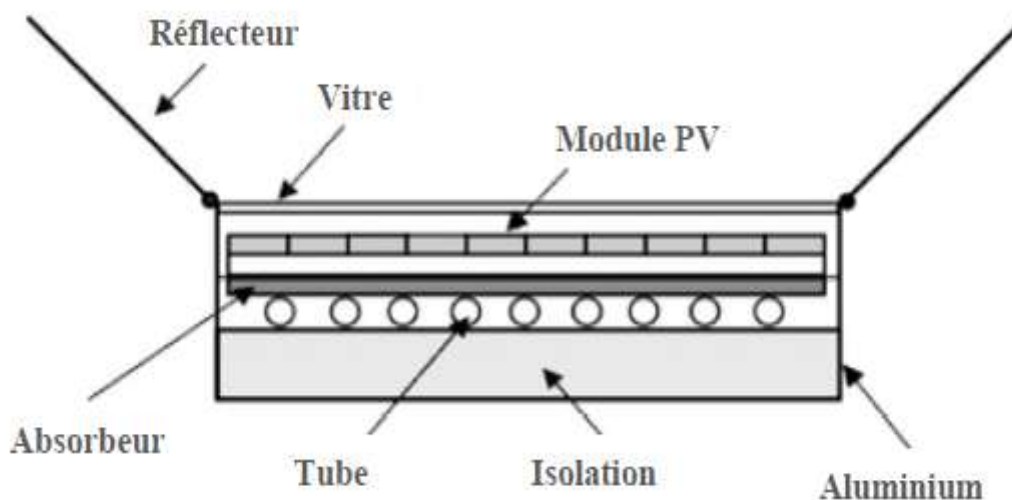


Figure. 2.17. Capteur solaire CPVT [57].

Coventry [58] a conçu un concentrateur photovoltaïque thermique CPVT parabolique avec un taux de concentration de 37 % à l'Australie ANU, Figure.2.18. Les résultats mesurés ont montré que les efficacités thermique et électrique étaient autour de 58 et 11%, respectivement. Donc, une efficacité combinée significative de 69%.



Figure. 2.18. Prototype concentrateur CPVT type ANU [58].

Des systèmes CPVT ont été conçus et testés par Chaabane et al. [59] pour les conditions climatiques de printemps dans une ville saharienne tunisienne de Tozeur. Les résultats ont montré que le système CPVT (Figure. 2.19) donne une efficacité électrique élevée par rapport au système CPV, en plus de son importante production thermique. En ce qui concerne l'effet du débit massique de l'eau, la meilleure performance électrique obtenue correspond aux valeurs du débit massique importantes. Cependant, la performance thermique est meilleure pour les valeurs faibles. Un modèle numérique CFD a été développé et validé par rapport aux résultats expérimentaux pour identifier les limites de ce système et prédire les améliorations possibles.

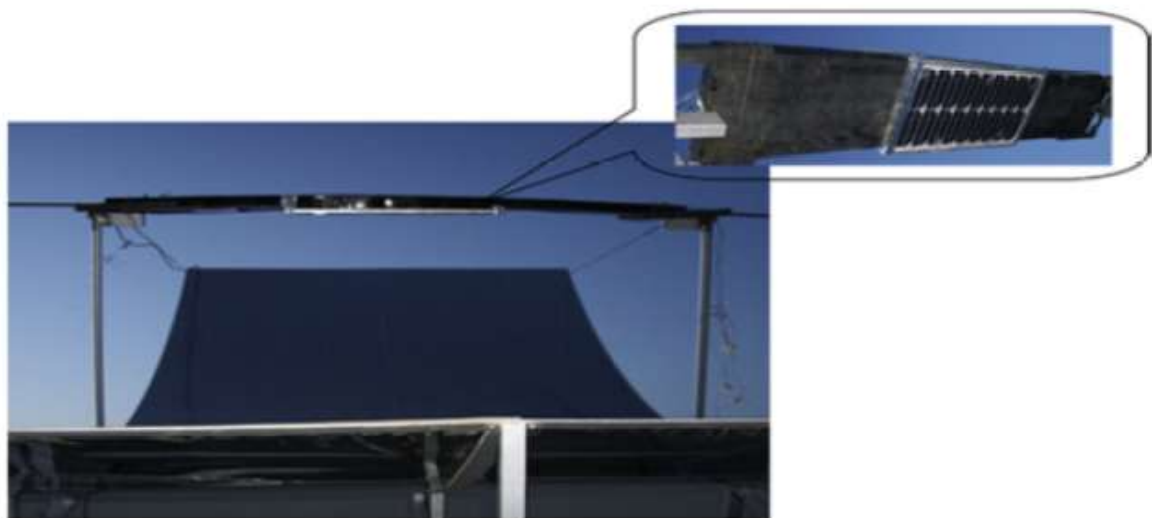


Figure. 2.19. Concentrateur CPVT [59].

Les performances électriques et thermiques d'un système CPVT (Figure 2.20) fonctionnant à Padoue (nord de l'Italie) sont étudiées expérimentalement par Del Col et al. [60]. Le système se déplace autour de deux axes et présente un rapport de concentration géométrique autour de 130 %. Pendant les essais, la température de l'eau d'entrée varie de 20 à 80 °C et le rendement thermique est obtenu à partir des mesures expérimentales (débit massique, différentes température et puissance électrique produite). Ces résultats sont utilisés pour évaluer un modèle numérique développé. Les résultats obtenus montrent que l'efficacité globale mesurée atteint 70%.



Figure 2.20. Prototype CPVT lors des essais à l'Université de Padoue [60].

2.4. Les capteurs solaires PV avec MCP (PV-MCP)

Les systèmes PV-MCP peuvent freiner l'augmentation rapide des températures des cellules PV pendant la journée et maintenir leur température pendant les heures de pointe du jour. Ce phénomène permet d'améliorer l'efficacité des cellules solaires et la production d'énergie électrique.

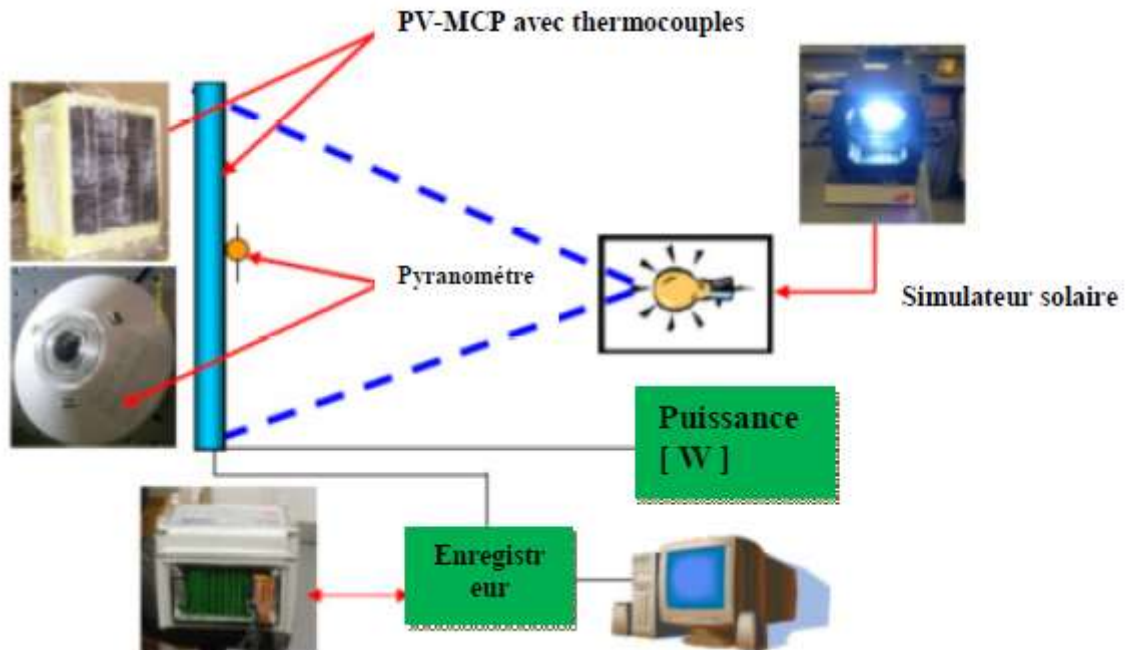


Figure 2.21. Schéma de la configuration expérimentale [61].

La régulation de la température des modules PV en utilisant des matériaux à changement de phase MCP (Figure 2.21) a été étudiée par Hasan et al. [61]. Cinq (05) MCP ont été sélectionnés pour leurs températures de fusion (25 ± 4 °C) et leurs chaleurs de fusion (comprise entre 140 et 213 kJ/kg). Des expériences ont été menées pour trois intensités solaires afin d'évaluer la performance de chaque MCP dans quatre systèmes PV-MCP différents. Une réduction de température maximale de 18 °C a été atteinte pendant 30 min, tandis qu'une réduction de température de 10 °C a été maintenue pendant 5 h pour un rayonnement solaire de 1000 W/m².

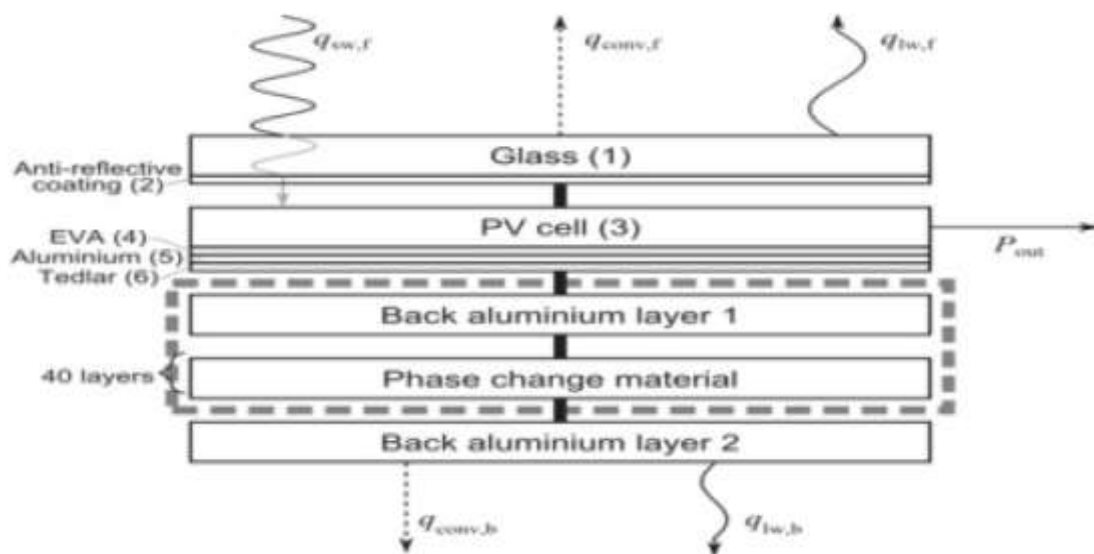


Figure 2.22. Schéma du PV-MCP [62].

Smith et al. [62] ont présenté une simulation numérique pour déterminer l'augmentation de la production d'énergie annuelle pour un système PV avec une couche de MCP intégrée, Figure 2.22. Le MCP agit comme un extracteur de chaleur et limite la température maximale de la cellule PV, augmentant ainsi l'efficacité. L'effet de la variation de la température de fusion du MCP a été étudié pour identifier la température de fusion optimale à chaque endroit. Le refroidissement renforcé par le MCP est plus efficace dans les régions à forte insolation.

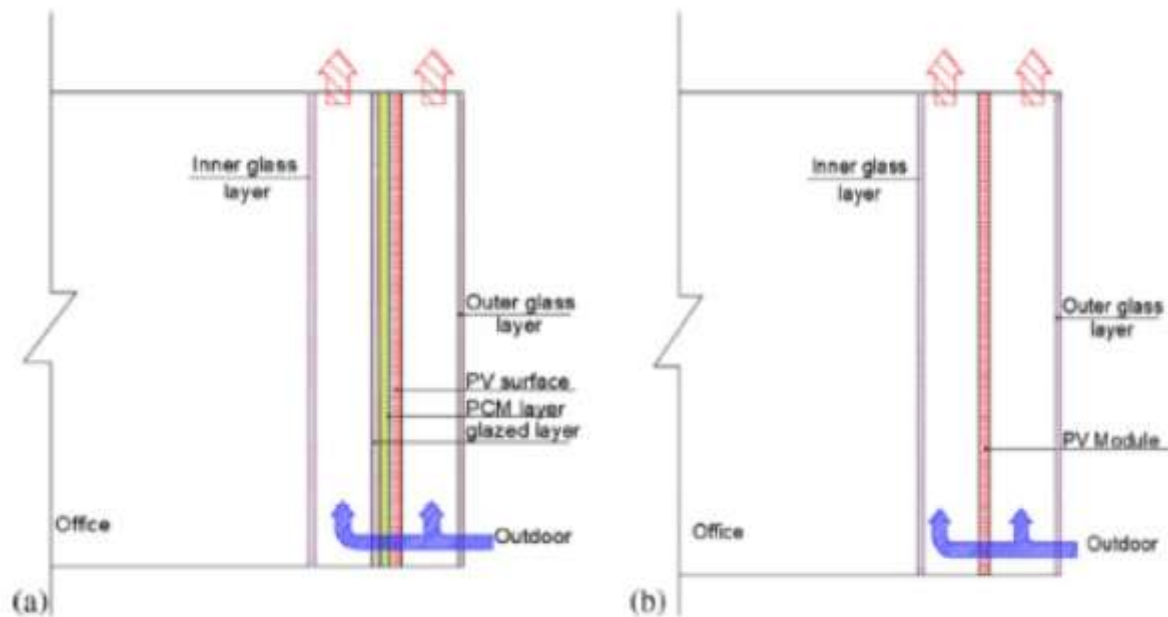


Figure 2.23. Bureau vitré intégré avec le module PV (a) avec MCP, (b) sans MCP [63].

Elarga et al. [63] ont développé un modèle mathématique pour étudier la performance d'un capteur PV-MCP intégrant une couche PV et une couche de MCP (Figure 2.23). Des simulations numériques sont réalisées pour différents climats (Venise, Helsinki et Abu Dhabi). Le système adopté permet de réduire la demande d'énergie de refroidissement mensuelle dans la plage de 20 à 30%. Ce résultat est particulièrement pertinent pour les climats chauds où les charges de refroidissement sont observées tout au long de l'année. L'amélioration en termes de charge de chauffage dans les endroits plus dominés par le froid est limitée. Le refroidissement du module PV entraîne une augmentation de l'énergie électrique convertie par le PV, avec des valeurs maximales d'amélioration comprises entre 5 et 8%.

2.5. Les capteurs solaires hybrides avec un MCP (PVT-MCP)

Preet et al. [64] ont étudié expérimentalement les performances thermiques et électriques de trois différents systèmes PV, à savoir, un panneau PV à convection, un système PVT à eau (Figure 2.24) et un système PVT-MCP à eau (Figure 2.25). Le système PVT à eau utilise un absorbeur à

double plaque. La plaque supérieure est fixée à un panneau PV et la seconde est fixée à des tubes en cuivre. Dans le système PVT-MCP à eau, la cire de paraffine RT-30 est utilisée comme MCP. L'expérience a été effectuée avec trois débits massiques différents 0,013, 0,023 et 0,031 kg/s pour étudier leurs effets sur l'efficacité électrique et thermique. Les résultats ont montré que l'efficacité électrique des systèmes PVT et PVT-MCP sont supérieures à celle du panneau PV à convection. L'augmentation moyenne de l'efficacité électrique est d'environ 23 % avec le système PVT et 30 % avec le système PVT/MCP.

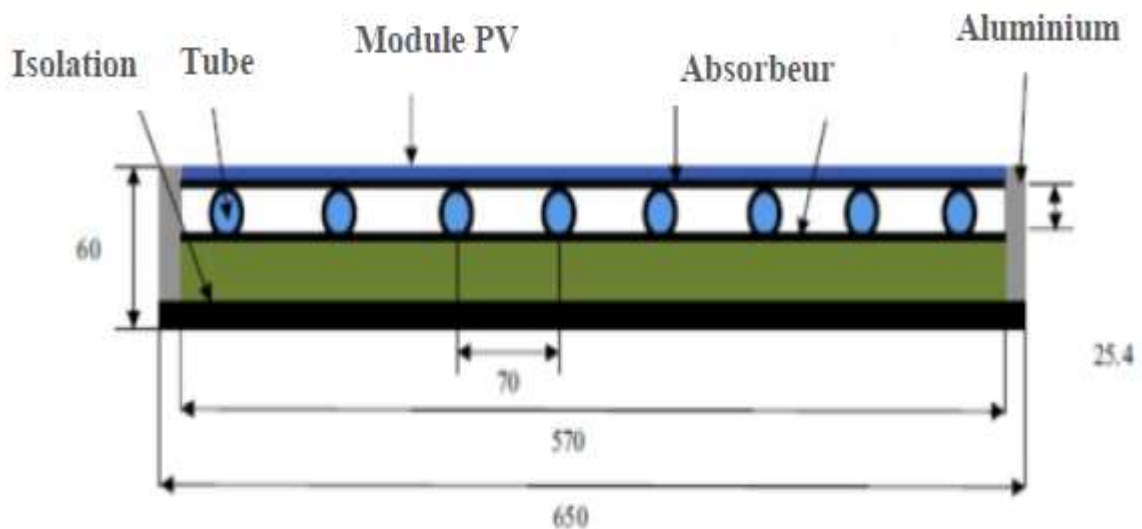


Figure 2.24. Schéma de principe du système PVT à base d'eau [64].

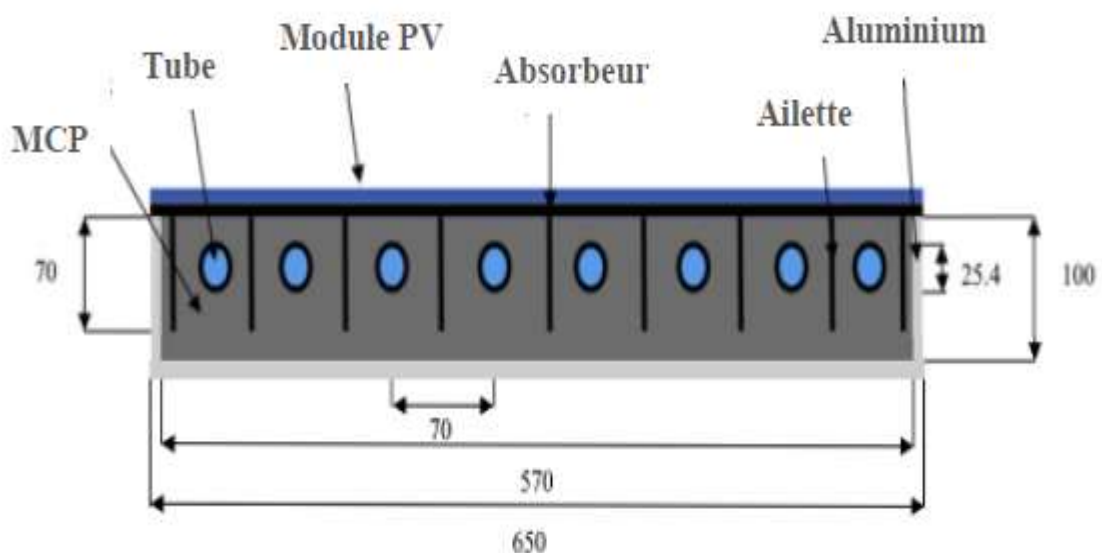


Figure 2.25. Schéma de principe du système PVT-MCP à base d'eau [64].

L'effet de l'utilisation simultanée d'un nano fluide ZnO/eau et d'un MCP pour le refroidissement d'un système PV est étudié expérimentalement par Sardar abadi et al. [65]. Les auteurs ont

monté deux systèmes, un PVT simple et un PVT-MCP (Figure 2.26). Les résultats obtenus (la température de surface et les efficacités thermique et électrique des systèmes à eau et à nano fluide) sont comparés avec ceux d'un module PV conventionnel. Les résultats montrent que le système à MCP/nano fluide augmente la puissance électrique moyenne avec plus de 13% par rapport à celle d'un module PV conventionnel. L'utilisation d'un nano fluide (au lieu de l'eau) a amélioré la production thermique moyenne de près de 5%. L'intégration du MCP a permis l'augmentation du rendement thermique avec près de 9%.

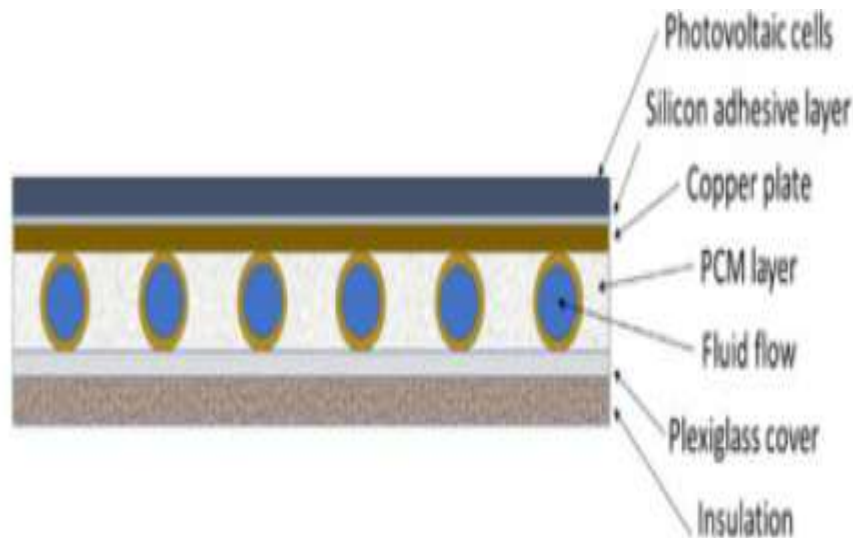


Figure 2.26. Système PVT-MCP [65].

2.6 Modèles mathématiques pour calculer les performances d'un capteur solaire hybride :

2.6.1. Calcul du débit massique de l'air :

$$\dot{m} = \rho * S * V \quad (3)$$

\dot{m} : Le débit massique [Kg/s].

ρ : La masse volumique de l'air $\rho = 1.293 \text{ kg/m}^3$

S : La section de passage de fluide caloporteur.

Calcul de la puissance utile :

L'énergie utile dérivée par les équations de Hottele Whilliere Bliss est donné par l'équation suivante : [66]

$$Q_u = \dot{m} C_p (T_s - T_e) \quad (4)$$

Q_u : La puissance utile [W].

\dot{m} : Le débit massique [Kg/s].

C_p : Capacité calorifique pour l'air, $C_p = 1005 \text{ J/Kg k}$

T_s : La température de sortie d'air [K].

T_e : La température d'entrée d'air [K].

Calcul du rendement thermique : [67]

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{I * A} \quad (5)$$

I : le rayonnement solaire [W/m^2].

A : la surface de la cellule photovoltaïque [m^2].

Puissance électrique :

La puissance d'une cellule photovoltaïque dépend du courant débité :

$$P = U * I_C \quad (6)$$

U : La tension en volt [V].

I_C : L'intensité du courant électrique en ampère [A].

P : la puissance en watt [W].

Calcul du rendement électrique :

$$\eta_{ele} = \frac{I_C * U}{I * A} \quad (7)$$

I : le rayonnement solaire [W/m^2].

A : la surface de la cellule solaire [m^2].

2.7. Objectif de la thèse :

Notre étude s'articule sur la résolution du problème de chauffage durant la période hivernale en utilisant une paroi solaire hybride sous forme d'un mur trombe. L'originalité dans cette étude se présente dans les points suivants :

- ✓ Etude élargie en 3D avec des conditions climatiques typiques de la ville de Tlemcen, en tenant compte de la course du soleil au cours de la journée.
- ✓ Etude de l'impact de l'insertion d'une fenêtre dans le domaine à étudier.
- ✓ Etude de l'impact de la subdivision de la serre de la paroi solaire hybride en plusieurs parties sur le comportement thermique de la pièce.
- ✓ Etude de l'impact de la paroi solaire hybride durant la période chaude de l'année.

Chapitre 03

Rayonnement solaire

3.1. Rayonnement solaire

La lumière dite naturelle du soleil est la source principale de lumière utilisée pour la conversion photovoltaïque (PV). Pour étudier les dispositifs photovoltaïques développés pour convertir cette énergie en électricité Il nous faut donc connaître et comprendre le rayonnement solaire terrestre (ayant traversé l'atmosphère).

Le soleil est une étoile de forme pseudo-sphérique composée de matière gazeuse, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium. Il est l'enceinte de réactions de fusion nucléaire permanentes et sa température de cœur atteint 10^7K . Le soleil Comme tout corps chaud, il va rayonner et c'est la portion du spectre émis arrivant à la surface de la terre qui nous intéresse. La densité de puissance à la surface du soleil peut être modélisée par la température d'un corps noir à environ 5780 K . L'intensité lumineuse par longueur d'onde d'un corps noir est donnée par la relation de Planck [66] :

$$F(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left[e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1 \right]} \quad (8)$$

Où :

- λ est la longueur d'onde de la lumière (m),
- T la température du corps noir (K),
- F est l'intensité lumineuse par longueur d'onde ($\text{W m}^2 \text{ nm}^{-1}$),
- h est la constante de Planck (Joules.s^{-1}),
- C'est la célérité de la lumière (m.s^{-1}) et k est la constante de Boltzmann (Joules.K^{-1}).

L'évolution de l'intensité lumineuse en fonction de la longueur d'onde est représentée dans la figure3.1.

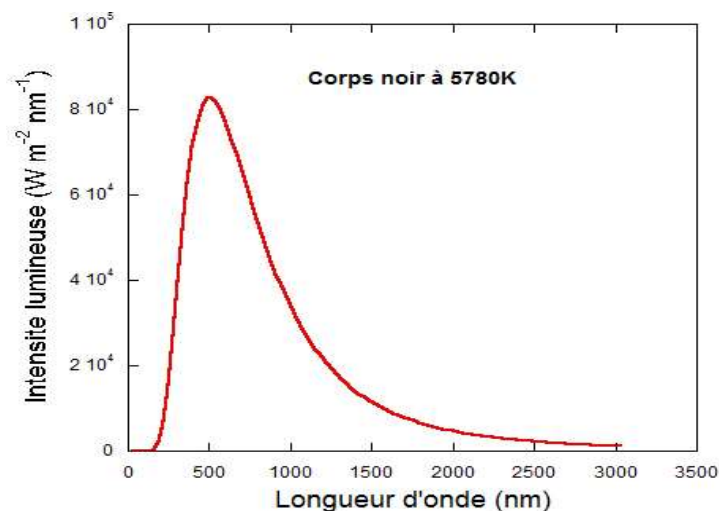


Figure.3.1 : Intensité lumineuse par longueur d'onde d'un corps noir à 5780 K en fonction de la longueur d'onde

Pour déterminer la densité de puissance totale d'un corps noir on intègre l'intensité lumineuse par longueur d'onde sur tout son spectre et peut être déduite par l'équation suivante :

$$H = \sigma T^4 \quad (9)$$

Où :

σ : la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$) et

T : la température du corps noir (K) Dans le cas de notre corps noir à 5780 K,

H : équivaut à $63\,288\,535 \text{ W m}^{-2}$.

Cette partie sera dédiée à l'étude des facteurs influençant le rayonnement solaire et à leurs impacts. Pour connaître le rayonnement solaire d'où on peut disposer d'un dispositif photovoltaïque en un site géographique donné, il faut tout d'abord pouvoir calculer le rayonnement solaire hors atmosphère terrestre. Ce dernier pris en considération les mouvements de la terre autour du soleil et se calcule en fonction de la date, de l'heure et de la localisation géographique du site considéré. L'estimation du flux lumineux après traversée de l'atmosphère est moins accessible car viennent de s'ajouter des phénomènes aléatoires tel que le passage de nuages ou une variation de la distribution de petites particules ou aérosols.

3.2. Trajectoire apparente du soleil dans l'espace local et rayonnement extraterrestre

Une trajectoire légèrement elliptique est décrite par la terre autour du soleil dont le soleil occupe un foyer et tourne sur elle-même autour d'un axe nord-sud incliné de $23^\circ 27'$ par rapport au plan de la trajectoire. Le soleil pour un observateur sur terre, aura donc une trajectoire apparente qui varie au cours de l'année et dont il est essentiel de connaître la position pour estimer son apport en énergie.

3.2.1. Les systèmes de coordonnées

On utilise habituellement deux systèmes de coordonnées pour repérer un astre, comme on peut le voir sur la Figure.3.2.

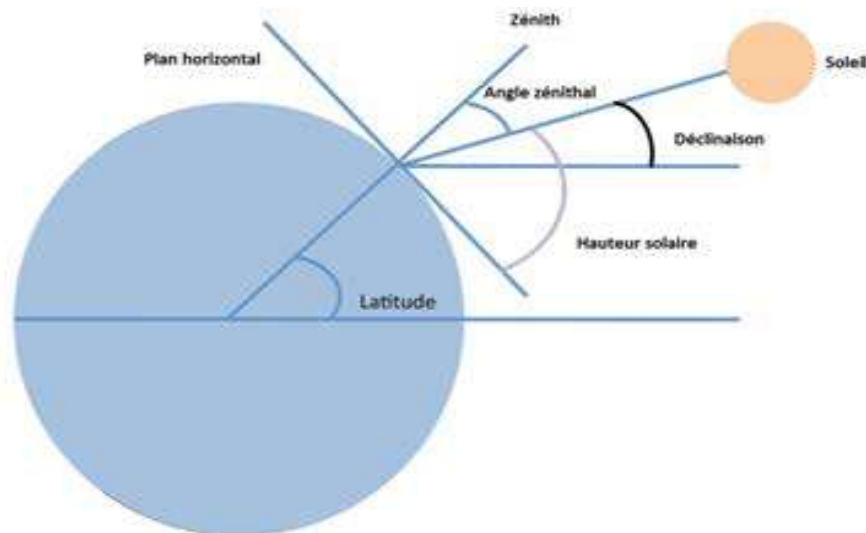


Figure 3.2. Systèmes de coordonnées pour repérer la position apparente du soleil

a. Le système de coordonnées horizontales

La figure 3.2 représente le système de coordonnées horizontales correspond à la vision qu'un observateur a du ciel, en un point donné sur la surface de la terre défini par sa longitude, sa latitude, φ , et son altitude. Le soleil est situé dans l'espace grâce à son azimut, ψ , (angle entre la direction nord-sud et la direction de l'objet) et sa hauteur solaire (hauteur angulaire au-dessus de l'horizon). L'angle zénithal, θ_z , est le complément de la hauteur solaire pour atteindre le zénith.

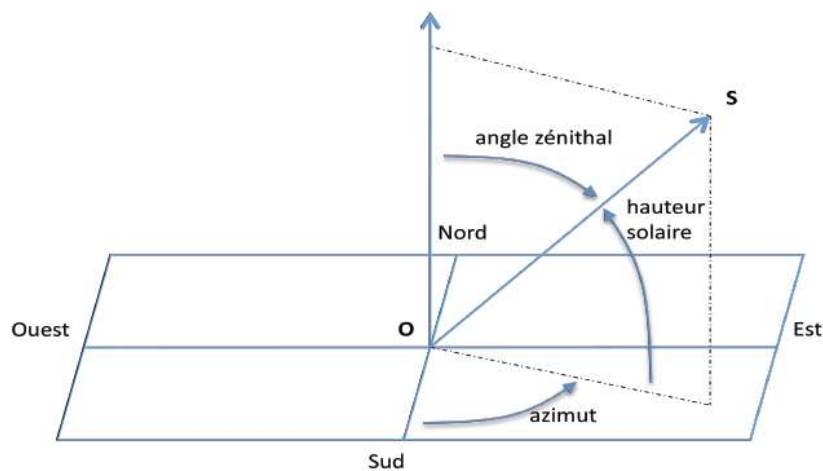


Figure 3.3. Système de coordonnées plan horizontales

b. Système de coordonnées équatoriales

Le système de coordonnées équatoriales est centré sur la terre elle-même (Figure 3.4). On fait repérer un astre grâce à sa déclinaison solaire, δ , (hauteur angulaire par rapport au plan équatorial) et à son angle horaire, ω , (angle sur le plan équatorial entre un méridien de référence et le méridien en face de l'astre observé).

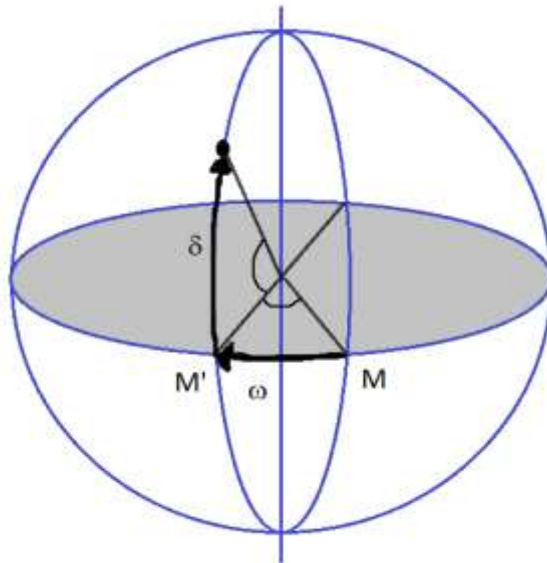


Figure 3.4. Système de coordonnées équatoriales

3.3. Le rayonnement à la surface de la terre

L'énergie lumineuse extraterrestre ne nous atteint pas intégralement car elle subit des transformations en traversant l'atmosphère terrestre. Pour cela, son intensité lumineuse ainsi que son spectre dépendent de la composition de l'atmosphère non seulement en particules et en gaz mais aussi des nuages.

La trajectoire des rayons sera plus ou moins longue dans l'atmosphère est ça en fonction de la position du soleil. En tenant en compte ce phénomène, on définit la masse d'air M_{air} , comme le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement solaire direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu, comme démontré sur la Figure.3.5.

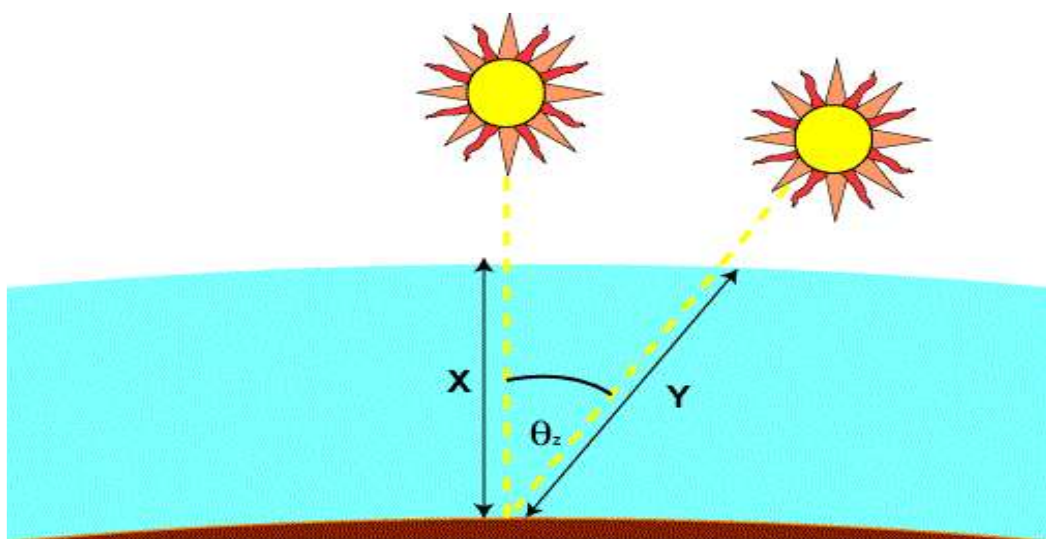


Figure 3.5. Représentation schématique de la quantité d'atmosphère traversée par les rayons solaires

$$M_{air} = \frac{X}{Y} = \frac{1}{\cos(\theta_z)} \quad (10)$$

Où θ_z est l'angle zénithal.

Réellement, en raison de la courbure de l'atmosphère, le calcul de la masse d'air traversée par la lumière lorsque le soleil est proche de l'horizon n'est pas correct. En outre, avec l'équation ci-dessus, M_{air} est infini lorsque l'angle zénithal est égal à 90° . En réalité ce n'est plus le cas et pour tenir compte de cette courbure et ainsi éviter la divergence de M_{air} au coucher du soleil on utilise la formule suivante [67] :

$$M_{air} = \frac{1}{\cos(\theta_z) + 0.20572 * (96.079695 - \theta_z)^{-1.6364}} \quad (11)$$

3.3.1. Le rayonnement électromagnétique du soleil

Le rayonnement solaire diminue par la contribution de différents éléments atmosphériques comme les molécules, les aérosols, les gaz, les gouttelettes nuageuses ou les cristaux de glace. Les particules d'aérosols diffusent et absorbent le rayonnement solaire à travers l'atmosphère. Les propriétés de diffusion et d'absorption dépendent de l'humidité de leur environnement et de leur composition chimique. Les principaux gaz absorbants du spectre solaire sont la vapeur d'eau, l'ozone, le dioxyde de carbone et l'oxygène. L'absorption de l'ozone s'avère dans les domaines du visible et de l'ultraviolet du spectre solaire, alors que la grande partie de la bande d'absorption de la vapeur d'eau et du dioxyde de carbone se trouve dans les domaines spectraux du proche infrarouge au rouge. En revanche, l'oxygène présente de petites bandes d'absorption dans le spectre visible. Les aérosols sont des particules solides ou liquides de diamètre allant de 10^{-4} à $10 \mu\text{m}$. Ces particules suspendues dans l'air peuvent avoir toutes les tailles y compris si elles sont formées à partir de la même substance. Par exemple, il peut y avoir de minuscules particules solides en suspension dans l'air et chaque cristal aura sa propre taille.

3.3.2. Les rayonnements directs, diffus et global

Selon ces phénomènes de diffusion, on divise la lumière reçue à la surface de la terre en différentes composantes, comme le montre la Figure 3.6 :

- ❖ **Le rayonnement direct** : Le rayonnement direct est le rayonnement solaire atteignant directement la surface terrestre depuis le soleil. Il dépend de l'épaisseur de l'atmosphère que la radiation solaire doit traverser et de l'inclinaison des rayons par rapport au sol. Le pyréliomètre est l'instrument qui permet de mesurer l'intensité du rayonnement direct.

- ❖ **Le rayonnement diffus** : Le rayonnement diffus se manifeste lorsque le rayonnement solaire direct se disperse dans les nuages et les particules atmosphériques. Le rayonnement diffus résulte de la diffraction de la lumière par les nuages et les molécules diverses en suspension dans l'atmosphère, et de sa réfraction par le sol. Il s'agit donc d'un rayonnement qui ne suit pas une direction définie par le soleil en direction du point d'observation à la surface de la Terre.
- ❖ **L'albedo** : L'albédo du système Terre-atmosphère est la fraction de l'énergie solaire qui est réfléchie vers l'espace. Sa valeur est comprise entre 0 et 1. Plus une surface est réfléchissante, plus son albédo est élevé. Les éléments qui contribuent le plus à l'albédo de la Terre sont les nuages, les surfaces de neige et de glace et les aérosols. Par exemple, l'albédo de la neige fraîche est de 0,87, ce qui signifie que 87 % de l'énergie solaire est réfléchie par ce type de neige.
- ❖ **Le rayonnement global** : C'est la somme des trois composantes citées ci-dessus. C'est ce dernier qui est systématiquement mesuré par les stations météorologiques.

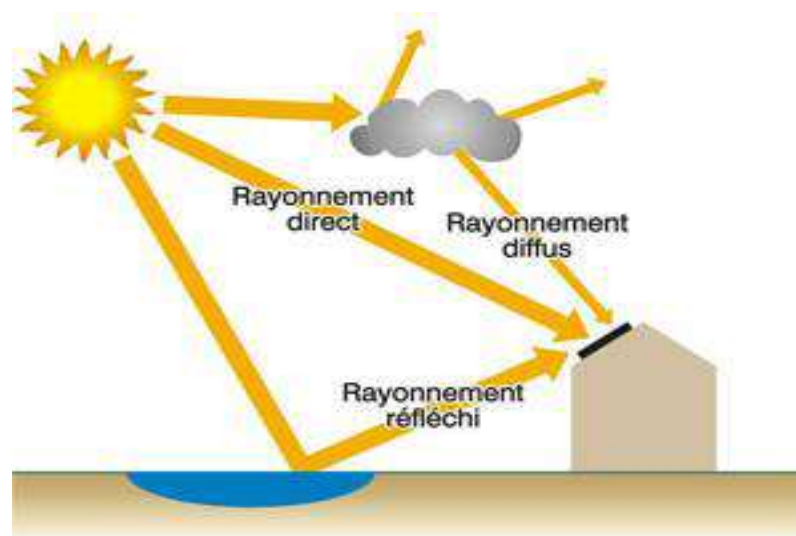


Figure.3.6. Les différentes composantes du rayonnement solaire

3.3.3. Les normes pour l'application et l'exploitation des données météorologiques pour le PV :

Dans le cadre de la surveillance de la qualité des plateformes déjà installées et en fonctionnement, des normes ont été établies. Tous les paramètres descriptifs des systèmes photovoltaïques autonomes sont définis dans La norme IEC 61194 [68]. La norme IEC 61724 [69] contient des recommandations quand à l'installation et l'exploitation de matériel permettant

la mesure, le transfert et l'analyse de données de systèmes PV. Pour pouvoir étudier les performances électriques de différentes installations PV il faut tenir compte les paramètres suivants : L'intensité lumineuse dans le plan du module, la température ambiante et la vitesse du vent pour la météorologie.

Pour les modules PV : le courant, la tension et la puissance de sortie, sa température de fonctionnement, son angle d'inclinaison et son orientation

a. La mesure d'éclairement

L'éclairement est le flux de chaleur surfacique reçu du soleil. Il doit être mesuré dans le plan le plus proche possible des modules PV. La sonde d'éclairement doit avoir une précision de mesure égale ou supérieure à 5%.

b. La mesure de température ambiante

La mesure de température ambiante s'effectue à proximité de la plateforme là où on a l'installation PV et l'incertitude ne doit pas dépasser 1 °C.

c. La mesure de vitesse du vent

La mesure de la vitesse du vent doit s'effectuer à proximité de la plateforme et à une hauteur correspondante à celle des modules PV.

3.4. Cellule photovoltaïque :

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photo voltaïque, a été découverte par E. Becquerel en 1839, mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique. L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante dans le domaine spatial. Les recherches d'après-guerre ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille mais il faudra attendre la crise énergétique des années septante pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque et ses applications terrestres.

Le rôle des cellules solaires est de convertir directement le rayonnement lumineux (rayonnement électromagnétique provenant du soleil ou autre) en électricité. Elles s'appuient pour cela sur le phénomène photovoltaïque. Le phénomène peut être décomposé en trois catégories :

- L'absorption de la lumière dans le matériau,
- Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques

- La collecte des charges.

3.4.1. Le principe de la conversion photovoltaïque

On va rappeler dans cette partie brièvement le principe de la conversion photovoltaïque. Tout rayonnement électromagnétique, y compris le rayonnement solaire, est composé de particules énergétiques appelées photons. Un photon est caractérisé par sa longueur d'onde et donc son énergie selon la relation (5), peut-être, soit transmis, soit réfléchi, soit absorbé, lorsqu'il rencontre un matériau.

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (12)$$

Où :

h : la constante de Planck ($\text{m}^2 \text{kg s}^{-1}$), c : la célérité de la lumière (m s^{-1}) et λ la longueur d'onde du photon (m).

Le rayonnement solaire (lumineux) est composé de plusieurs couleurs (photons d'énergies différentes) aura donc une plage de longueurs d'onde. Par conséquent, le spectre lumineux sera décomposé en trois parties, une partie sera transmise, une partie réfléchie et une autre partie absorbée lorsque la lumière rencontrera le matériau :

❖ La partie réfléchie dépend de l'indice de réfraction (n) des matériaux traversés qui dépend lui-même de la longueur d'onde du rayonnement mais aussi des caractéristiques du milieu. Le coefficient de réflexion à l'interface entre deux matériaux d'indice n_1 et n_2 respectivement, s'écrit comme suit :

$$R = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2} \quad (13)$$

Par exemple le silicium a un indice entre 3 et 4, ce qui correspond à un coefficient de réflexion compris entre 0.25 et 0.36, s'il était en contact direct avec l'air ($n = 1$). Pour diminuer la partie réfléchie du rayonnement incident plusieurs couches, d'indices intermédiaires, sont placées entre l'air et le silicium.

❖ La partie absorbée : est celle qui va transformer l'énergie lumineuse en électricité. La lumière est absorbée par le matériau suivant la loi de Beer-Lambert :

$$E = E_{inc} \times \exp(-\alpha d) \quad (14)$$

Chapitre 03 : Rayonnement solaire

E_{inc} : l'intensité lumineuse incidente ($W m^{-2}$), α : C'est le coefficient d'absorption (cm^{-1}) et d : C'est l'épaisseur traversée (cm).

❖ La partite transmise : correspond aux photons qui traversent le matériau sans interaction, leur énergie étant trop faible, le matériau est transparent pour ces photons.

Dans notre étude nous nous intéresserons tout particulièrement au phénomène d'absorption car c'est grâce à lui qu'une partie de chaleur générée va-t-êtré utilisée pour le chauffage du local et une partie aussi du flux lumineux sera restituée sous forme d'électricité.

3.4.2. Dopage et silicium

Dans un semi-conducteur pur le nombre de porteurs étant faible à température ordinaire, la conductivité est médiocre.

Le silicium a été choisi pour réaliser les cellules solaires photovoltaïques pour ses propriétés électroniques, il est caractérisé par la présence de quatre électrons sur sa couche périphérique. Dans le silicium solide, chaque atome est lié à quatre voisins, et tous les électrons de la couche périphérique participent aux liaisons. Si un atome de silicium est remplacé par un atome ayant 5 électrons périphériques (phosphore par exemple), un électron ne participe pas aux liaisons, il peut donc se déplacer dans le réseau. Il y a conduction par un électron, et le semi-conducteur est dit doper N.

Si au contraire un atome de silicium est remplacé par un atome ayant 3 électrons périphériques (bore par exemple), il manque un électron pour réaliser toutes les liaisons, et un électron peut venir combler ce manque. On dit alors qu'il y a conduction par un trou et le semi-conducteur est dit dopé de type P.

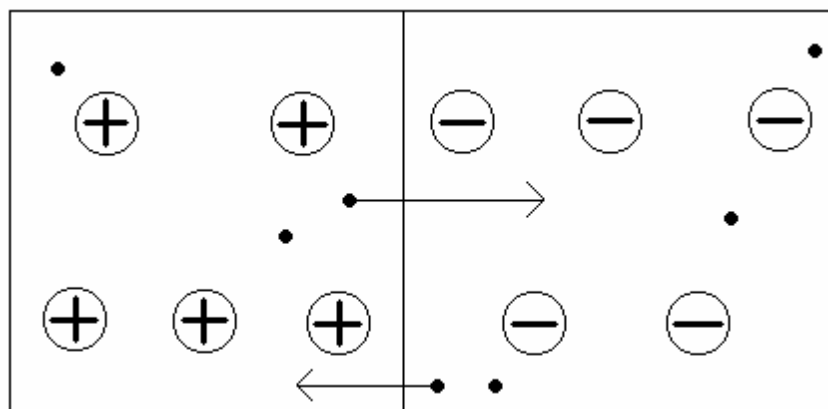


Figure 3.7 : Les atomes tels que le bore ou le phosphore sont des dopants du silicium.

3.4.3. L'absorption de la lumière dans le matériau

Un faisceau lumineux est un déplacement de petits corps porteurs d'énergie. On les appelle aussi photons. Pour que ces photons puissent circuler dans un matériau, il leur faut un support, une onde électromagnétique. Comme la lumière du rayonnement solaire est la combinaison de plusieurs couleurs de lumières, donc de plusieurs ondes électromagnétiques, on parle alors de longueur d'onde. Ainsi, chaque photon porte une quantité d'énergie directement liée à sa longueur d'onde.

3.4.4. Le transfert de l'énergie des photons aux charges électriques :

A température nulle, c'est à dire quand il n'y a aucune agitation thermique, aucun électron du semi-conducteur ne peut se déplacer. A température ambiante, parce que les constituants (atomes, électrons) du solide s'agitent, quelques électrons sont éjectés de leur place douillette. Ils laissent cette place vacante et on appelle ça un trou. On dit qu'on a créé un pair "électron déplaçable-trou" parce que dès qu'on a un électron déplaçable, on a aussi un trou. On dira par la suite "paire électron-trou".

Quand la lumière pénètre dans un semi-conducteur, ses photons apportent l'énergie permettant aux électrons de se déplacer et ainsi créer un courant électrique.

3.5. Différents types de cellules solaires

Sur le plan technologique, plusieurs types de cellules solaires sont distingués :

3.5.1. Cellules solaires au silicium : Le silicium est le matériau de base des photopiles. C'est le deuxième élément en terme de nature (le sable et le quartz en contiennent). Il existe trois catégories principales de photopiles au silicium :

❖ **Cellules monocristallines :** Elles sont considérées comme la première génération de photopile, elles ont un taux de rendement excellent [70] (12 – 16% et jusqu'à 24 % en laboratoire) mais leur méthode de production est laborieuse et délicate, et donc, très chère ; il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur.

❖ **Cellules poly-cristallines :** Elles ont un coût de production moins élevé et un rendement qui varie entre 11 – 13% (autour de 18 % en laboratoire) [70].

❖ **Cellules amorphes :** Leur coût de production bien plus bas, mais malheureusement aussi, ont un rendement plus bas qui varie entre 8 – 10 % (autour de 13 % en laboratoire pour une cellule non dégradée) [71].

Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium de 0.3 à 1.0 nanomètre seulement (500 nanomètres pour les deux autres types). On peut donc appliquer de très fines

couches de silicium amorphe sur des vitres, du métal, voir du plastique souple par un procédé de vaporisation sous vide. C'est le silicium amorphe que l'on trouve le plus souvent dans les petits produits de consommation comme les calculatrices, les montres, ... Les panneaux amorphes ont besoin d'environ deux fois plus de surface (comparé aux panneaux cristallin) pour produire la même quantité d'électricité, et semblent se dégrader plus rapidement, mais ils ont l'avantage de mieux réagir à la lumière diffuse et à la lumière fluorescente et d'être plus performants à des températures élevées [72].

3.5.2. Cellules solaires à couche mince :

On distingue plusieurs technologies parmi lesquelles :

❖ **Cadmium-tellure (CdTe) :**

Rendement 10.5 % (15.8 % en laboratoire). Haute absorption, mais n'oublions pas que le cadmium est très toxique [73].

❖ **Gallium Arsenic (Cuivre-indium-di sélénium (CIS) ou cuivre-indium-gallium sélénium (CIGS) :** Leur rendement est égal à 11 % (17.1 % au laboratoire). 99 % d'absorption, dégradation minime, mais fabrication très délicate [73].

❖ **(GaAs) :** leur rendement dépasse les 25 % en laboratoire [73].

Ces cellules, dont le prix est très élevé, sont très appréciées dans l'aérospatiale. Leurs principaux avantages sont : une absorption très élevée. Ces cellules ne pas épaisses, ce qui traduit un gain en volume et en masse pour les sondes sur lesquelles le moindre gramme superflu est traqué. Leur puissance est, par rapport aux cellules simples au silicium, peu affectée par les augmentations de température que les sondes peuvent rencontrer.

3.5.3. Cellules solaires organiques :

Le solaire organique est considéré comme une nouvelle technologie basée sur les colorants et leurs propriétés physiques et en particulier optiques [73].

3.6. Cellules photovoltaïques semi-transparente :

La société américaine **MiaSolé Hi-Tech** et l'initiative européenne de R&D **Solliance Solar Research** ont réalisé une **cellule solaire flexible** empilant une cellule solaire à **pérovskite semi-transparente** sur une **cellule en technologie CIGS**. L'ensemble affiche un rendement de conversion de 23%.

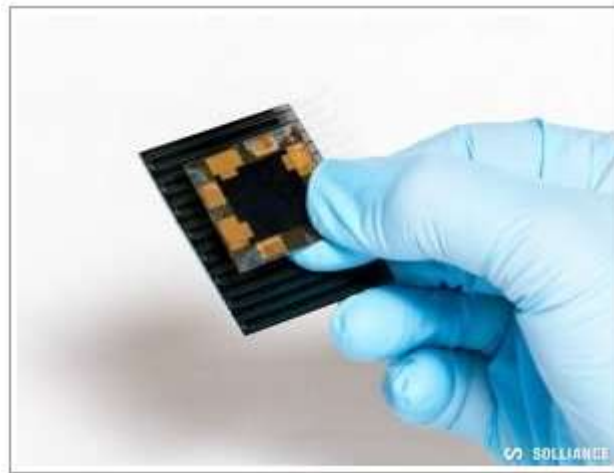


Figure 3.8 : Cellule en pérovskite semi-transparente

La combinaison des deux technologies à couches minces (et flexibles), dont l'une à pérovskite est de plus semi-transparente, offre un potentiel d'efficacité supérieur à celle des cellules solaires à jonction unique. L'efficacité optimale peut être obtenue en jouant sur les propriétés complémentaires d'absorption du spectre solaire des deux cellules. La cellule solaire à pérovskite a été empilée sur un substrat transparent et souple et dotée d'électrodes transparentes puis optimisée pour une efficacité maximale de la conversion de la lumière visible et la transparence au rayonnement infrarouge afin que ce dernier puisse atteindre la cellule CIGS.

La technologie CIGS est connue pour sa courbe d'apprentissage en termes de records de rendement de conversion et sa stabilité. Elle est désormais industrialisée et en production de volume dans plusieurs usines dans le monde, et permet de réaliser des cellules solaires de haut rendement, souples et de faible poids. Elle est notamment adaptée à des applications inaccessibles aux panneaux photovoltaïques rigides.

La technologie des cellules solaires à pérovskite a été développée plus récemment mais a déjà prouvé son potentiel en termes de rendement de conversion. Elle permet la réalisation de solutions de faible coût. La combinaison des deux ouvre la voie pour aboutir à une technologie solaire de hautes performances, flexible et personnalisable.

La cellule solaire CIGS de basse a été développée par **MiaSolé Hi-Tech**, qui a récemment dévoilé avoir atteint un rendement de conversion de 17,44% pour un module de grandes dimensions et d'une surface de 1,08 m². Le savoir-faire de Solliance dans les cellules solaires à pérovskite a permis d'aboutir aux récents développements. « D'autres améliorations au niveau de l'optimisation spectrale ainsi que sur le rendement de la cellule CIGS devraient permettre de passer nettement au-dessus de 23% », souligne Dmitry Poplavskyy, directeur technologique au sein de MiaSolé Hi-Tech.

3.7. Solutions pour protéger une cellule solaire :

- Les panneaux (ensembles des cellules solaires) sont protégés dans leur face extérieure avec verre tempéré qui permet de supporter des conditions météorologiques très dure comme la glace, les changements brusques de température.
- Le vitre de protection réduit un peu la production du panneau solaire, il est collé ça permet au panneau de se refroidir par conduction par la face avant a peu près aussi bien que sans la vitre supplémentaire ; mais n'est pas la solution simple.
- Système de refroidissement :

La température intérieure d'un panneau solaire peut facilement atteindre 150°. En conséquence, la température intérieure du panneau ne dépasse j'aimais 75°C même si le système est éteint.

Le système de refroidissement est automatique, avec des ventilateurs qui nous à permit de placer la cellule PV à l'intérieure du panneau, placée derrière une couche plastique robuste qui la protège contre les jets de pierre. La cellule PV produit sa propre chaleur, ce qui augmente le rendement de panneau.

La technologie photovoltaïque est en plein essor. Aux quatre coins du monde, de nombreuses possibilités d'exploitation sont étudiées puis expérimentées dans l'espoir d'une commercialisation future.

Toutefois, les prévisions de baisse des prix des modules photovoltaïques ont été trop optimistes et l'industrie photovoltaïque se trouve dans une situation difficile. En effet, la complexité des procédés de fabrication des modules photovoltaïques et les rendements de production trop faibles entraînent des coûts élevés qui freinent le volume des ventes. On peut espérer que, dans les années à venir, la technologie photovoltaïque arrive à "maturité" (procédés simplifiés, meilleurs rendements de production) et qu'alors l'augmentation du volume de production réduise le coût des modules.

En dépit de ces difficultés, l'évolution de la technologie et du marché photovoltaïques est globalement positive. Les méthodes de fabrication se sont améliorées réduisant les coûts de production et les volumes de production ont été augmentés dans l'espoir de réduire les coûts. Actuellement, 90% de la production totale de modules se fait au Japon, aux EU et en Europe.

3.8. Système photovoltaïque

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). Les

connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, connectées en série pour des applications en 12 V. Le courant de sortie, et donc la puissance, sera proportionnelle à la surface du module.

L'interconnexion de modules entre eux - en série ou en parallèle - pour obtenir une puissance encore plus grande, définit la notion de champ photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs. Cet ensemble, appelé aussi "Balance of System" ou BOS, comprend tous les équipements entre le champ de modules et la charge finale, à savoir la structure rigide (fixe ou mobile) pour poser les modules, le câblage, la batterie en cas de stockage et son régulateur de charge, et l'onduleur lorsque les appareils fonctionnent en courant alternatif.

Le système photovoltaïque est alors l'ensemble du générateur photovoltaïque et des équipements de consommation.

3.8.1. Avantages et inconvénient

a. Avantages :

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages.

✓ D'abord, une haute fiabilité - elle ne comporte pas de pièces mobiles - qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

✓ Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliWatt au MégaWatt.

✓ Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.

✓ Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

b. Inconvénients

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients.

✓ La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

✓ Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).

✓ Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.

Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

3.9. Loi de Beer, épaisseur optique :

On considère du rayonnement incident avec un angle θ sur une couche d'air horizontale (figure 3.8). On s'intéresse uniquement à l'extinction progressive du rayonnement par absorption ou diffusion, on néglige l'apport par diffusion depuis d'autres directions ou l'émission. La convention de signe adoptée est cohérente avec du rayonnement incident au sommet de l'atmosphère se propageant vers des altitudes z décroissantes.

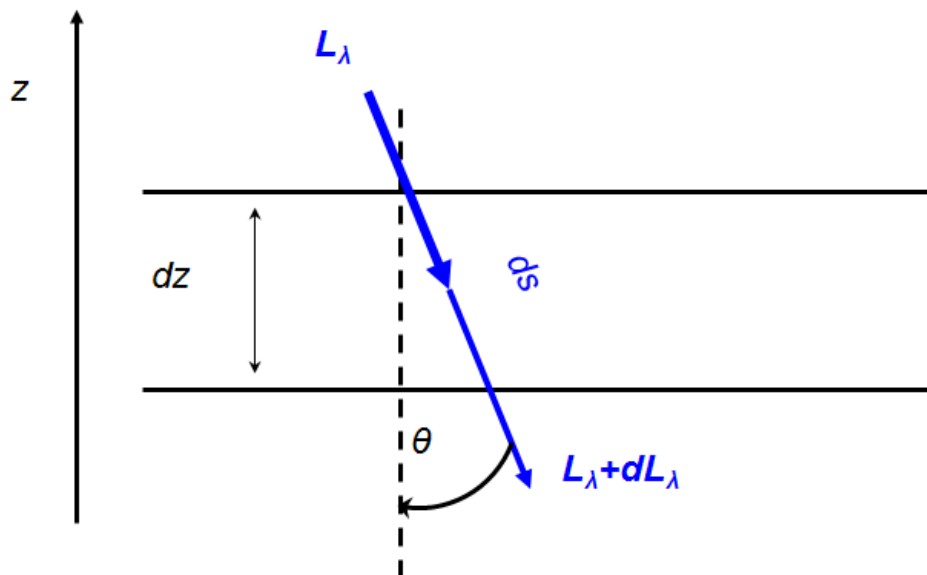


Figure 3.9 : Variation du rayonnement incident avec un angle θ sur une couche d'épaisseur dz

La distance parcourue par le rayonnement à travers une fine couche d'épaisseur d_z vaut :

$d_s = -\mu d_z$, où $\mu = 1/\cos\theta$ et on a :

$$dL_\lambda = L_\lambda \rho_a K_\lambda \mu dz \quad (15)$$

où K_λ est un coefficient d'absorption massique et ρ_a est la densité d'absorbant. Cette relation peut être intégrée sur une couche épaisse. On obtient :

$$L_\lambda(Z_1) = L_\lambda(Z_2) e^{-\mu\tau_\lambda} \quad (16)$$

$$\tau_\lambda = \int_{z_1}^{z_2} K_\lambda \rho_a dz \quad (17)$$

τ_λ : Est l'épaisseur optique de la couche comprise entre z_1 et z_2 . L'épaisseur optique donne l'extinction d'un pinceau lumineux dirigé vers le bas ($\theta = 0$), elle doit être corrigée de l'angle d'incidence qui impose un chemin optique plus grand pour une même différence d'altitude.

Si l'extinction est uniquement due à de l'absorption, on a une relation directe entre l'épaisseur optique et le coefficient d'absorption de la couche :

$$a_\lambda = 1 - e^{-\mu\tau_\lambda} \quad (18)$$

3.10. Choisir un modèle de rayonnement :

Pour certains problèmes, un modèle de rayonnement peut être plus approprié que les autres.

Avant de choisir le modèle de rayonnement à utiliser il faut tenir compte des points suivants :

- Épaisseur optique : L'épaisseur optique αL (α : coefficient d'absorption) est un bon indicateur du modèle à utiliser dans votre problème. Ou L est la longueur du domaine à étudier. Pour l'écoulement dans une conduite de combustion, par exemple, L est le diamètre de la chambre de combustion. Si $\alpha L \gg 1$, vos meilleures alternatives sont les modèles P-1 et Rosseland. Le modèle P-1 doit généralement être utilisé pour des épaisseurs optiques > 1 . Pour une épaisseur optique > 3 , le modèle Rosseland est le moins cher et le plus efficace. Le modèle DTRM et le modèle DO fonctionnent sur toute la gamme des épaisseurs optiques, mais leur utilisation est nettement plus coûteuse. Vous devriez donc utiliser les modèles à limites minces, P-1 et Rosseland, si le problème le permet. Pour les problèmes optiquement minces ($\alpha L < 1$), seuls le modèle DTRM et le modèle DO sont appropriés.
- Diffusion et émissivité : les modèles P-1, Rosseland et DO tiennent compte de la diffusion, tandis que le DTRM la néglige. Étant donné que le modèle Rosseland utilise une condition de glissement de température sur les murs, il est insensible à l'émissivité des murs.

- Effets des particules : seuls les modèles P-1 et DO tiennent compte de l'échange de rayonnement entre le gaz et les particules.
- Milieux semi-transparents et frontières spéculaires : seul le modèle DO permet la réflexion spéculaire (par exemple, pour les miroirs) et le calcul du rayonnement dans les milieux semi-transparents tels que le verre.
- Rayonnement non gris : seul le modèle DO vous permet de calculer le rayonnement non gris à l'aide d'un modèle à bande grise.
- Sources de chaleur localisées : En cas de problèmes avec des sources de chaleur localisées, le modèle P-1 peut surestimer les flux radiatifs. Le modèle DO est probablement le mieux adapté pour calculer le rayonnement dans ce cas, bien que le DTRM, avec un nombre de rayons suffisamment important, soit également acceptable.
- Transfert radiatif en enceinte avec des milieux non participants : Le modèle surface-surface (S2S) convient à ce type de problème. Les modèles de rayonnement utilisés avec les milieux participants peuvent, en principe, être utilisés pour calculer le rayonnement de surface à surface, mais ils ne sont pas toujours efficaces.

3.10.1. Rayonnement externe :

Si vous devez inclure le transfert de chaleur radiatif de l'extérieur de votre modèle physique, vous pouvez inclure une condition aux limites de rayonnement externe dans votre modèle. Si vous n'êtes pas concerné par le rayonnement dans le domaine, cette condition aux limites peut être utilisée sans activer l'un des modèles de rayonnement.

3.10.2. Avantages et limites du model DTRM (Direct Transfert Radiation Model) :

Les principaux avantages du model DTRM sont :

- Il s'agit d'un modèle relativement simple.
- Vous pouvez augmenter la précision en augmentant le nombre de rayons
- Il s'applique à une large gamme d'épaisseurs optiques.

Vous devez être conscient des limitations suivantes lors de l'utilisation du DTRM dans FLUENT :

- ❖ Le DTRM suppose que toutes les surfaces sont diffuses. Cela signifie que la réflexion du rayonnement incident à la surface est isotrope par rapport à l'angle solide.
- ❖ La mise en œuvre suppose un rayonnement gris.
- ❖ La résolution d'un problème avec un grand nombre de rayons nécessite un pc haut performance.

3.10.3. Avantages et limites du modèle P-1 :

Le modèle P-1 présente plusieurs avantages par rapport au DTRM. Pour le modèle P-1, le RTE (Radiation Transfert Equation) est une équation de diffusion, qui est facile à résoudre avec un CPU moyen performance. Le modèle inclut l'effet de la diffusion. Pour les applications de combustion où l'épaisseur optique est importante, le modèle P-1 fonctionne raisonnablement bien. De plus, le modèle **P-1** peut facilement être appliqué à des géométries complexes avec des coordonnées curvilignes.

Vous devez être conscient des limitations suivantes lors de l'utilisation du modèle de rayonnement P-1 :

- ❖ Le modèle P-1 suppose que toutes les surfaces sont diffuses. Cela signifie que la réflexion du rayonnement incident à la surface est isotrope par rapport à l'angle solide.
- ❖ La mise en œuvre suppose un rayonnement gris.
- ❖ Il peut y avoir une perte de précision, selon la complexité de la géométrie, si l'épaisseur optique est faible.
- ❖ Le modèle P-1 a tendance à surestimer les flux radiatifs provenant de sources de chaleur.

3.10.4. Avantages et limites du modèle Rosseland :

Le modèle Rosseland présente deux avantages par rapport au modèle P-1. Puisqu'il ne résout pas une équation de transport supplémentaire pour le rayonnement incident (comme le fait le modèle P-1), le modèle Rosseland est plus rapide que le modèle P-1 et nécessite moins de mémoire.

Le modèle Rosseland ne peut être utilisé que pour des supports optiquement épais. Il est recommandé pour une utilisation lorsque l'épaisseur optique dépasse 3. Notez également que le modèle Rosseland n'est pas disponible lorsque l'un des solveurs couplés est utilisé ; il n'est disponible qu'avec le solveur séparé.

3.10.5. Avantages et limites du modèle DO (Discrete Ordinate) :

Le modèle DO s'étend sur toute la gamme des épaisseurs optiques et vous permet de résoudre des problèmes allant du rayonnement de surface à surface au rayonnement participant aux problèmes de combustion. Il permet également la solution de rayonnement dans des milieux semi-transparents. Le coût de calcul est modéré pour les discrétisations angulaires typiques et les besoins en mémoire sont indispensables.

3.10.6. Avantages et limites du modèle S2S :

Le modèle de rayonnement de surface à surface est bon pour modéliser le transfert radiatif dans une enceinte sans milieu participant (par exemple, le système de rejet de chaleur des engins spatiaux, les systèmes de capteurs solaires, etc...). Par rapport au modèle de rayonnement DTRM et DO, le modèle S2S a un temps par itération beaucoup plus rapide, bien que le calcul du facteur de vue nécessite un PC avec un fort CPU.

Vous devez être conscient des limitations suivantes lors de l'utilisation du modèle de rayonnement S2S :

- ❖ Le modèle S2S suppose que toutes les surfaces sont diffuses.
- ❖ La mise en œuvre suppose un rayonnement gris.
- ❖ Les besoins en stockage et en mémoire augmentent très rapidement à mesure que le nombre de faces de surface augmente. Cela peut être minimisé en utilisant un cluster de faces de surface, bien que le temps de calcul soit indépendant du nombre de clusters utilisés.
- ❖ Le modèle S2S ne peut pas être utilisé pour modéliser les problèmes de rayonnement participants.
- ❖ La méthode de regroupement de surfaces ne fonctionne pas avec les maillages dynamiques ou les nœuds suspendus.
- ❖ Le modèle S2S ne peut pas être utilisé si votre modèle contient des conditions aux limites périodiques ou de symétrie.
- ❖ Le modèle S2S ne peut pas être utilisé avec des géométries axisymétriques 2D.
- ❖ Le modèle S2S ne peut pas être utilisé pour les modèles avec plusieurs compartiments. Seules les géométries simples peuvent être traitées à l'aide du modèle S2S.

Chapitre 04

Gisement solaire en Algérie

4.1 Réseau météorologique Algérien

La mesure du rayonnement solaire en Algérie est réalisée par l'Office National de la Météorologie (O.N.M) à travers son réseau constitué de quatre-vingt-un (81) stations météorologiques mesurant la durée d'insolation. Parmi celles-ci, seules sept (07) stations ont assuré entre les années 1970 et 1989 la mesure des composantes diffuses et globales reçues sur le plan horizontal. De plus, ces séries de mesures comportent des données manquantes causées par des périodes plus ou moins longues de non fonctionnement des appareils de mesure, les coordonnées géographiques des stations météorologiques (voir Annexe A). Les informations récoltées en 2011 indiquaient que seules trois (03) stations à savoir Oran, Tamanrasset et Ksar Chellala assuraient d'une manière régulière la mesure du rayonnement solaire sur le plan horizontal. Huit (08) autres stations automatiques mesurent le rayonnement depuis 2009 et qui sont : Alger (aéroport), Oran (Sénia), In amenas, Ghardaïa, Annaba, Tamanrasset, Tlemcen et Constantine [75].

La répartition géographique de l'ensemble des stations équipées de pyranomètres est donnée par la figure 4.1.

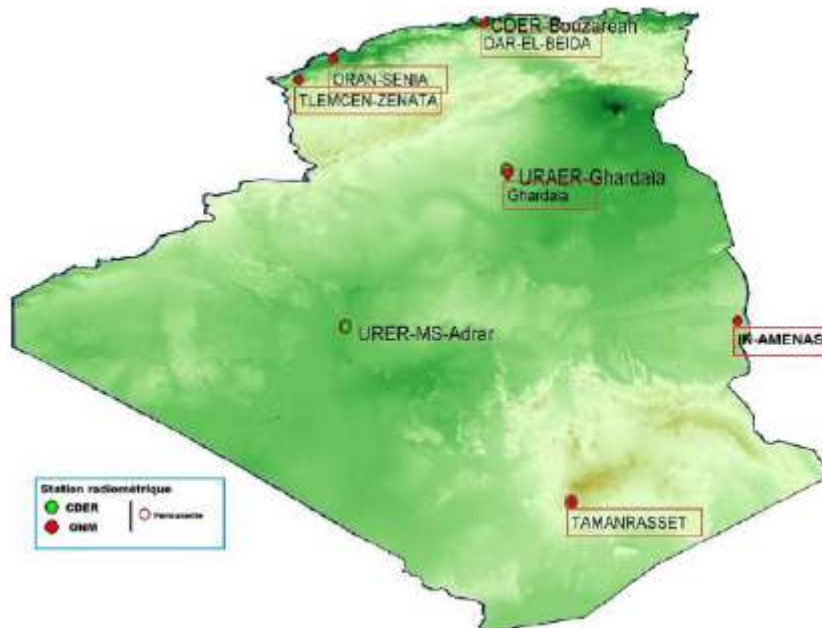


Figure 4.1 : Réseau pyranométrique (ONM et CDER).

4.2. Gisement solaire en Algérie

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [76]. Il est utilisé dans des domaines aussi variés que l'agriculture, la météorologie, les

Chapitre 04 : Gisement solaire en Algérie

applications énergétiques et la sécurité publique [77]. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde comme le montre la figure 4.2. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m²/an au Nord et 2263 kwh/m²/an au Sud du pays, Ce gisement solaire dépasse les 5 milliards de GWh [78].

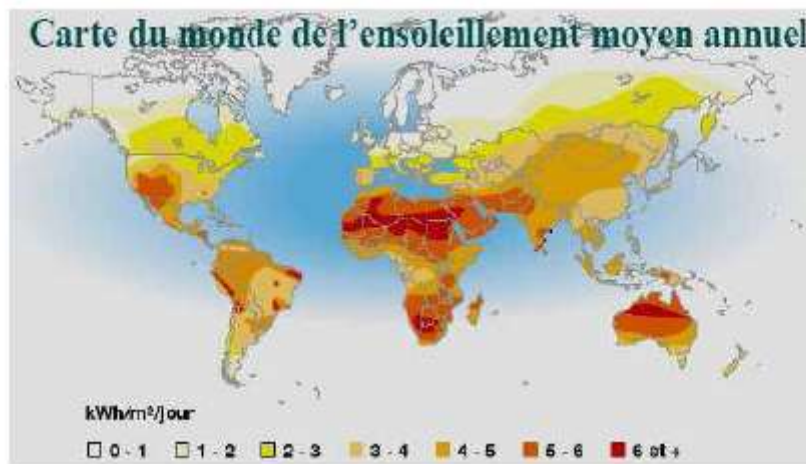


Figure 4.2 : Carte du monde de l'enseillement moyen annuel

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire Algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire Algérien est représentée dans le Tableau 4.1 selon l'enseillement reçu annuellement [79].

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'enseillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Tableau 4.1 : Potentiel solaire en Algérie

4.2.1. La variation spatio-temporelle de La durée d'insolation

La durée d'insolation moyenne dans le Sud Algérien est de l'ordre de 3500 h/an est la plus importante au monde, de l'ordre de 9 Heure/Jour (Voir Figures 4.5 et 4.6), on constater qu'elle est toujours supérieure à 8 Heure/Jour sur la majorité du territoire. La région du grand Sud, en particulier le Sud-Est et le Sud-Ouest [74] présente le plus grand potentiel de tout le territoire Algérien (voir Figures 4.3 – 4.4).

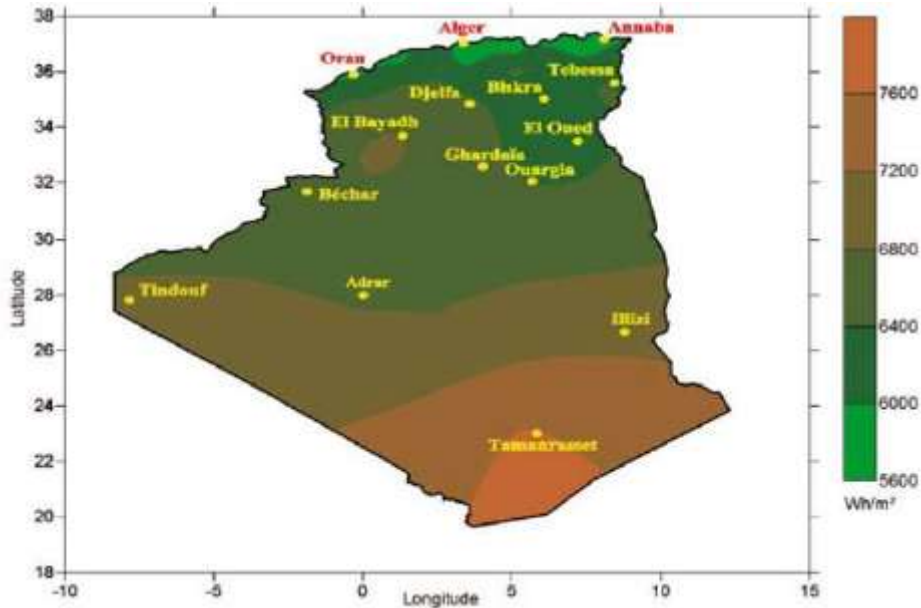


Figure 4.3 : Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale Cas d'un ciel totalement clair [80]

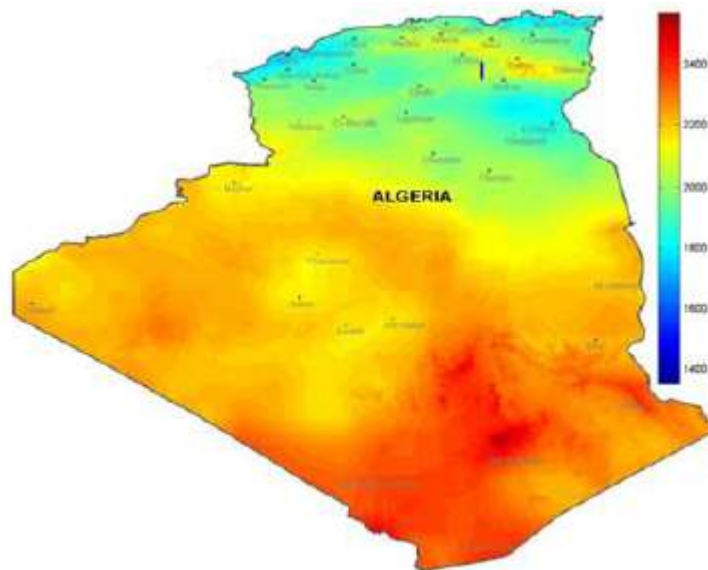


Figure 4.4 : Moyenne des sommes annuelles d'irradiation globale inclinée [74]

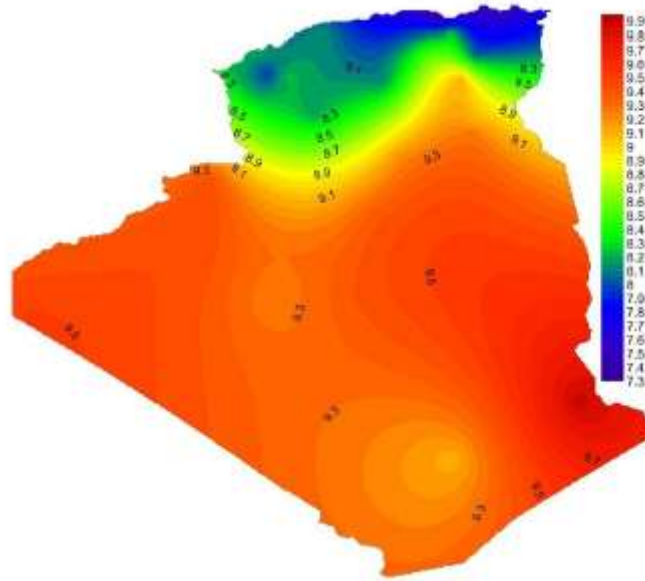


Figure 4.5 : Carte de la durée d'ensoleillement moyen annuel en Heure (1983-2012) [74]

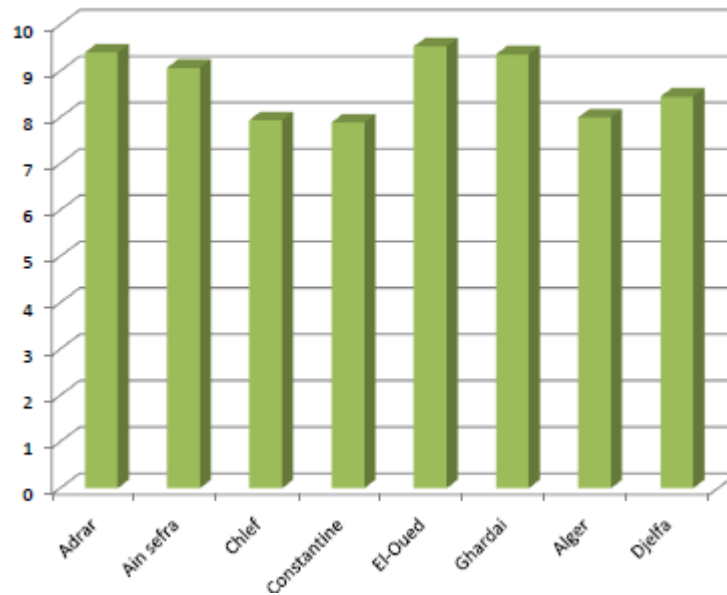


Figure 4.6 : Moyenne annuelle de la durée d'insolation mesurée [14]

4.3. Mesures par télédétection

La télédétection est la technique qui, par l'acquisition d'images [81], permet d'extraire de l'information sur la surface du sol sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique envoyé ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information. Dans la plupart des cas, la télédétection implique une interaction entre l'énergie incidente et les cibles. Le processus de la télédétection au moyen de systèmes imageurs comporte les sept étapes que

nous élaborons ci-après. Notons cependant que la télédétection peut également impliquer l'énergie émise et utiliser des capteurs non-imageurs. La télédétection passe par sept étapes :

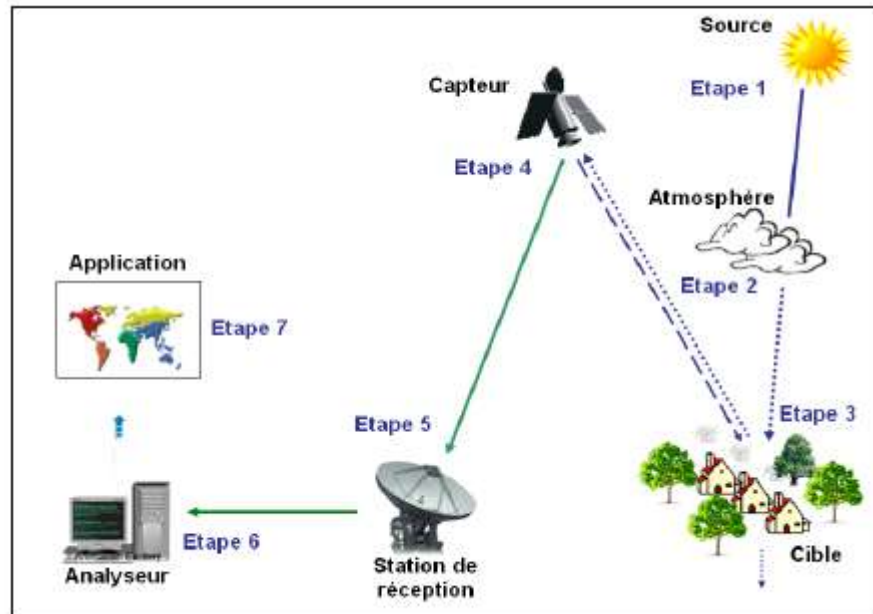


Figure 4.7 : Processus de télédétection

- Etape 1 : Source d'énergie ou d'illumination A l'origine de toute opération de télédétection se trouve obligatoirement une source d'énergie pour éclairer la cible. Le plus souvent, la source d'énergie est le soleil. Mais le satellite lui-même peut être source d'énergie : c'est le cas pour le domaine de la télédétection radar.
- Etape 2 : Rayonnement et atmosphère Pendant son chemin « aller » entre la source d'énergie et la cible, le rayonnement interagit avec l'atmosphère. Une seconde interaction se produit lors du tournée « retour » entre la cible et le capteur.
- Etape 3 : Interaction avec la cible Une fois arrivée à la cible, l'énergie interagit avec la surface de celle-ci, cette interaction dépend des caractéristiques du rayonnement et des propriétés de la surface. Chaque objet géographique émet ou réfléchit un rayonnement dans les diverses fréquences du spectre électromagnétique. Cette caractéristique s'appelle le comportement spectral.
- Etape 4 : Archivage de l'énergie par le capteur Une fois l'énergie diffusée ou émise par la cible, elle doit être captée à distance par un capteur qui n'est pas en contact avec la cible mais embarqué à bord d'un satellite ou d'un avion par exemple, pour être enfin enregistrée sous format numérique.

- Etape 5 : Transmission, réception et traitement Cette information enregistrée par le capteur est transmise, souvent par des moyens électroniques, à une station de réception généralement située au sol où l'information est transformée en images (numériques ou photographiques).
- Etape 6 : Interprétation et analyse Une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image traitée est ensuite essentielle pour extraire l'information que l'on désire obtenir sur la cible.
- Etape 7 : Application L'étape finale du processus consiste à utiliser l'information extraite de l'image pour mieux comprendre la cible, c'est-à-dire la portion d'espace étudiée (Foggaras, réseau AEP, zone inondée, une forêt, etc...) pour aider à résoudre un problème spécifique.

4.3.1. Plates-formes et capteurs

Dans cette partie, nous allons regarder de plus près l'enregistrement de cette énergie par un capteur en examinant plus en détail les caractéristiques de la plate-forme de télédétection, des capteurs et des informations qui y sont enregistrées. Les capteurs au sol sont souvent utilisés pour enregistrer des informations détaillées sur la surface. Ces informations sont, par la suite, comparées aux informations recueillies par avion ou à partir d'un satellite. Les capteurs au sol sont souvent placés sur des échelles, des échafaudages, des édifices élevés, des grues...etc.

Dans l'espace, la télédétection est parfois effectuée à partir de la navette spatiale ou plus fréquemment, à partir de satellites. Grâce à leur orbite, les plates-formes spatiales permettent une couverture répétitive et continue de la surface de la Terre. Le coût est souvent un facteur déterminant dans le choix des différentes plates-formes.

4.3.2. Caractéristiques des satellites - l'orbite

Bien que les plates-formes terrestres ou aéroportées soient utilisées, ce sont les satellites qui fournissent la majeure partie des données recueillies par télédétection de nos jours. Le circuit effectué par un satellite autour de la Terre est appelée orbite. L'orbite d'un satellite est choisie en fonction de la capacité des capteurs qu'il transporte et des objectifs de sa mission. Le choix d'une orbite est déterminé par l'altitude (la hauteur du satellite au-dessus de la surface de la Terre), l'orientation et la rotation du satellite par rapport à la Terre, sur cette base on peut définir deux types de satellites [81]:

A. Satellites à orbite Géostationnaire

C'est des satellites qui ont une altitude très élevée et observent toujours la même région de la surface de la Terre, Ces satellites géostationnaires ont une altitude d'environ 36 000 kilomètres et se déplacent à une vitesse qui correspond à celle de la Terre, donnant ainsi l'impression qu'ils sont stationnaires. Cette configuration orbitale permet au satellite d'observer et d'amasser continuellement

de l'information sur une région spécifique. Les satellites de communication et d'observation des conditions météorologiques sont situés sur de telles orbites. L'altitude élevée de certains satellites météorologiques leur permet d'observer les nuages et les conditions qui couvrent un hémisphère complet de la Terre.

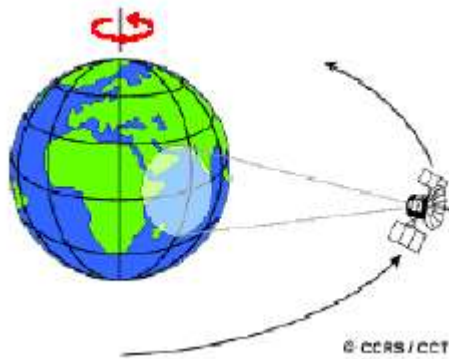


Figure 4.8 : Satellites à orbite Géostationnaire

B- Satellites à orbite héliosynchrone

C'est des satellites qui observent toujours chaque région du globe à la même heure locale solaire. Pour une latitude donnée, la position du Soleil dans le ciel au moment où le satellite survole une certaine région au cours d'une saison donnée sera donc toujours la même. Ces plates-formes spatiales suivent une orbite allant pratiquement du nord au sud ou vice versa. Cette configuration, combinée à la rotation de la Terre (ouest-est) fait qu'au cours d'une certaine période, les satellites ont observé la presque totalité de la surface de la Terre. Ce type d'orbite est appelé orbite quasi polaire à cause de l'inclinaison de l'orbite par rapport à une ligne passant par les pôles Nord et Sud de la Terre. Cette caractéristique orbitale assure des conditions d'illumination solaire similaires, lorsqu'on recueille des données pour une saison particulière sur plusieurs années ou pour une région particulière sur plusieurs jours. Ceci est un facteur important lorsqu'on compare deux images successives ou lorsqu'on produit une mosaïque avec des images adjacentes, puisque les images n'ont pas à être corrigées pour tenir compte de l'illumination solaire.



Figure 4.9 : Satellites à orbite héliosynchrone

4.3.3. Traitement numérique des images

Le traitement d'images numériques nécessite nécessairement un système informatique (ou système d'analyse d'images) ainsi que l'équipement et les logiciels pour traiter les données.

Plusieurs systèmes de logiciels commerciaux ont été développés spécifiquement pour le traitement et l'analyse des images de télédétection. Nous pouvons regrouper les fonctions de traitement des images communément disponibles en analyse d'images en quatre catégories :

- Prétraitement
- Rehaussement de l'image
- Transformation de l'image
- Classification et analyse de l'image



Figure 4.10 : Carte satellite METEOSAT

4.4. EUMETSAT

EUMETSAT est une organisation intergouvernementale européenne [82] active dans le domaine spatial, elle est occupée de l'établissement et de l'exploitation de systèmes opérationnels de satellites météorologiques. EUMETSAT contient aujourd'hui plus de 20 Etats membres européens comme : l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, le Danemark, l'Espagne, la Finlande, la France...etc. L'organisation a également signé quelques accords de coopération privilégiée avec une dizaine d'autres pays comme : la Bulgarie, la Croatie, la Hongrie, la Lettonie... etc. Qui ont l'accès aux données produits 24 heures sur 24, chaque jour de l'année, notamment via EUMETCast, le système de diffusion numérique de données environnementales.

4.5. Historique des satellites METEOSAT

Le groupe de satellites européens METEOSAT fait partie des satellites géostationnaires opérationnels, admettant l'observation de l'ensemble du globe terrestre, à l'exception des pôles. Météosat 1 a été lancé en 1977 pour une tâche expérimentale, mais il a remporté un tel succès que le service a pris une dimension opérationnelle dès le lancement de Météosat 2 en 1981. Quatre autres satellites ont été lancés en 1988, 1989, 1991 et 1993, Un septième satellite de même conception a été construit dans le cadre du programme Météosat est lancé en 1997.

4.6. Météosat de seconde génération (MSG)

Le premier satellite de la série baptisé Météosat Second Génération (MSG), a été lancé le 28 août 2002 [83], après une phase de réalisation conduite par l'Agence spatiale européenne pour le compte de l'Organisation Européenne Chargée de l'Exploitation des Satellites Météorologiques –EUMETSAT, la phase d'essais de mise en service, qui a suivi, a porté non seulement sur le nouveau satellite, proprement dit, mais aussi sur un segment sol complètement nouveau réalisé par EUMETSAT, dont les fonctions sont de commander et de contrôler le satellite et de traiter ses données au siège même de l'organisation et dans des centres répartis dans toute l'Europe. Au cours de cette période de mise en service, l'exploitation régulière des satellites de la première génération a continué, mais dans toute l'Europe les utilisateurs ont été en mesure de recevoir des données initiales du nouveau satellite à partir d'Avril 2003.

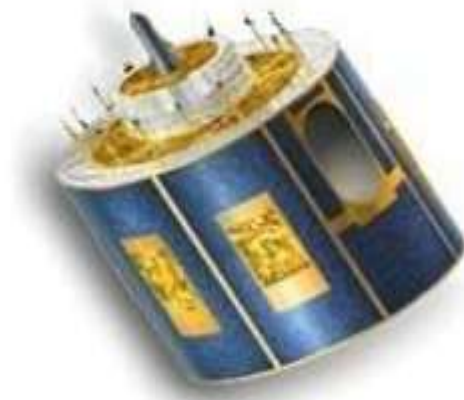


Figure 4.11 : Le satellite Météosat Second Génération.

Le 29 Janvier 2004 le satellite, rebaptisé à l'occasion Météosat-8, a été déclaré pleinement opérationnel, ce qui signifie qu'il fonctionnait à pleine capacité et qu'il était possible d'accéder régulièrement à ses données, qui pouvaient donc donner lieu à une utilisation opérationnelle régulière dans toute la zone de couverture du satellite, comprenant non seulement l'Europe, mais aussi l'Afrique et le Moyen-Orient. Le 21 décembre 2005 EUMETSAT lance le deuxième satellite MSG-2, et le 6 juillet 2006 il passe au 0° de longitude et devient complètement opérationnel, il est rebaptisé Météosat-9 et remplace le satellite de réserve Meteosat-8. La tâche principale de ces satellites [84] est l'observation continue de la surface du globe et de l'atmosphère, dans plusieurs bandes spectrales, nommées des canaux, ainsi que d'autres activités telles que :

- l'analyse des masses d'air.
- La prise d'image à haute résolution.
- La collecte de données.
- La retransmission et la diffusion de données météorologique
- L'exploitation d'un système complet d'archivage et de consultation des données.

L'instrument principal des satellites MSG est un radiomètre imageur SEVIRI qui balaie la surface de la Terre de manière à créer une nouvelle image multi spectrale dans 12 canaux toutes les quinze minutes. On dispose de deux canaux visibles, de neuf canaux dans le domaine infrarouge et d'un douzième canal visible HRV à large bande ne couvrant qu'une partie du disque terrestre. La résolution spatiale passe aussi de 2,5 km à 1 km au nadir pour le canal visible à large bande et de 5 à 3 km pour tous les autres canaux.

Cet accroissement des capacités de MSG par rapport à Météosat répond à l'évolution des besoins de la prévision immédiate et de la gestion du risque météorologique à courte échéance et ceci grâce à sa capacité de caractériser les systèmes météorologiques actifs, leur évolution rapide et leur probabilité de développement. La figure II.18 montre trois images prises dans le canal VIS 0.6 (C1) de l'instrument SEVIRI, à des heures différentes de la journée. Ce canal est sensible au rayonnement solaire réfléchi dans la partie visible du spectre, dans une fenêtre spectrale étroite centrée sur 0.6 μm . Les variations de l'illumination solaire au cours de la journée sont mises en évidence par courbe terminatrice entre la partie éclairée et obscure, que l'on voit à 6 heures et à 18 heures UTC. Quatre canaux de SEVIRI, soit les canaux VIS 0.6 (C1), VIS 0.8 (C2), NIR 1.6 (C3) et HRV (C12), sont essentiellement sensibles au rayonnement solaire réfléchi à 0.6 μm , d'une façon similaire.

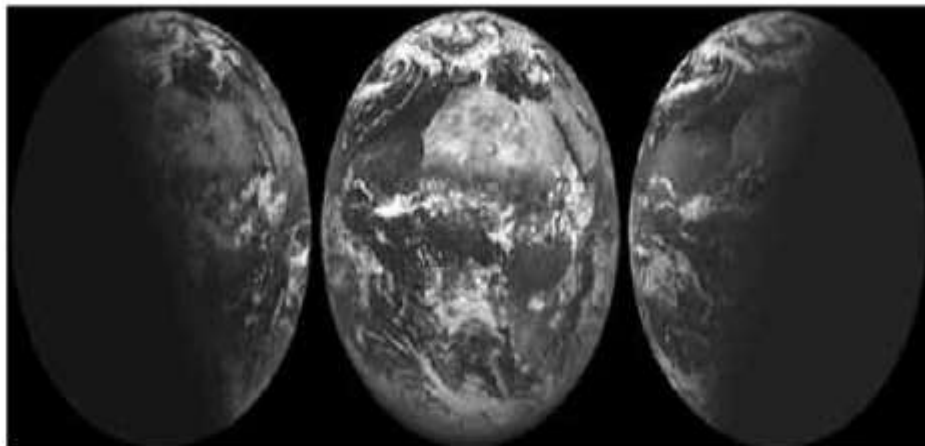


Figure 4.12 : Séquence de trois images prises par SEVIRI dans le canal VIS 0.6 (C1) le 19 juin 2004 à 06:00, 12:00 et 18:00 UTC.

Le rayonnement électromagnétique aperçu par le capteur d'un satellite traverse l'atmosphère d'une part lors de l'éclairement solaire (entre le soleil et le sol) et d'autre part entre le sol et le satellite (rayonnement réfléchi par la surface terrestre). Ce double passage perturbe le rayonnement solaire, et qui fait que la quantité du rayonnement solaire subit une grande variation dans l'espace et dans le temps, qui est entraînée par la différence de la position géographique du lieu d'une part, et d'autre part de la couverture et la composition des nuages. En raison du coût très élevé de l'investissement et de la maintenance de stations de mesures radiométrique, et de l'avantage qu'offre la télédétection spatiale avec une couverture globale, une résolution spatiale élevée et un prélèvement temporel fréquent qu'aucun autre système d'observation ne peut offrir. En conséquence, des techniques d'estimation des composantes du rayonnement solaire qui sont basées sur des données des satellites sont développées, afin d'évaluer le gisement solaire.

Chapitre 05
Position du problème et modélisation
mathématique

5.1. Positionnement du problème :

5.1.1. Modèle physique

Pour évaluer l'apport dynamique et thermique d'un capteur solaire hybride placé dans la façade sud d'une chambre, il a été intégré dans un modèle de simulation numérique tridimensionnel. Le domaine étudié (Figure 5.1) est une chambre (de dimensions 3 m × 2.9 m × 3 m) munie dont la façade sud comporte une paroi solaire hybride dont la cellule photovoltaïque semi-transparente a un coefficient de transmission de l'ordre de 80% (hauteur 2,3 m et largeur 1,2 m) et une fenêtre vitrée de surface (1 m × 1 m) placée à une hauteur de 1 m par rapport au sol.

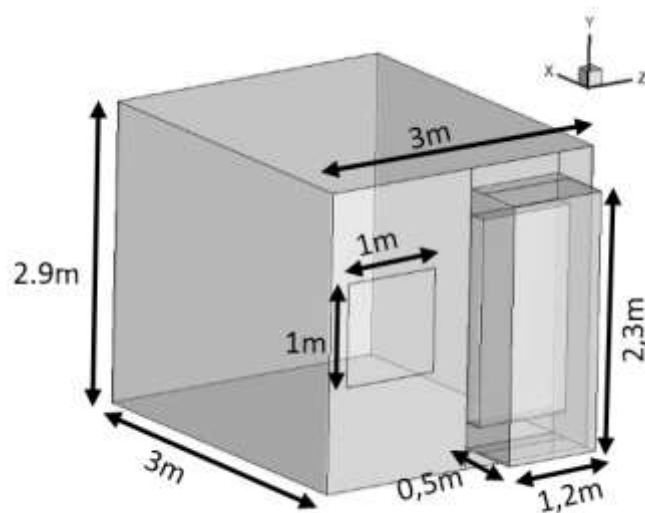


Figure 5.1 : Domaine à étudier en 3 dimensions.

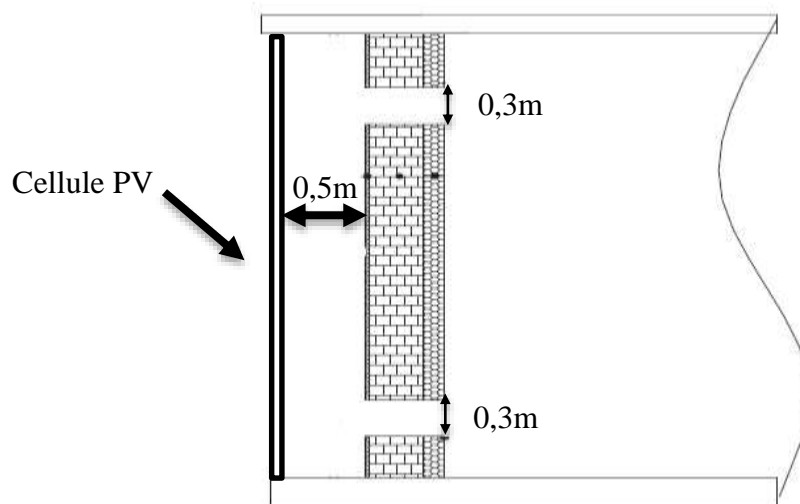


Figure 5.2 : Coupe interne du mur solaire hybride.

La paroi solaire hybride est un mur trombe muni d'une cellule photovoltaïque semi-transparente à la place du vitrage (Figure 5.2). Le mur Trombe (appelé aussi mur Trombe-Michel) est un système de chauffage solaire dit « passif » mis en œuvre et expérimenté par le professeur Félix Trombe et l'architecte Jacques Michel dans les années 1950-1970. Ce dispositif utilise l'énergie solaire comme source de chaleur pour le chauffage passif des locaux.

Le mur solaire hybride comporte plusieurs paramètres géométriques qui influent sur son efficacité. Plusieurs études numériques ont été effectuées en variant les différentes dimensions du système afin de trouver les valeurs optimales. Les dimensions optimales [22] sont adoptées pour notre simulation (figure 5.2). Le mur solaire est habituellement orienté au Sud, puisque c'est dans cette orientation qu'il peut capter un maximum d'irradiation solaire. Pour simplifier le modèle, les murs de la chambre sont identiques. Ces murs sont composés de brique. Une fenêtre avec un vitrage à faible émissivité est placée sur la façade sud. Le bâtiment possède un toit plat en béton bien isolé.

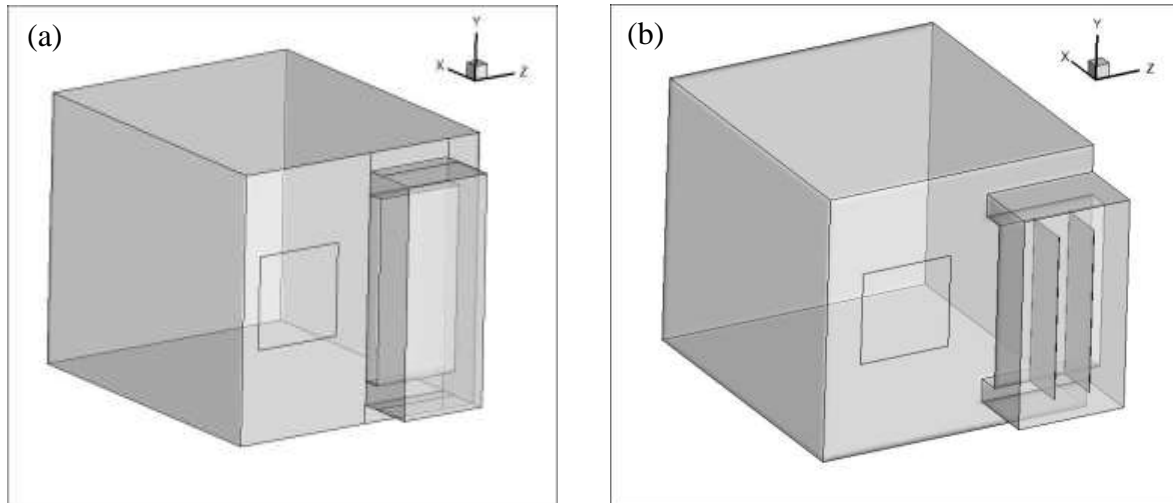


Tableau 5.1 : Propriétés physiques et optiques des matériaux

Material	Parameters	Numerical values
Murs (Brique)	Epaisseur (m)	0.2
	Densité (Kg/m^3)	1800
	Conductivité thermique (W/mK)	0.814
	Chaleur spécifique ($\text{J}/\text{kg.K}$)	840
Toiture (béton)	Epaisseur (m)	0.2
	Densité (Kg/m^3)	2300
	Conductivité thermique (W/mK)	3.76
	Chaleur spécifique ($\text{J}/\text{kg.K}$)	880
Fenêtre (Verre)	Epaisseur (m)	0.004
	Densité (Kg/m^3)	2515
	Conductivité thermique (W/mK)	1.15
	Chaleur spécifique ($\text{J}/\text{kg.K}$)	800
Cellule photovoltaïque (silicium)	Epaisseur (m)	0.003
	Densité (Kg/m^3)	2300
	Conductivité thermique (W/mK)	0.036
	Chaleur spécifique ($\text{J}/\text{kg.K}$)	650
Couverture du mur solaire (aluminium)	Epaisseur (m)	0.003
	Densité (Kg/m^3)	2719
	Conductivité thermique (W/mK)	202.4
	Chaleur spécifique ($\text{J}/\text{kg.K}$)	871

Deux différentes configurations de paroi solaire hybride sont étudiées :

- La première configuration est un capteur solaire hybride simple (Figure.5.3.a)
- La deuxième configuration est un capteur solaire hybride muni des plaques séparatrices à l'intérieur (Figure 5.3.b).

Les données climatiques utilisés dans la simulation sont prises pour une journée typique de l'année pendant la période froide (le 10 décembre) pour la ville de TLEMCEM (coordonnées GPS, latitude : 34.888 et longitude : -1.318).

5.1.2. Modélisation mathématique :

La modélisation numérique du comportement dynamique et thermique d'un habitat écologique où la convection naturelle est le transfert thermique dominant a fait l'objet de plusieurs études. Une approche mathématique basée sur la résolution des équations de la mécanique des fluides permet d'évaluer les paramètres physiques en un nombre de points très important du domaine. Elle permet aussi de prendre en compte l'ensemble des phénomènes physiques (dynamique, thermique, turbulence) qui interviennent ainsi que leurs interactions. L'augmentation de la capacité de calcul des outils informatiques favorise le développement des études basées sur l'approche CFD (Computational Fluid Dynamics) de façon remarquable depuis la fin des années 90 [85,86].

Les équations de la mécanique des fluides et de l'énergie gouvernent les principaux échanges dynamique et thermique dans la chambre étudiée ainsi qu'à travers la paroi solaire hybride, en portant une attention particulière à la prise en compte des mécanismes de couplage qui interviennent.

5.1.2.1. Mécanique des fluides :

La mécanique des fluides est l'étude du comportement des fluides (liquides et gaz) et des forces internes associées. Il s'agit des équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement basées sur des bilans appliqués sur chaque élément de volume de l'espace étudié. Des équations supplémentaires doivent être résolues quand on a le cas d'un écoulement turbulent (cas fréquemment rencontré dans les enceintes thermiques). Les équations classiques de conservation doivent alors être modifiées pour tenir en considération le caractère turbulent de l'écoulement en introduisant de nouvelles inconnues. Il faut alors faire des choix de modèles de fermeture (introduction de nouvelles équations de transport pour les quantités turbulentes) permettant la résolution de l'ensemble des équations.

La résolution d'un problème de dynamique des fluides demande normalement de calculer diverses propriétés des fluides comme la vitesse, la viscosité, la densité et la pression en tant que fonctions de l'espace et du temps.

a. Equation de conservation de la masse

L'équation de conservation de la masse est le fruit d'un bilan de masse sur un élément de volume fluide appelé particule fluide. Elle s'écrit en notation vectorielle (indépendante du système de coordonnées) de la manière suivante :

$$\underbrace{\frac{\partial \rho}{\partial t}}_I + \underbrace{\nabla \cdot (\rho \vec{v})}_{II} = \underbrace{S_m}_{III} \quad (19)$$

Avec :

I : variation locale de la masse en fonction du temps ;

II : variation de masse due au champ de vitesse $\vec{v} = f(u, v, w)$: la particule fluide de masse volumique ρ .

III : termes sources correspondant à la création ou à la disparition de matière (par ex, l'air perd de sa masse lorsque la vapeur d'eau se condense sur une paroi).

b. Equation de conservation de la quantité de mouvement

L'équation de bilan de la quantité de mouvement découle du principe fondamental de la dynamique appliqué à un fluide. Cette équation traduit l'équilibre des forces exercées sur une particule fluide et peut s'écrire :

$$\frac{D(\rho \vec{v})}{Dt} = \frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \rho \vec{v} \cdot \text{grad}(\vec{v}) = \sum \overrightarrow{\delta F_{ext}} \quad (20)$$

Il existe deux types des forces extérieures :

Force de volume : Ce sont les résultats des champs de forces externes (ex : forces dues au champ de gravité, poussée d'Archimède, etc.).

Forces de surfaces : Sont les forces de pression et les forces de frottement.

$$\sum \overrightarrow{\delta F_{ext}} = \sum \overrightarrow{\delta F_{surfique}} + \sum \overrightarrow{\delta F_{volumique}} \quad (21)$$

5.1.2.2. Equation de conservation de l'énergie :

L'équation de conservation de l'énergie est déduite du premier principe de la thermodynamique (principe de conservation de l'énergie) qui s'écrit pour un système fermé :

$$\Delta(U_{int} + E_c) = W + Q \quad (22)$$

Soit :

$$\frac{\partial}{\partial t}(U_{int} + E_c) = \dot{W} + \dot{Q} \quad (23)$$

Avec : U_{int} est l'énergie interne, E_c l'énergie cinétique

\dot{W} et \dot{Q} sont respectivement la puissance des forces extérieures et la puissance thermique reçue par le fluide (air).

Le bilan énergétique en système fermé indique que W et Q sont des termes sources qui représentent les variations de l'énergie interne et de l'énergie cinétique. L'application du premier principe à un système ouvert exige de rajouter les termes de flux convectif dans l'équation de bilan énergétique :

$$\frac{\partial}{\partial t}(U_{int} + E_c) = - \left(\iint \rho \left(U_{int} + \frac{v^2}{2} \right) \cdot \vec{v} \cdot \vec{n} ds \right) + W + Q \quad (24)$$

La puissance \dot{W} des forces qui s'exercent sur le volume de la particule fluide est exprimée par :

- ✓ forces de gravité
- ✓ forces de pression
- ✓ force de frottement visqueux

L'approximation de Boussinesq permet de prendre en compte les variations de masse volumique causées par les différences de température, tout en négligeant les effets de compression liés à la vitesse des ondes sonores. Cette approximation a été proposée par Boussinesq [87] et appliquée dans certains écoulements où la température, et par conséquent la masse volumique, varient peu. La force motrice du mouvement de fluide est la force d'Archimède. La variation de la masse volumique et des autres propriétés thermo-physiques du fluide est négligeable partout sauf dans la force d'Archimède.

Le développement en série de Taylor du premier ordre autour d'un état de référence (ρ_{ref}, T_{ref}) est utilisé pour exprimer la masse volumique ρ en un point de l'écoulement :

$$\rho = \rho_{ref} [1 - \beta(T - T_{ref})] \quad (25)$$

Avec :

$\beta = -\frac{1}{\rho_{ref}} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$, le coefficient de dilatation volumique du fluide (air) à pression constante.

Pour un gaz parfait $\beta = \frac{1}{T} \approx 3 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ pour la gamme de températures considérée dans notre étude.

5.1.2.3. Modélisation de la turbulence :

La turbulence est définie comme étant l'état d'un fluide, liquide ou gaz, dans lequel la vitesse provoque en tout point des fluctuations aléatoires entraînant la création de tourbillons dont la taille et la localisation varient sans arrêt. On peut caractériser les écoulements turbulents par leur apparence très désordonnée, leur comportement difficilement prévisible (i.e. chaotique) et l'existence de nombreuses échelles spatiales et temporelles interférant entre elles.

Le comportement complexe des écoulements turbulents est la plupart du temps abordé par la voie statistique. Des études notent que le système d'équations de Navier-Stokes est valable pour les écoulements turbulents rencontrés dans les enceintes thermiques [88]. Les moyens de calcul actuels assurent difficilement une simulation directe de la turbulence sur des volumes aussi importants que ceux considérés dans les enceintes. Cependant, il est en effet impossible de simuler des tourbillons dont la taille est inférieure à celle des mailles considérées dans l'approche numérique. Donc, il y a recours à une approche statistique pour introduire les mécanismes turbulents dans l'approche numérique.

a. modèle de fermeture à deux équations de transport (k -ε) :

Un des schémas les plus générales consiste à déduire la valeur de la viscosité turbulente à partir de la résolution d'une équation de transport supplémentaire : celle de l'énergie cinétique turbulente k .

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \bar{u}_i \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_r + \varepsilon + f_{k_i} \quad (26)$$

Avec :

P_r : Production d'énergie cinétique turbulente par action du mouvement moyen,

ε : Dissipation visqueuse,

f_{k_i} : Production due à l'action des forces de gravité.

σ_k : Nombre de Prandtl-Schmidt de l'énergie cinétique turbulente, supposé en général constant.

La deuxième équation de fermeture est l'équation de transport du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente :

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) + \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right]}_I + \frac{\varepsilon}{k} \left[\underbrace{C_{\varepsilon 1} (P_k + C_{\varepsilon 3} \cdot f_{k_i})}_{II} - \underbrace{C_{\varepsilon 2} \cdot \varepsilon}_{III} \right] \quad (27)$$

I : transport par diffusion turbulente et visqueuse. σ_ε : Le nombre de Prandtl-Schmidt turbulent associé à ε .

II : Le premier terme désigne la production de la dissipation visqueuse par l'action du mouvement moyen. Le deuxième terme exprime la production ou la destruction de la dissipation due aux forces volumiques, qui peut être liée au champ gravitationnel par exemple.

III : terme de dissipation de ε par action de la viscosité.

5.1.3. Conditions initiales et aux limites :

Ce travail adopte un écoulement turbulent entièrement développé. Les paramètres k , ε ont été obtenus par un calcul numérique qui utilise le modèle (k - ε) à bas nombre de Reynolds (LRN).

Les conditions aux limites pour l'ensemble des équations régissant sont présentées ci-dessous :

- ✓ Au début ($t = 0$), le fluide est supposé au repos (vitesses nulles) et l'ensemble du domaine est supposé maintenu à la température ambiante.

$$u = v = w = 0 ; T_i = 297 \text{ K}$$

- ✓ Paroi sud de la chambre : est exposée à un rayonnement solaire variable avec des pertes thermiques convectives avec l'ambiance et radiatives avec le ciel.
- ✓ Parois extérieures de la chambre : sont exposées à des pertes thermiques convectives avec l'ambiance et radiatives avec le ciel.

Le coefficient de convection avec l'extérieur est calculé selon Mac Adams par la corrélation suivante [89].

$$h_a = 5.7 + 3.8V_{vent} \quad (28)$$

V_{vent} est la vitesse du vent prise égale à 10 Km/h.

- ✓ Les parois internes de la chambre :
 - la condition de non-glissement est adoptée :

$$u = v = w = 0 \quad (29)$$

- en utilisant le modèle k-ε à bas nombre de Reynolds, la condition suivante est appliquée :

$$K = \varepsilon = 0 \quad (30)$$

- A l'interface solide/fluide, un bilan énergétique conduit à :

$$\lambda_f \times \frac{\partial T_f}{\partial x} = \lambda_s \times \frac{\partial T_s}{\partial x} \quad \text{et} \quad T_f = T_s \quad (31)$$

- ✓ Les quatre extrémités latérales du module PV sont soumises à des pertes thermiques convectives avec l'ambiance :

✓

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h_a (T_v - T_{amb}) \quad (32)$$

- ✓ Les quatre extrémités latérales du capteur solaire hybride sont supposées adiabatiques.

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (33)$$

L'évolution du rayonnement solaire direct et diffus pendant les 24 heures de la journée sélectionnée est présentée dans la figure 5.4.

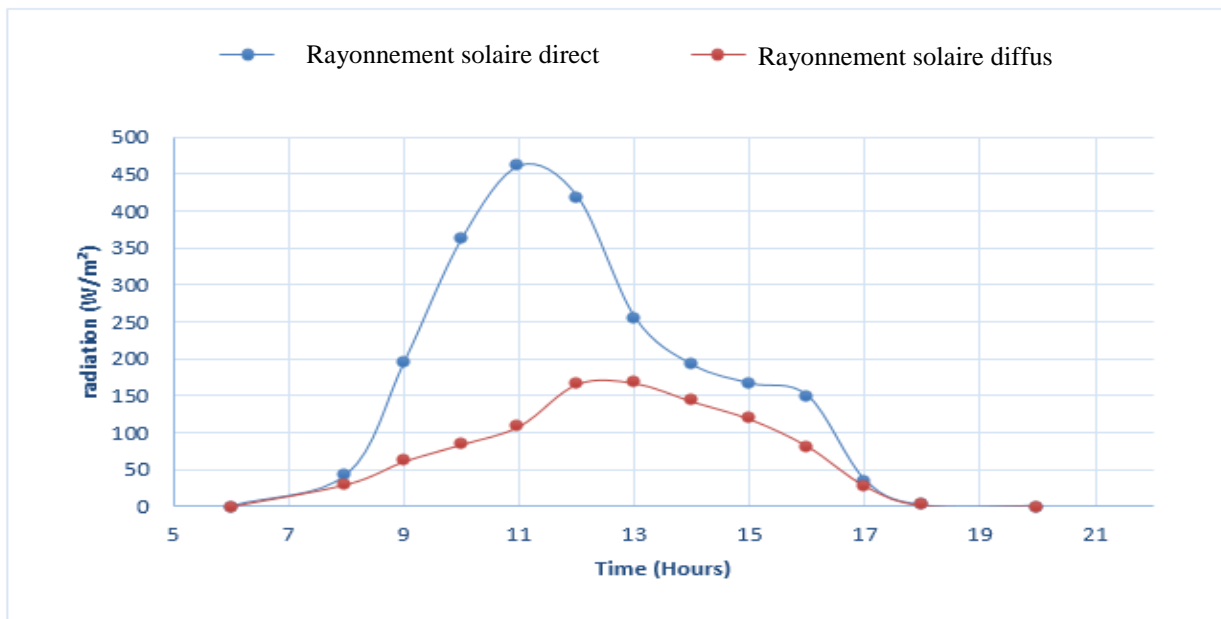


Figure.5.4 : L'évolution du rayonnement solaire journalier dans la ville de TLEMCCEN

5.2. Modèle numérique :

Les phénomènes de transport qui sont régis par le système d'équations aux dérivées partielles décrit précédemment doit être résolu pour déterminer les caractéristiques des champs dynamique et thermique. Pratiquement, il est presque impossible de trouver une solution analytique exacte à de tels systèmes du fait de la complexité (non-linéaire et couplage). Alors, le recours à la résolution numérique s'impose et nous incite à choisir la méthode numérique adéquate pour obtenir les meilleures approximations.

Il existe plusieurs méthodes de discrétisation qui sont fréquemment utilisées dans les problèmes d'écoulements et de transfert de chaleur, on peut citer les méthodes des différences finies, d'éléments finis et des volumes finis.

Dans cette présente étude, les équations de continuité, de quantité de mouvement, d'énergie et de turbulence sont résolues par la méthode des volumes finis. Elle a l'avantage de :

- ✓ Garantir la conservation de masse et de quantité de mouvement dans tout le domaine de calcul.
- ✓ Faciliter la linéarisation des termes de sources d'énergie.
- ✓ Permettre un traitement plus facile des milieux hétérogènes.

Patankar et al [92] présente une méthode de volume finis qui consiste principalement à diviser le domaine physique en un nombre fini de petits volumes adjacents qui seront nommés volumes de contrôle. Chaque volume de contrôle contient un point central appelé nœud. Les nœuds représentent les valeurs des fonctions discrétisées désirant calculer. Chaque nœud considéré sera entouré de quatre nœuds voisins noté par W (ouest), E (est), N (nord) et S (sud).

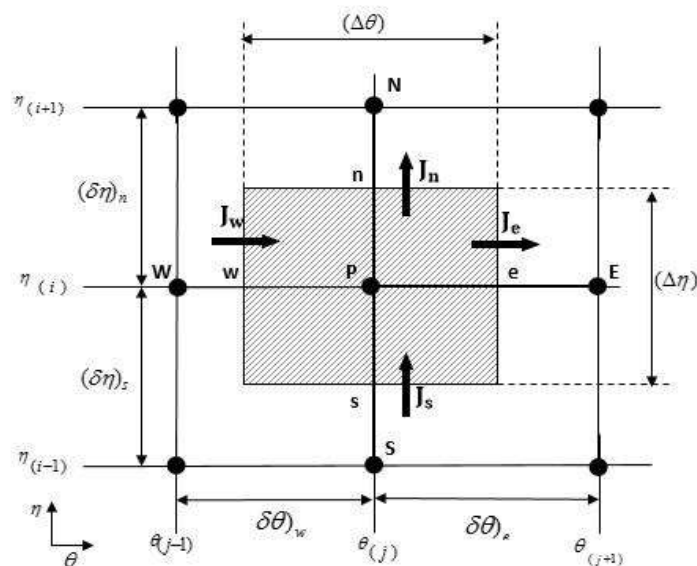


Figure 5.5 : Volume de contrôle principal (2D)

5.2.1. Modélisation numérique du problème :

Le recours aux méthodes numériques dans le calcul débouche inévitablement sur un Logiciel qui lui est associé. Au début, lors des premières tentatives de calcul par des méthodes numériques, on élabore, pour chaque nouveau problème, un programme différent qui tient en compte de sa géométrie particulière, de ses données physiques et de ses conditions aux limites. On s'oriente par la suite vers la réalisation de logiciels dont la structure informatique est adaptée au traitement d'un grand nombre de problèmes du même type. Ces logiciels ont, généralement tous, trois composantes principales : un préprocesseur, un processeur de calcul (solver) et un post-processeur.

a. préprocesseur

Les activités impliquées dans cette étape du calcul numérique sont les suivantes :

- Description de la géométrie dans la région d'intérêt : définition du domaine de calcul
- Génération du maillage : discrétisation du domaine de calcul en éléments finis ou volumes de contrôle.
- Choix du phénomène physique à modéliser.
- Définition des propriétés physiques.
- Spécification des conditions aux limites adéquates.

b. Processeur de calcul

Celui-ci peut être réalisé, en général, en utilisant les méthodes numériques (la méthode des différences finies, la méthode des éléments finis, les méthodes spectrales ou la méthode des volumes finis).

c. Post-processeur

À l'intérieur de ce module, on présente les résultats à l'utilisateur sous une forme adaptée à sa perception de la physique du problème. Par exemple, dans un problème de conduction thermique, le tracé des isothermes est un résultat très utile, surtout si le logiciel autorise la visualisation de courbes isothermes associées à des valeurs choisies de la température. Le post-processeur offre différentes facilités pour visualiser et interpréter les résultats comprenant aussi :

- La visualisation de la géométrie et du maillage ;

- La visualisation des vecteurs de grandeurs calculées ;
- La visualisation des iso-lignes de différentes grandeurs ;
- La visualisation des surfaces 2D et 3D ;
- Les possibilités d'exporter les différentes grandeurs sous forme de fichiers ;
- Les facilités d'animation.

L'objectif de cette partie est de reproduire une solution numérique tridimensionnelle du comportement dynamique et thermique d'une chambre munie d'une fenêtre et d'une paroi solaire hybride. Les outils utilisés pour la simulation et pour réaliser ce travail seront GAMBIT et FLUENT. Le logiciel GAMBIT est un mailleur 2D/3D ; préprocesseur qui permet de mailler des domaines de géométrie d'un problème de CFD (Computational Fluid Dynamics). Il génère des fichiers (*.msh) pour FLUENT. FLUENT est un logiciel qui résout par la méthode des volumes finis les problèmes de mécanique des fluides et de transferts thermiques.

5.2.2. Utilisation du GAMBIT :

Le maillage est conçu par l'utilisateur à l'aide du mailleur GAMBIT. Celui-ci permet de construire trois types de grille de calcul, structurée, non structurée ou hybride.

- ✓ Maillage structuré (quadrilatères/hexagones), il est plus facile de le générer en utilisant à multi bloc.
- ✓ Maillage non structuré (tri/tétra), les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte quant à leur disposition.
- ✓ Maillage hybride, maillage généré par un mélange d'éléments de différents types (structuré et non structuré).

Dans ce travail nous avons généré un maillage structuré (Figure.5.6) qui présente les avantages suivants :

- ✓ Economique en nombre d'éléments,
- ✓ Présente un nombre inférieur de mailles par rapport à un maillage non structuré équivalent.
- ✓ Réduit les risques d'erreurs numériques car l'écoulement est aligné avec le maillage.

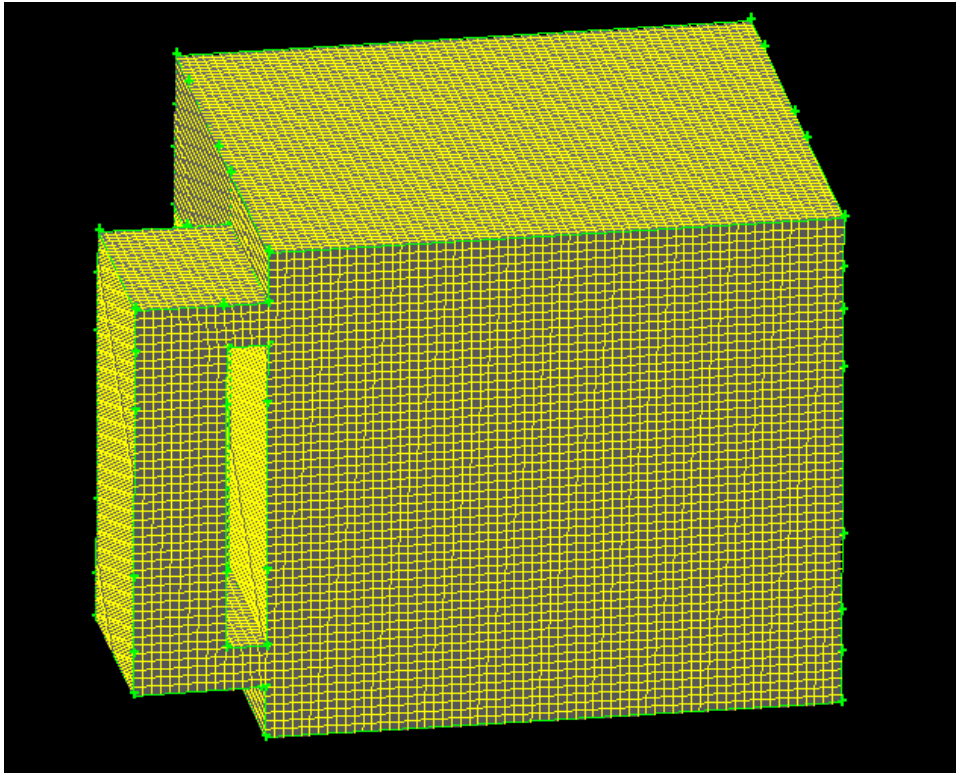


Figure 5.6 : Géométrie et maillage construit sous GAMBIT.

a. Test de maillage :

Trois différentes tailles de maillage ont été testées pour les deux configurations étudiés (avec et sans séparation) en utilisant des éléments hexaédriques. Pour valider le test d'indépendance de taille de maillage finalement choisis, on a pris comme outil l'évolution instationnaire de la température de la cellule photovoltaïque. En analysant les évolutions obtenues (Figure 5.7), on peut adopter le nombre de nœuds choisi pour chaque configuration (tableau 5.2).

Le pas de temps utilisé dans la simulation a été teste aussi en utilisant l'évolution instationnaire de la température de la cellule photovoltaïque, figure 5.8. Le pas de temps adopté est de 30 seconde dans les deux configurations (avec et sans séparation).

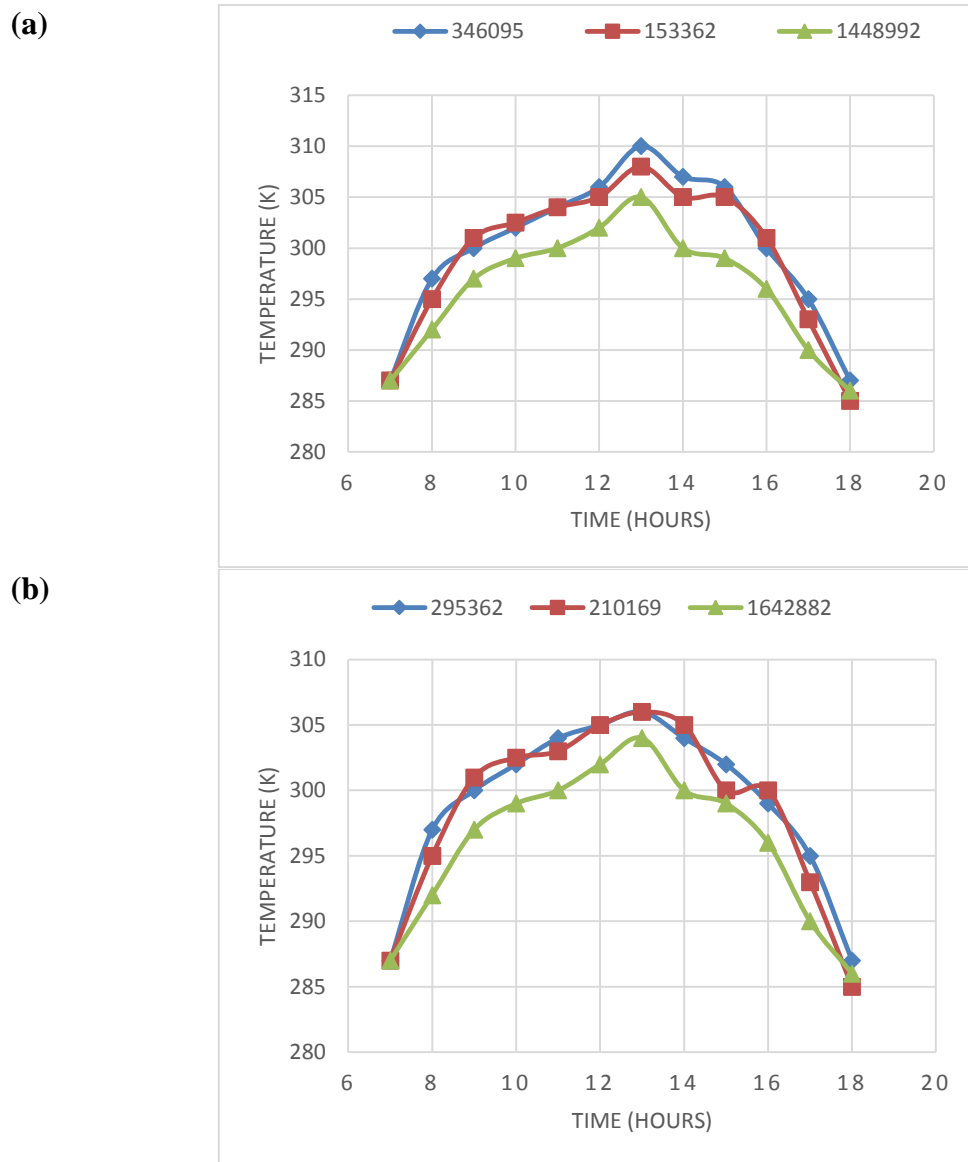


Figure 5.7. Indépendance du nombre de nœuds sur l'évolution instationnaire de la température de la cellule photovoltaïque, (a) sans séparation, (b) avec séparation

Tableau 5.2. Maillages adoptés.

Maillage adopté	Configuration
346095	Sans séparation
295362	Avec séparation

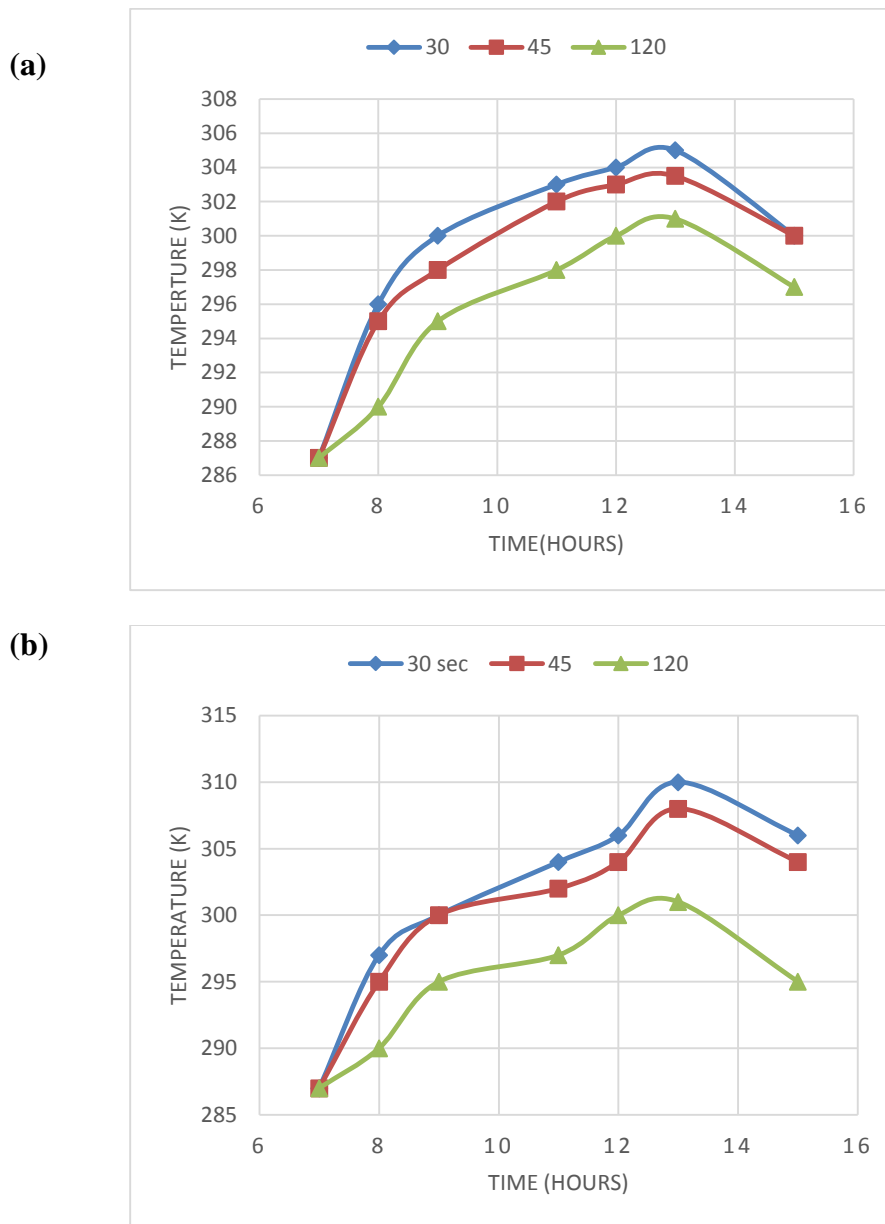


Figure 5.8. Indépendance de pas du temps sur l'évolution de la température de la cellule PV, (a) sans séparation, (b) avec séparation.

5.2.3. Utilisation du Fluent

Pour réaliser nos simulations, nous avons utilisés le code de calcul FLUENT qui est développé pour modéliser les écoulements des fluides et les transferts thermiques. Ce logiciel utilise la méthode des volumes finis pour résoudre les équations.

Le solveur FLUENT permet de définir numériquement les conditions opératoires (gravité, pression...) dans lesquelles, est effectuée la simulation, ainsi que la spécification des conditions

aux limites. Il permet de choisir le processus itératif, en proposant plusieurs schémas numériques pour la discrétisation spatiale et temporelle, et pour le couplage de vitesse et de pression.

a. Schéma de discrétisation

FLUENT propose plusieurs schémas de discrétisation qui dépendent de la nature de l'écoulement et de la géométrie adoptée.

- ✓ Schéma du Premier Ordre Upwind : Ce schéma permet une certaine stabilité dans les calculs mais il est responsable de la diffusion numérique. Il est fortement recommandé dans les écoulements de dominance convective.
- ✓ Schéma de Second Ordre Upwind : il est utilisé pour les écoulements compressibles et pour améliorer la précision en écoulements incompressibles.
- ✓ Schéma « QUICK » (Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinetics). Il procure une meilleure précision que le schéma au Second Ordre pour les écoulements rotationnels et tourbillonnaires (Swirling) avec un maillage régulier. Cependant, il ne s'applique pas à un maillage triangulaire.
- ✓ Le schéma « Power Law » est plus précis que le schéma du premier ordre pour les écoulements à très bas nombres de Reynolds. Sinon, il procure en général le même degré de précision.
- ✓ Le schéma « third-order MUSCL » : il donne plus de précision que les autres schémas.

b. Choix du schéma d'interpolation de la pression :

Le schéma « Standard » est pratique pour la plupart des cas. Pour des écoulements particuliers, on peut choisir parmi les options suivantes :

- ✓ Le schéma force de volume pondéré « Body Force Weighted » est recommandé dans les cas où l'effet des forces de gravité sont importantes.
- ✓ Le schéma « PRESTO ! » (Pressure Staggering Option) est approprié pour les écoulements hautement tourbillonnaires, à grande vitesse de rotation ou les écoulements dans des domaines fortement courbés.
- ✓ Le schéma au second ordre est à utiliser pour les écoulements compressibles et pour améliorer la précision en écoulements incompressibles.

- ✓ Le schéma linéaire « Linear » est disponible comme alternative au cas où les autres options ont des difficultés de convergence ou génèreraient des comportements non physiques.

c. Méthode de couplage Pression-Vitesse :

Dans le cas où les vitesses sont définies aux nœuds d'un volume de contrôle ordinaire (comme les autres scalaires : pression, température), les études démontrent qu'un champ de pression hautement non uniforme se comporte comme un champ uniforme sur les équations de quantité de mouvement discrétisées. Pour résoudre ce problème on doit passer par la définition des vitesses sur une grille décalée et l'emploi d'algorithmes tels que SIMPLE pour résoudre ce lien ou couplage entre la pression et la vitesse. L'algorithme SIMPLE peut être défini comme étant une procédure d'estimation et correction pour le calcul de la pression sur la "grille décalée" des composantes de la vitesse. Les méthodes de couplage vitesse-pression proposés par FLUENT sont :

- ✓ Méthode SIMPLE (Semi Implicit Method for a Pressure Linked Equations) qui a été créé par Patankar et al [93], et qui est le plus robuste.
- ✓ Méthode SIMPLER (SIMPLE Consistent) a été mise au point par Van Doormal et al. [94]. Les étapes de cet algorithme sont presque les mêmes que celles de l'algorithme SIMPLE avec la différence que dans les équations de correction des vitesses on néglige les termes les moins significatifs.
- ✓ Méthode PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) a été mise au point par Issa [95]. Cet algorithme a été développé initialement comme une procédure non itérative pour le calcul des écoulements compressibles instationnaires. Ultérieurement l'algorithme a été bien adapté pour la procédure itérative appliquée aux problèmes stationnaires. L'algorithme est une extension de l'algorithme SIMPLE ayant une étape de correction de plus.

Dans notre étude, l'algorithme choisit est l'algorithme SIMPLE qui est robuste, offrant ainsi plus de garanties pour la convergence de la solution.

d. Paramètres de calcul

Les paramètres utilisés dans la simulation sous Fluent pour la résolution du problème en régime instationnaire sont regroupés dans les Tableaux 5.3 et 5.4 :

Tableau 5.3 : Facteurs de sous relaxation.

<i>Grandeur</i>	<i>Facteur de sous relaxation</i>
Pression	0.3
Force volumique	1
Quantité de mouvement	0.7
Energie cinétique turbulente	0.7
Dissipation visqueuse Epsilon	0.7
Viscosité turbulente	0.7
Energie	0.8

Tableau 5.3 : Critère de convergence sur les résidus.

<i>Equation</i>	<i>Critère</i>
Continuité	10^{-6}
Vitesse	10^{-6}
Energie cinétique turbulente k	10^{-6}
Dissipation visqueuse Epsilon	10^{-6}
Energie	10^{-6}

Chapitre 06

Résultats et discussion

6.1. Validation du modèle numérique

Le code commercial ANSYS-FLUENT est utilisé de nouveau pour résoudre numériquement le système d'équations mathématiques régissant le comportement physique de la chambre muni du capteur solaire hybride étudié. Le calcul numérique utilise l'algorithme SIMPLE avec le schéma Upwind second-order pour la résolution des équations gouvernantes.

Les facteurs de sous-relaxation pour les composantes de la vitesse, la correction de pression, l'énergie thermique et la fraction liquide sont fixes respectivement à : 0,7, 0,3, 0,95 et 0,9. Les critères de convergence choisis sont 10^{-6} pour la continuité et les équations de quantité de mouvement et l'équation d'énergie.

Pour vérifier la validité du modèle numérique utilisé, on a comparé les résultats obtenus avec ceux tirés expérimentalement par Basak et al [39]. Ils ont étudié une chambre munie d'un mur trombe équipé d'un vitrage semi-transparent sous forme de cellule photovoltaïque (figure 6.1). Le code commercial, FLUENT, basé sur l'approche du volume fini, a été utilisé pour la simulation bidimensionnelle du problème.

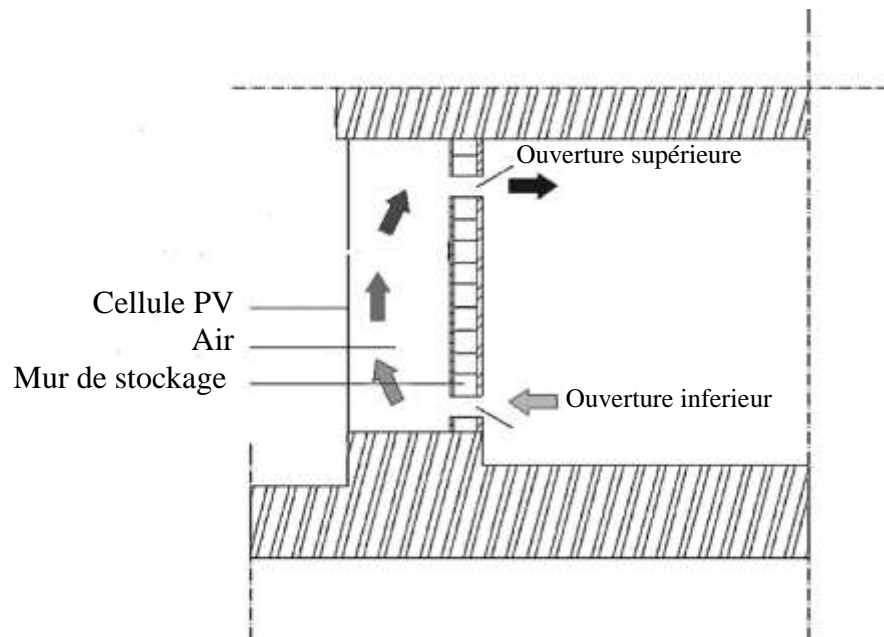


Figure 6.1. La géométrie du problème en 2 dimensions

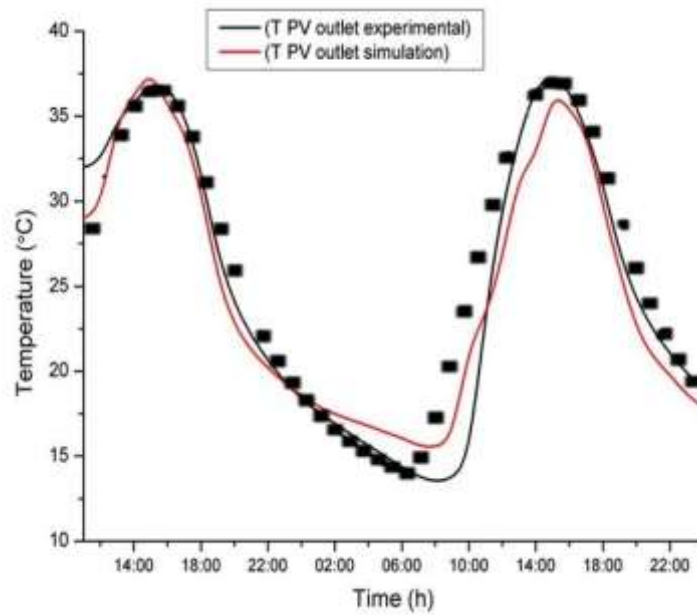


Figure 6.2 : Validation des résultats

La figure 6.2 représente la variation horaire de la température de la cellule PV enregistrée pendant deux jours successifs. On constate une bonne concordance entre les résultats obtenus et ceux de Basak et al. [39]. Une erreur relative maximale de 5% est enregistré.

La figure 6.3 montre l'évolution des températures de l'air à l'entrée et à la sortie de la paroi solaire hybride enregistrées pendant deux jours successifs. Les températures de l'air à l'entrée et à la sortie de la paroi solaire augmentent progressivement jusqu'à atteindre des valeurs maximales (290 et 317 K, respectivement) à 13 :00, les températures diminuent pour les heures qui suivent.

Entre 10h et 17h, la température à la sortie de la paroi solaire est supérieure à celle de l'entrée. Ainsi, la paroi solaire contribue clairement au chauffage passif de la chambre en soutirant l'air frais par le bas de la chambre et le refouler plus chaud par le haut. La différence entre les deux températures (entrée et sortie) atteint sa valeur maximale de 27°C à 13h.

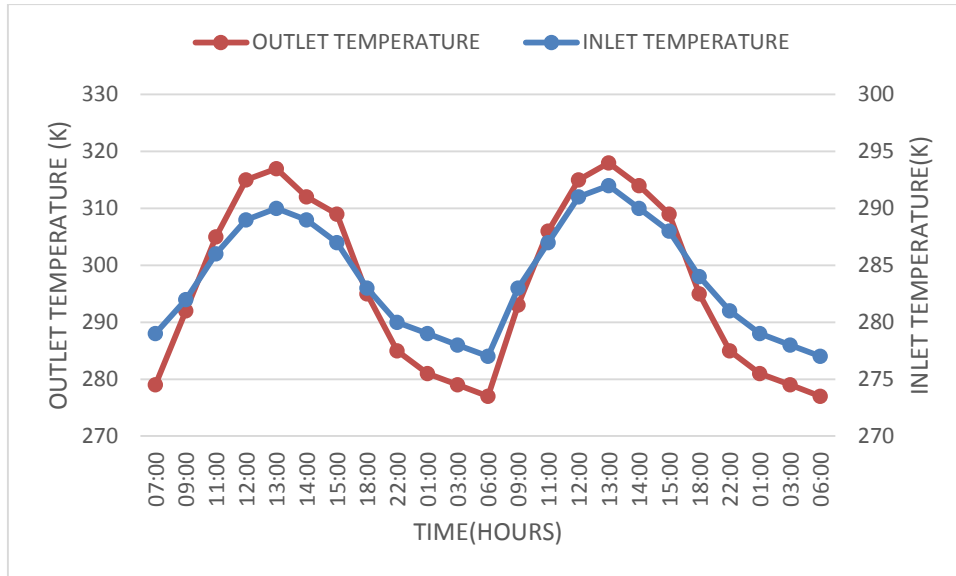


Figure 6.3. Evolution de la température d'air à l'entrée et à la sortie de la paroi solaire hybride pendant deux jours successifs.

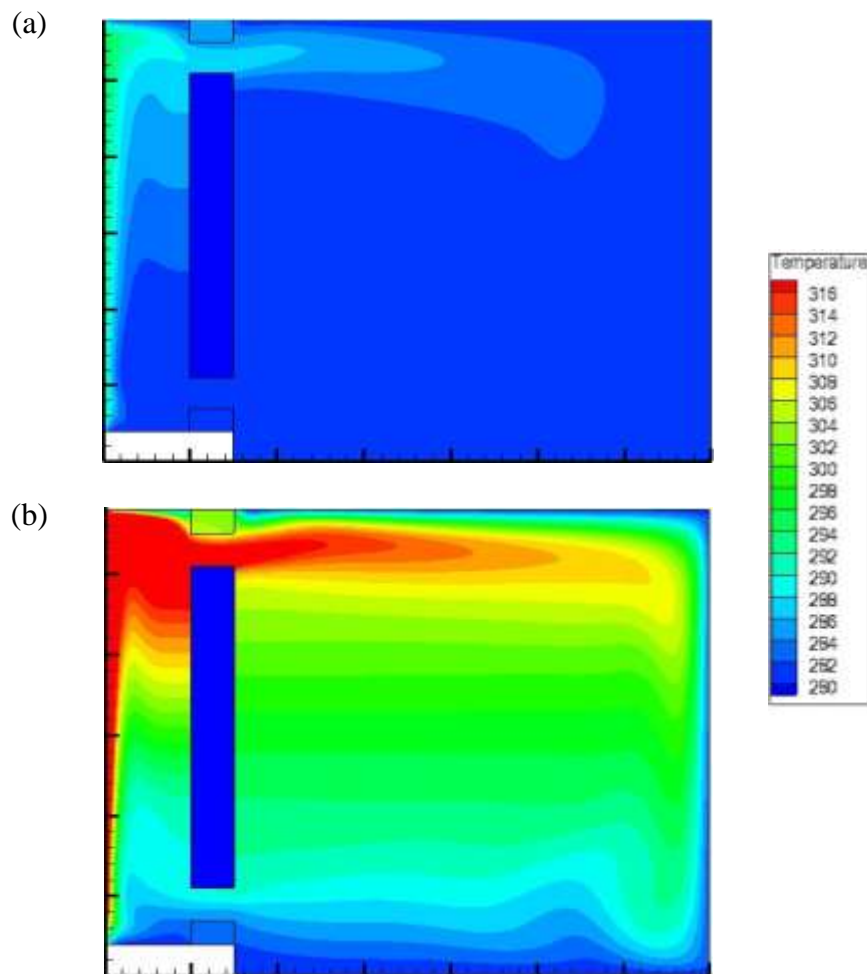


Figure 6.4 : Distribution de la température dans la chambre
(a) 09h, (b) 14h

La figure 6.4 représente les contours de la température enregistrés à 09h et 14h. La figure montre clairement que l'air de la chambre s'échauffe au cours du temps et que le renouvellement d'air se fait à travers les deux ouvertures supérieures et inférieures. L'air s'échauffe dans le mur trombe par une circulation vers le haut. En pénétrant par le haut, l'air contribue à l'échauffement de la chambre et les isothermes se présentent sous forme stratifiées. Les valeurs maximales des températures enregistrées sont autour de la cellule PV.

6.2. Résultats et discussions

6.2.1. Paroi solaire hybride simple (sans séparation) :

Dans cette partie, on présente les résultats obtenus du comportement thermique d'une chambre muni d'un capteur solaire hybride simple d'une longueur de 2.7m et une largeur de 1m, installer dans la façade sud comme expliqué déjà dans le chapitre précédent.

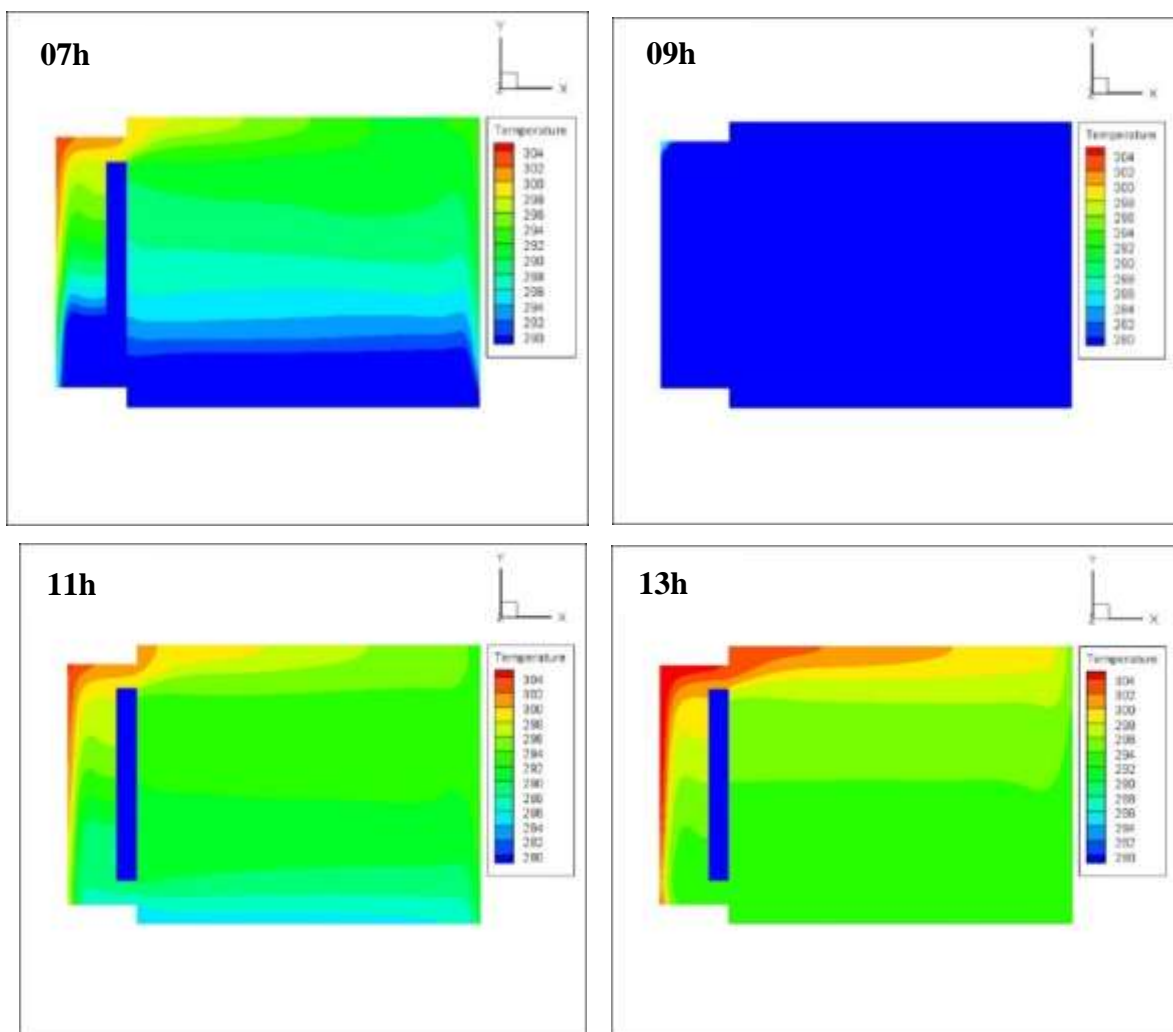


Figure 6.7 : Contours de la température enregistrés chaque 2 heures ($z=2.4m$).

La figure 6.7 montre les contours de température enregistrés toutes les deux heures entre 7h et 13h à la position $z = 2.4\text{m}$ (Cellule PV). L'augmentation du rayonnement durant la journée provoque l'augmentation de la température de l'air à l'intérieur de la cheminée et l'écart de température de l'air entre l'entrée et la sortie de la paroi solaire hybride augmente aussi (Fig. 6.7). Une augmentation de l'intensité solaire augmente la température de la cellule photovoltaïque et, par conséquent, augmente la température de l'air à l'intérieur de la paroi solaire hybride. Nous pouvons voir clairement que les valeurs importantes de la température sont enregistrées près de la cellule PV et de la fenêtre. L'air intérieur de la pièce s'échauffe naturellement par l'effet de la cheminée solaire expliqué ci-dessus.

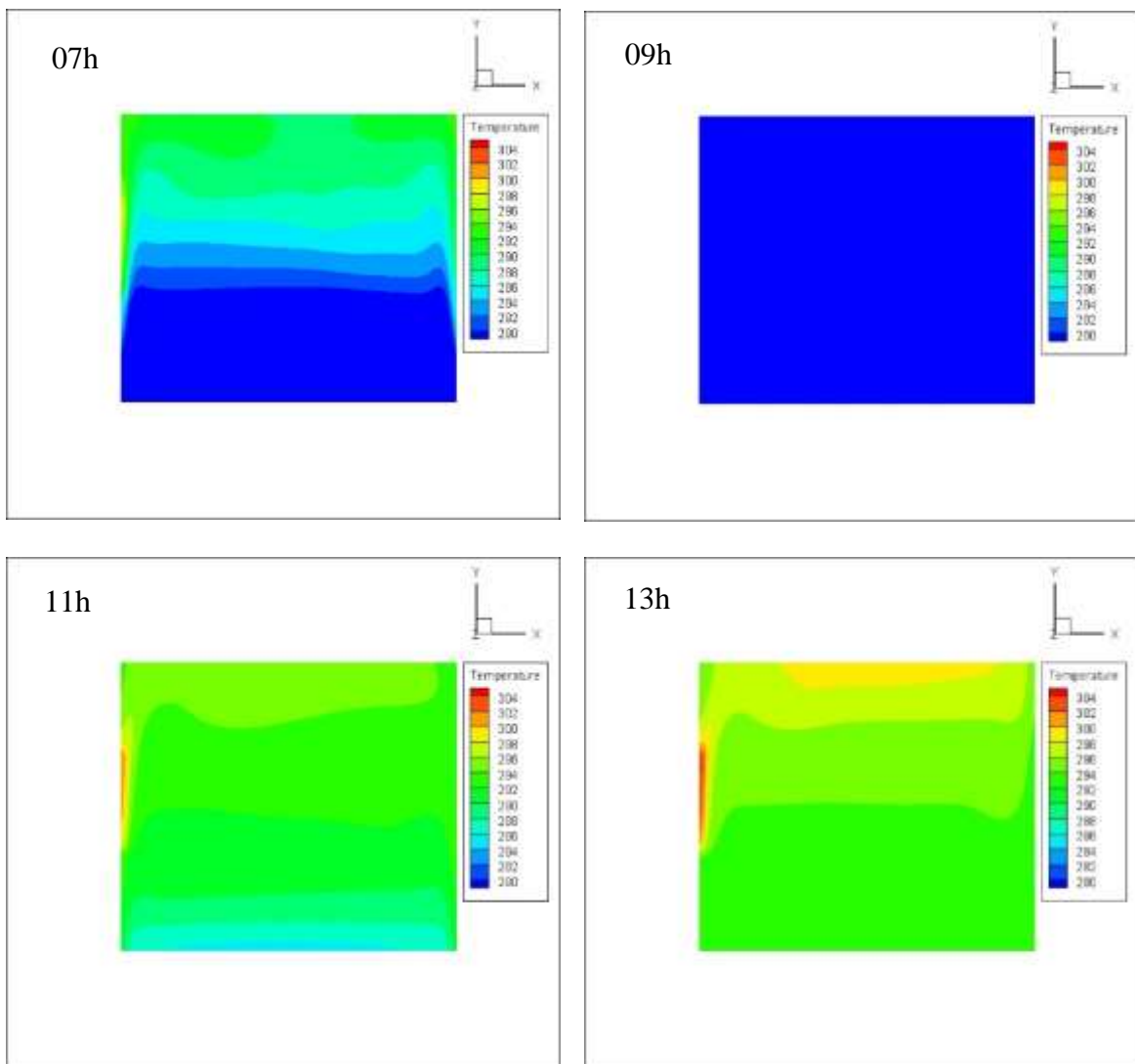


Figure 6.8 : Distribution de la température enregistrée chaque 2 heures ($z=1\text{m}$).

La figure 6.8 montre les contours de température enregistrés toutes les deux heures entre 7h et 13h à la position $z = 1$ m (fenêtre). Il est observé que la fenêtre a un effet non négligeable dans le chauffage passif de l'air dans la pièce. En effet, un transfert convectif assez intéressant est observé au voisinage de la fenêtre qui contribue à un chauffage supplémentaire de la chambre. Cela appuie l'hypothèse d'une étude tridimensionnelle dans des cas similaires.

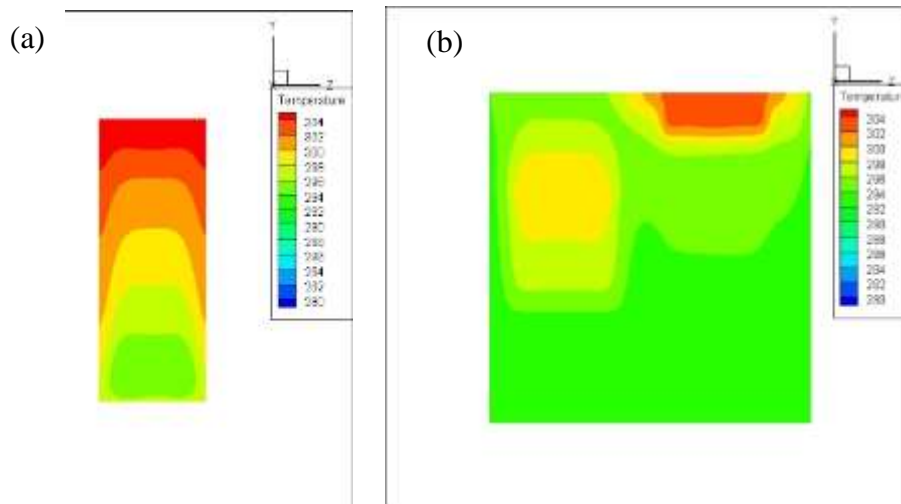


Figure 6.9 : distribution de la température près de la cellule PV (a) et la fenêtre (b)

La figure 6.9 montre la distribution de la température de l'air à 13h (a) près de la cellule PV $x = 0.05$ m et (b) près de la fenêtre $x = 0.75$ m. La figure indique que le comportement thermique de l'air à l'intérieur de la pièce dépend principalement du rayonnement solaire. Ainsi, à mesure que son intensité augmente, la température de la cellule PV et celle de la fenêtre augmentent. Nous constatons que la cellule PV enregistre la température la plus importante et la figure 5.9 indique des températures maximales près de la cellule photovoltaïque et la fenêtre de 304 et 300 K, respectivement.

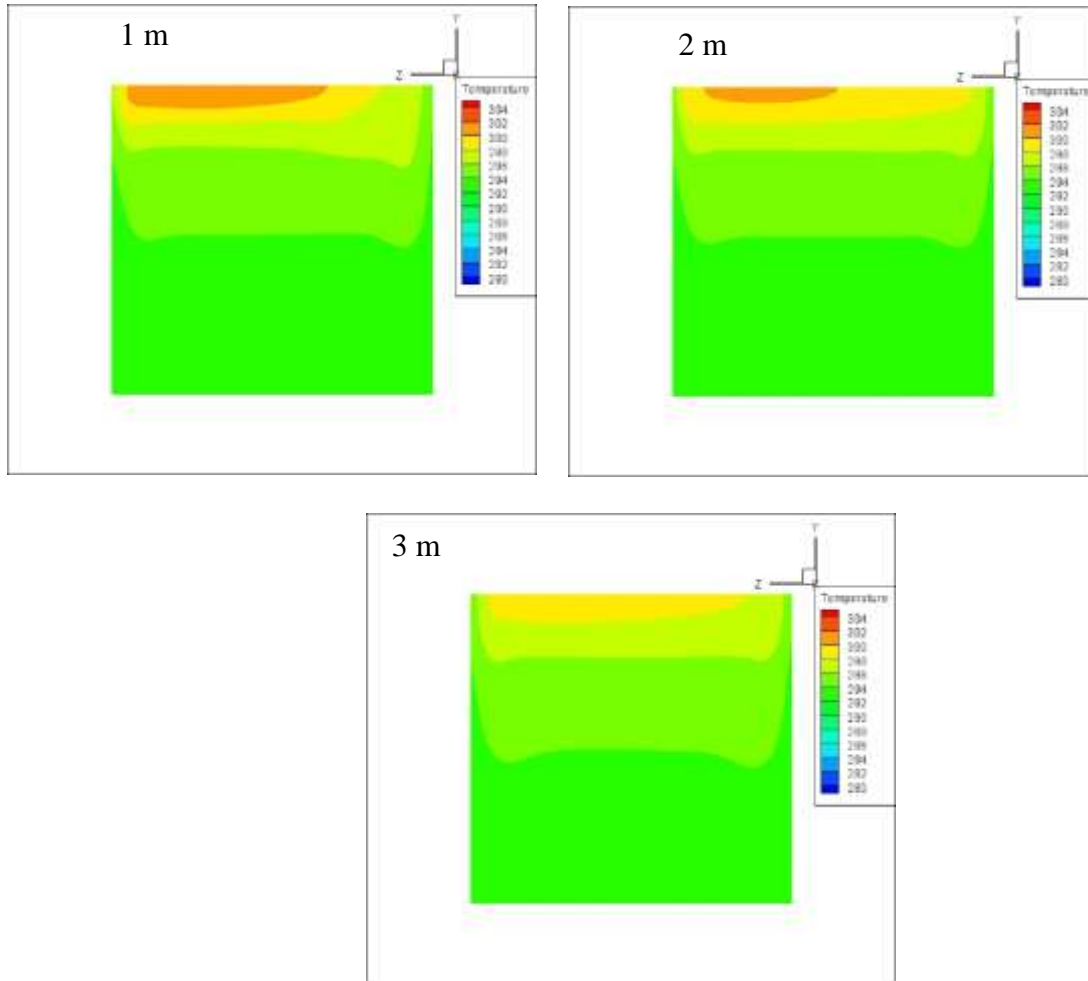


Figure 6.10 : Distribution de la température à différentes positions des x .

La Figure 6.10 montre l'évolution des températures à l'intérieur de la chambre pour différentes positions de x . A chaque instant, il est observé que les valeurs importantes enregistrées de la température à l'intérieur de la chambre sont situées dans la partie supérieure près du plafond. Ainsi, la chaleur se propage à l'intérieure de la chambre de façon naturelle par effet de gravité (flottabilité). L'écart de température maximale peut atteindre 11°C

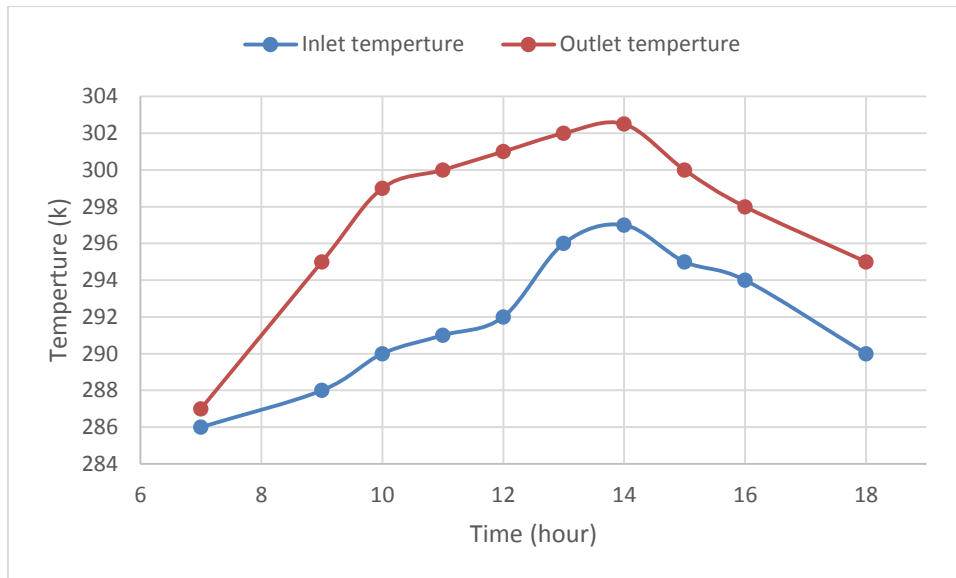


Figure 6.11 : Evolution de la température à l'entrée et à la sortie du mur solaire hybride

La figure 6.11 montre l'évolution de la température au niveau de l'entrée et la sortie de la paroi solaire hybride. L'effet de serre assure l'échauffement naturellement de l'air à l'intérieur du capteur solaire hybride. L'écart de température entraîne la montée de l'air chaud par effet de gravité. La cheminée assure donc l'extraction de l'air frais qui se trouve à l'intérieur de la pièce et le remplacé par de l'air chaud pendant les heures ensoleillé. La température de l'air à l'entrée et la sortie de la paroi solaire hybride atteint sa valeur maximale à 13h qui atteint respectivement 293 et 302 K.

6.2.2. Paroi solaire hybride avec séparation :

Une deuxième étude, consiste à insérer des plaques séparatrice en aluminium de 1m^2 de surface pour chacun, à l'intérieur de la paroi solaire hybride et voir par la suite leurs impact sur le comportement thermique et dynamique d'air à l'intérieur de la chambre ainsi que sur le refroidissement de la cellule photovoltaïque.

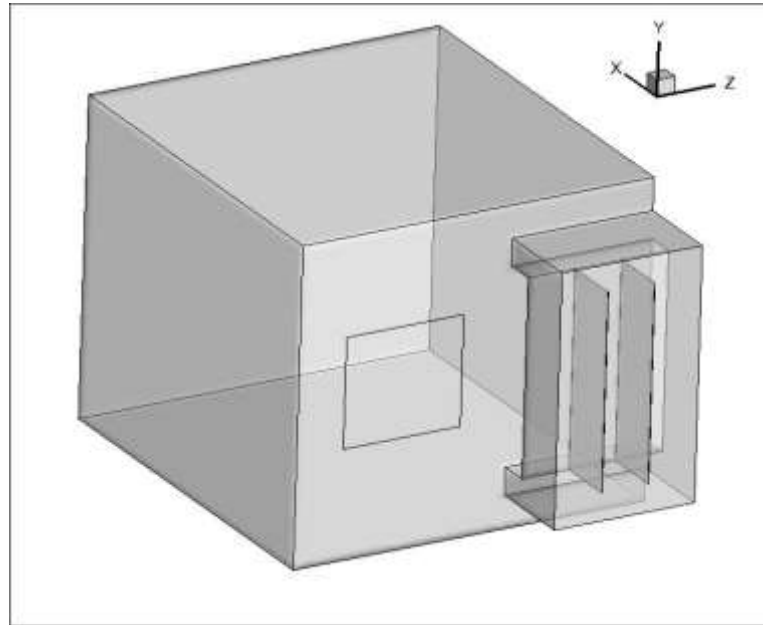


Figure 6.12 : model avec des plaques séparatrices à l'intérieur du panneau solaire hybride.

La cavité de la paroi solaire hybride sera composée de trois parties de taille identique et le flux d'air traversant la cheminée sera divisé en trois débits (Fig. 6.12) (la somme volumique des trois parties est égale au volume de la paroi simple). Les mêmes conditions aux limites utilisées dans le modèle précédent (sans séparation) sont appliquées.

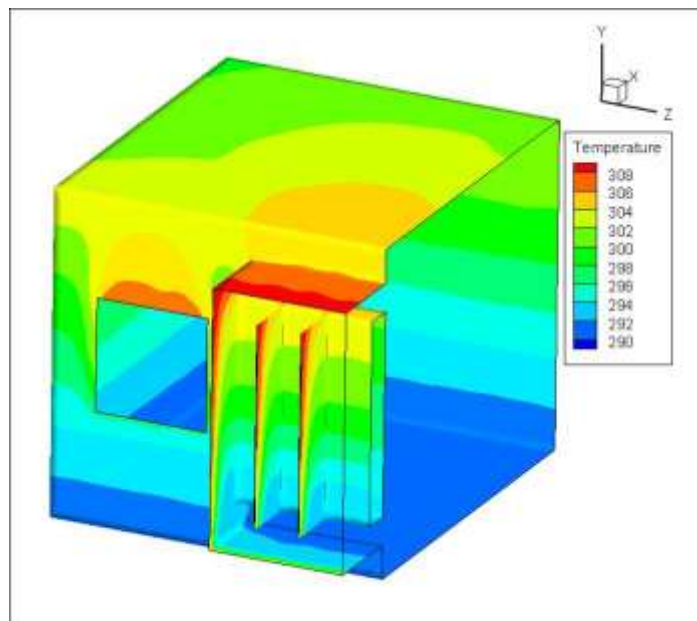


Figure 6.13 : la distribution de la température des parois de la chambre

La figure 6.13 montre la distribution de la température dans les parois et la cheminée solaire avec séparation à 11h. Les résultats montrent clairement que les valeurs importantes de la température sont enregistrées au niveau de la façade sud et au plafond. Le rayonnement reçu par la façade sud et la dalle est transmise par la suite sous forme de chaleur à l'intérieur de la chambre. L'insertion des plaques séparatrices dans la cavité de la paroi solaire, qui jouent le rôle des ailettes.

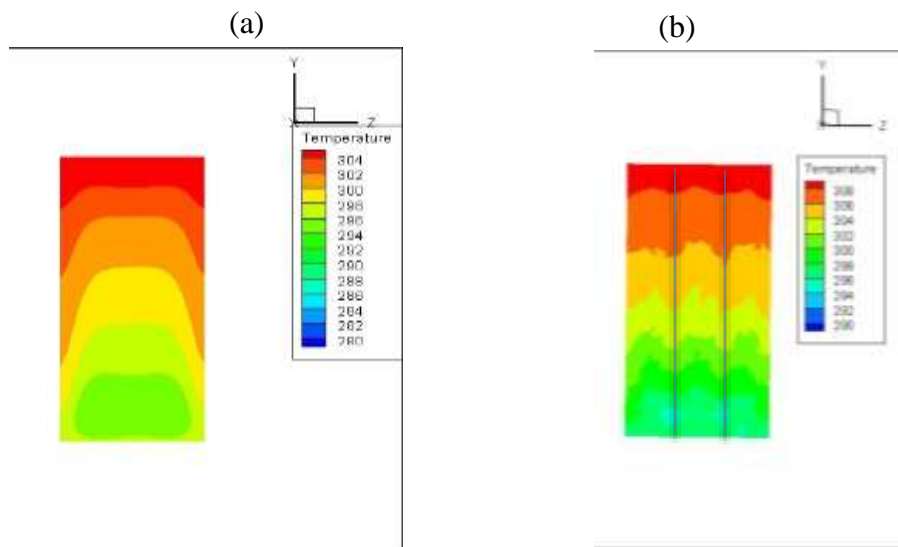


Figure 6.14 : Distribution de la température de l'air à l'intérieure de la cheminée solaire à 13h
(a) sans séparation, (b) avec séparation

La Figure 6.14 montre la distribution de la température de l'air à l'intérieure de la cheminée solaire avec et sans séparation à 13h. Les deux figure montre clairement que la distribution d'air dans le model avec séparation est instable par rapport à celle du model sans séparation qui parait très stable et homogène. Les valeurs importantes de la température dans les deux modèles sont enregistrées dans la partie haute de la paroi solaire hybride (sortie de la cheminée) tandis que les basses températures sont enregistrées dans la partie basale de la paroi solaire hybride (entrée de la cheminée).

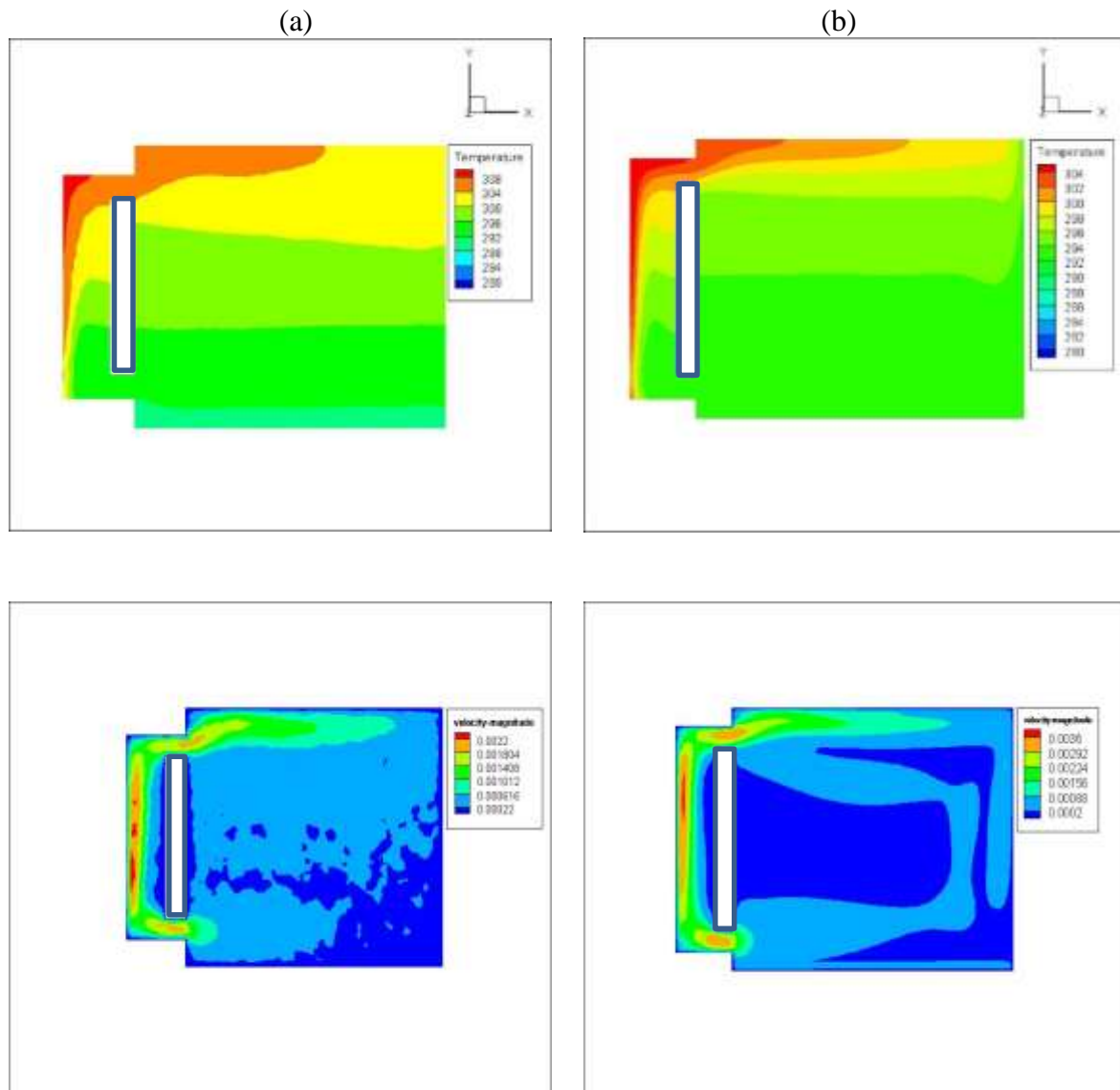


Figure 6.14 : Distribution de la température et la vitesse d'air enregistrée à 13h pour les deux modèles (a) avec séparation, (b) sans séparation

Les distributions de la vitesse et de la température de l'air à l'intérieur de la chambre ($z = 0.5$ m) dans les deux modèles avec et sans séparation enregistrés à 13h sont présentées dans la figure 5.15. Une accélération de l'air est observée au voisinage de l'entrée et la sortie de la paroi solaire hybride. Les résultats obtenus montrent que la vitesse de l'air diminue dans la configuration avec des plaques séparatrices d'environ 38%, cependant la température augmente par 4 °C. En effet, la présence des plaques séparatrices entraîne l'augmentation des forces de frottements dans la veine fluide (cheminée) provoquant la diminution de la vitesse de l'air. Ainsi, l'air aura plus de temps pour s'échauffer et la température augmente. L'ajout des plaques séparatrices réduit ainsi le taux de renouvellement d'air et améliore le chauffage des habitats.

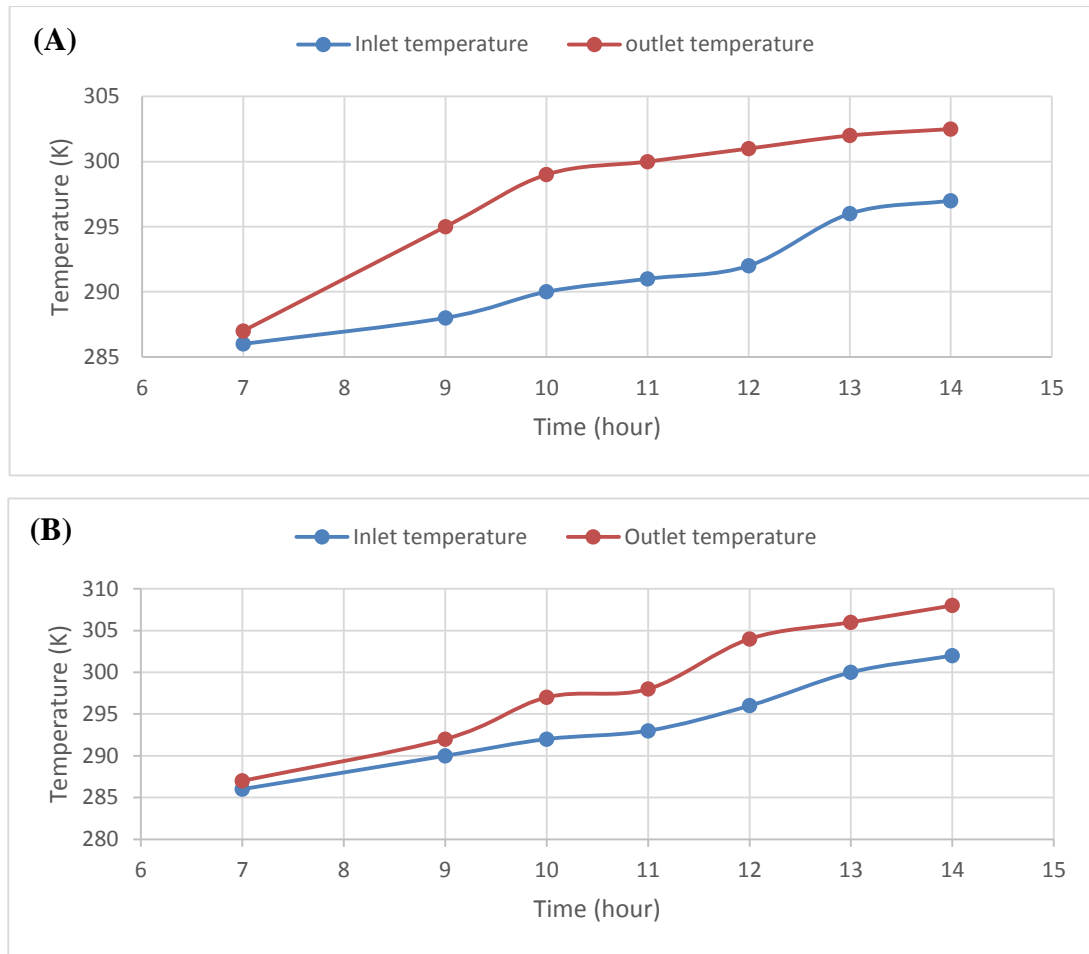


Figure 6.16 : L'évolution de la température à l'entrée et à la sortie du mur solaire hybride.
(A) Sans séparation, (B) avec séparation

La figure 6.16 montre la distribution de la température enregistrée à au niveau de l'entrée et la sortie de la paroi solaire hybride avec plaques séparatrices ($z = 0.5$ m). Le rayonnement solaire chauffe l'air piégé dans la cheminée solaire, ce dernier s'élève et s'y introduit dans la chambre à travers la sortie du mur solaire.

On remarque que les températures pour le modèle avec séparation (à l'entrée et la sortie de la paroi solaire hybride) atteignent ses valeurs maximales à 14h qui sont 302K et 308K respectivement. L'ajout des plaques séparatrices à augmenter la température par 6°C en comparant par le modèle sans plaques séparatrice.

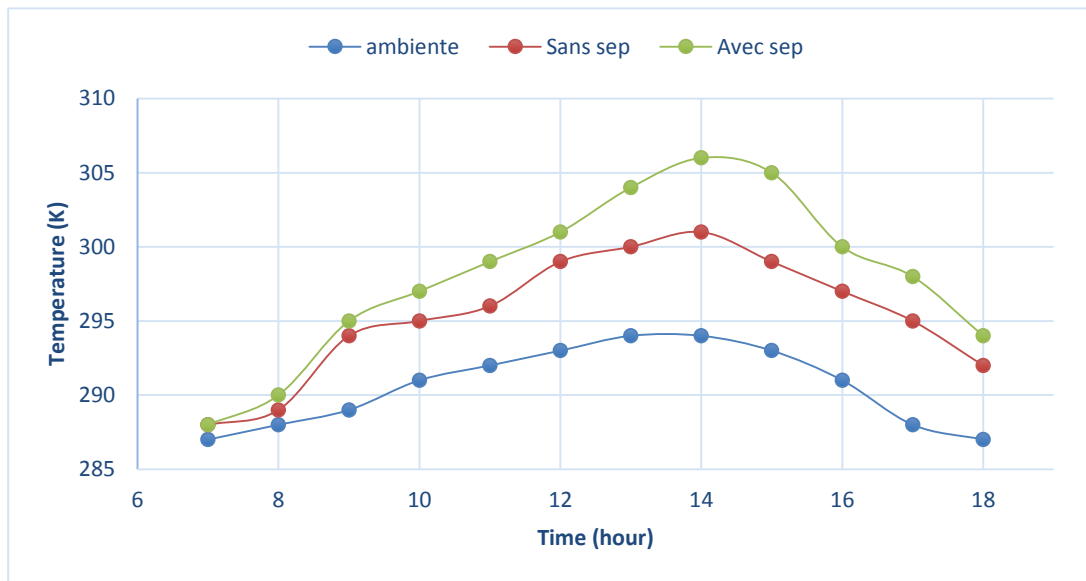


Figure 6.16 : L'évolution de la température ambiante et la température moyenne à l'intérieur de la chambre pour les deux modèles (avec et sans séparation).

La variation horaire de la température ambiante et de la température moyenne d'air à l'intérieur de la chambre sans et avec séparation est présentée dans la figure 6.16. On constate que les températures enregistrées augmentent au cours de la journée jusqu'elles atteignent ses valeurs maximales à 14h. Ensuite les températures commence à diminuer pour les heures qui suivent jusqu'elles atteignent ses valeurs minimales enregistrées à 18h. La différence entre la température ambiante et la température moyenne de l'air à l'intérieur de la chambre pour les deux modèles sans et avec plaques séparatrices atteint 10°C et 16°C respectivement.

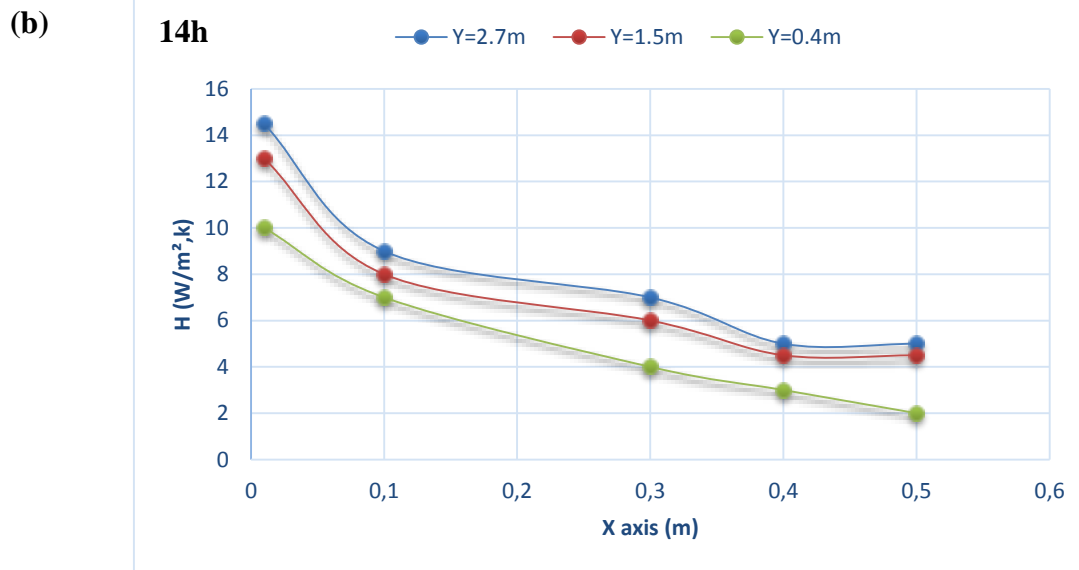
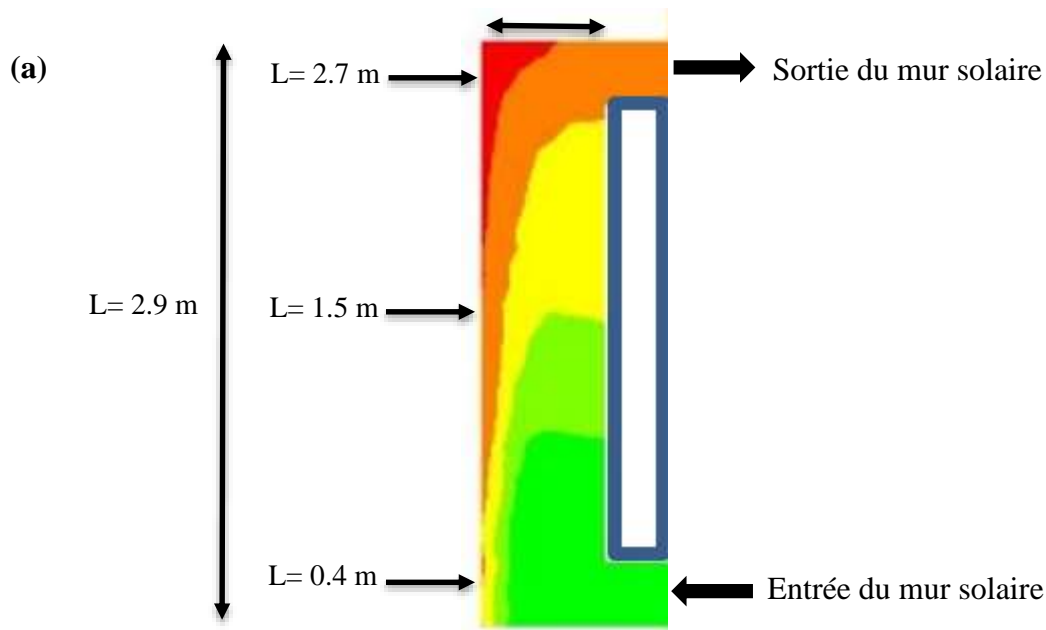


Figure 6.17 : Coefficient d'échange convectif entre la cellule photovoltaïque et l'air dans la cheminée du mur solaire à 14h.

La figure 17(b) présente l'évolution du coefficient de convection entre la cellule photovoltaïque et l'air à l'intérieur de la cheminée du mur solaire à 14h dans 3 niveaux (a). Le coefficient d'échange convectif atteint ses valeurs maximales à côté de la cellule photovoltaïque ($X=0.01\text{m}$) et diminue considérablement en s'éloignant d'elle. Le coefficient d'échange convectif varie proportionnellement avec la température d'une façon que sa plus grande valeur est enregistrée là où on a la plus grande valeur de la température d'air. Les faibles valeurs du coefficient d'échange convectif sont enregistrées dans le plan ($L=0.4\text{m}$) au niveau de l'entrée de la cheminée.

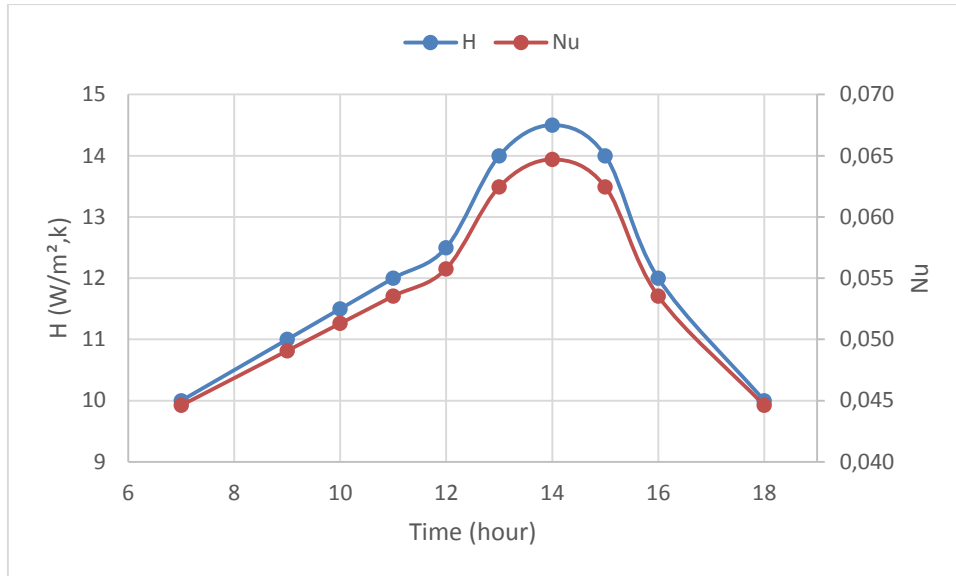


Figure 6.18 : Evolution de coefficient d'échange convectif (H) et le Nu dans le temps.

L'évolution du coefficient d'échange convectif et le Nu au cours de la journée en fonction de la température moyenne de la cellule photovoltaïque est présenté dans la figure 18. Les deux coefficients varient proportionnellement et ils atteignent ses valeurs maximales à 14h ($H=14.5 \text{ w/m}^2.k$, $Nu=0.065$). Après ils commencent à diminuer jusqu'ils atteignent ses valeurs minimales enregistrées à 18h. Il est évident que l'augmentation de la température de la cellule photovoltaïque favorise le transfert convectif entre elle et l'air qui circule dans la cheminée ce qui implique par la suite l'augmentation des valeurs du Nu.

Sep : Avec séparation Ssep : Sans séparation TP : Température de la cellule photovoltaïque

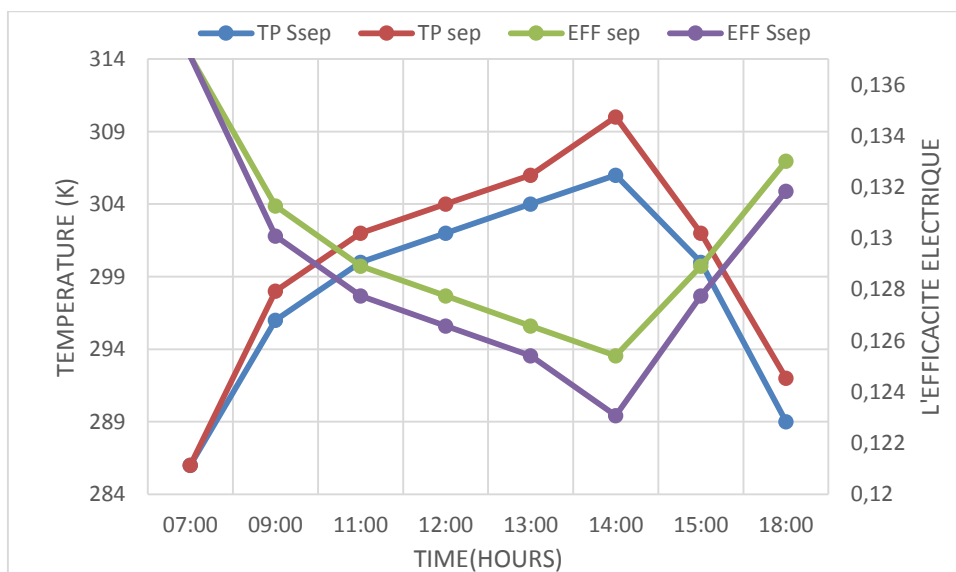


Figure 6.19: l'évolution de température de la cellule photovoltaïque et l'efficacité de la conversion électrique pour les deux models.

La Figure 6.19 montre l'évolution de l'efficacité de conversion électrique en fonction de la température de la surface de la cellule photovoltaïque pendant la journée sélectionnée le 10 décembre pour les deux modèles proposés (avec et sans séparation). L'efficacité de conversion est calculée selon la relation suivante :

$$\eta_{pv} = \eta_0(1 - 0.0045(T - 298.15)) \quad (33)$$

η_0 Est l'efficacité électrique dans des conditions standard (1000 W / m², 25 ° C) [96].

Les cellules photovoltaïques ont la capacité de produire de l'électricité pendant la journée bien qu'elles étaient exposées au rayonnement solaire. Comme on le voit sur la Figure 6.19, l'efficacité de la conversion électrique dans les deux modèles (avec et sans séparations) est inversement proportionnelle avec l'augmentation de la température. L'efficacité électrique diminue pour les deux modèles (avec et sans séparations) jusqu'à atteindre la valeur minimale enregistrée pendant toute la journée à 14h, soit 12.3% et 12.54% respectivement lorsque la température de surface des cellules PV augmente jusqu'à la valeur maximale soit 33°C et 37°C. L'efficacité électrique dans les deux modèles augmente jusqu'à atteindre les valeurs 13.3% (model sans séparations) et 13.18% (model avec séparations) à 18h lorsque la température de la surface des cellules PV diminue à 16°C et 19°C respectivement.

6.2.3. L'impact de la paroi solaire hybride dans la période d'été :

L'insertion d'une paroi solaire hybride dans la construction d'une maison pour le chauffage passif dans la période hivernale exige l'étude prolongée sur toute l'année pour déterminer par la suite son influence sur le comportement thermique de l'habitat durant la période chaude de l'année. Les données climatiques d'une journée typique de la période d'été où la température ambiante atteint les 35°C et le rayonnement solaire est de l'ordre de 820 w/m² sont utilisés pour modéliser les performances de la chambre muni d'une paroi solaire hybride.

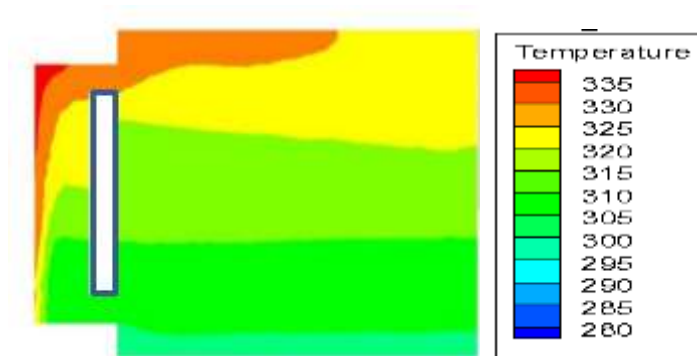


Figure 6.20 : Distribution de la température de l'air à l'intérieur de la chambre enregistrée à 14 :00

La figure 6.20 montre la distribution de la température de l'air enregistrée à 14h. La figure indique que le comportement thermique de l'air à l'intérieur de la pièce dépend principalement du rayonnement solaire. Ainsi, à mesure que son intensité augmente, la température de la cellule PV augmente considérablement. Nous constatons que la cellule PV enregistre la température la plus importante qui avoisine les 62°C et la figure 6.20 indique que la température de l'air à l'intérieur de la chambre atteint les 45°C et qui est une température insupportable pour vivre avec. Les résultats obtenus montrent que l'insertion de la paroi solaire hybride dans l'habitat résolu le problème du chauffage durant la période hivernale mais pose un grand problème dans la période chaude de l'année. Ce dernier nécessite une modification dans le système pour éliminer l'effet chauffage durant la période chaude de l'année ou bien accéder directement à l'isolation de la paroi solaire dans cette période.

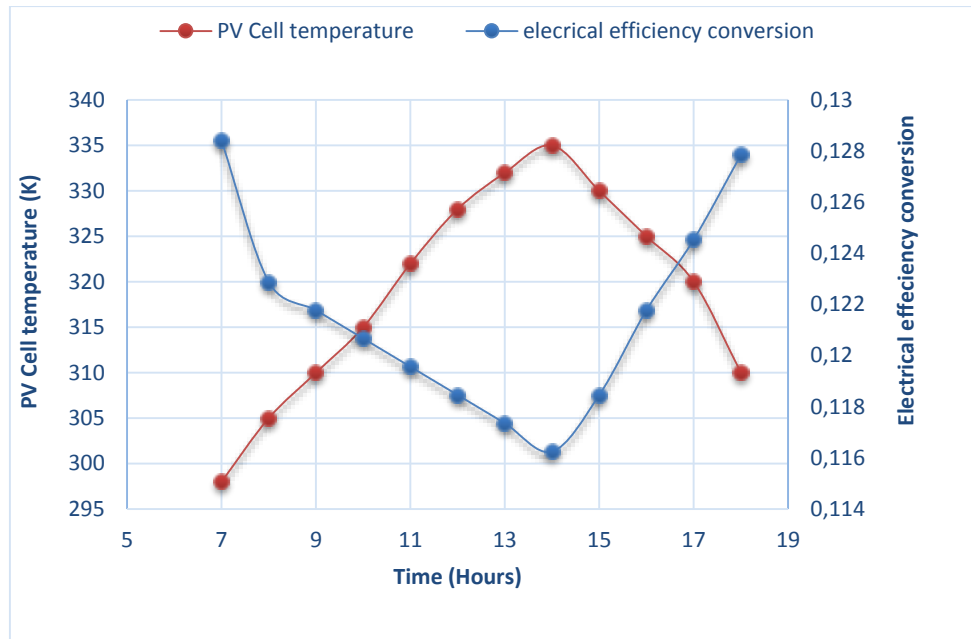


Figure 5.21 : l'évolution de température de la cellule photovoltaïque et l'efficacité de la conversion électrique.

La Figure 6.21 montre l'évolution de l'efficacité de la conversion électrique en fonction de la température de la surface de la cellule photovoltaïque pendant une journée de la période chaude de l'année (10 juin) pour le modèle sans séparation.

On l'efficacité de la conversion électrique est toujours inversement proportionnelle avec l'augmentation de la température de la cellule photovoltaïque durant la journée. L'efficacité électrique diminue jusqu'à atteindre la valeur minimale enregistrée pendant toute la journée à 14h, soit 11.62% lorsque la température de surface des cellules PV augmente jusqu'à la valeur maximale soit 62°C.

Solutions proposés pour la période chaude :

Le problème de sur-chauffage lors de l'adaptation d'une paroi solaire hybride dans l'habitat peut être résolu selon deux techniques proposées :

- ❖ Utilisation des volets mobiles (figure 6.22) : en adaptant des volets mobiles on peut évacuer l'air chauffé dans la serre de la paroi solaire vers l'extérieur, par cette technique la paroi solaire hybride aura pour but le rafraîchissement de la chambre comme expliqué dans la synthèse bibliographique [22].

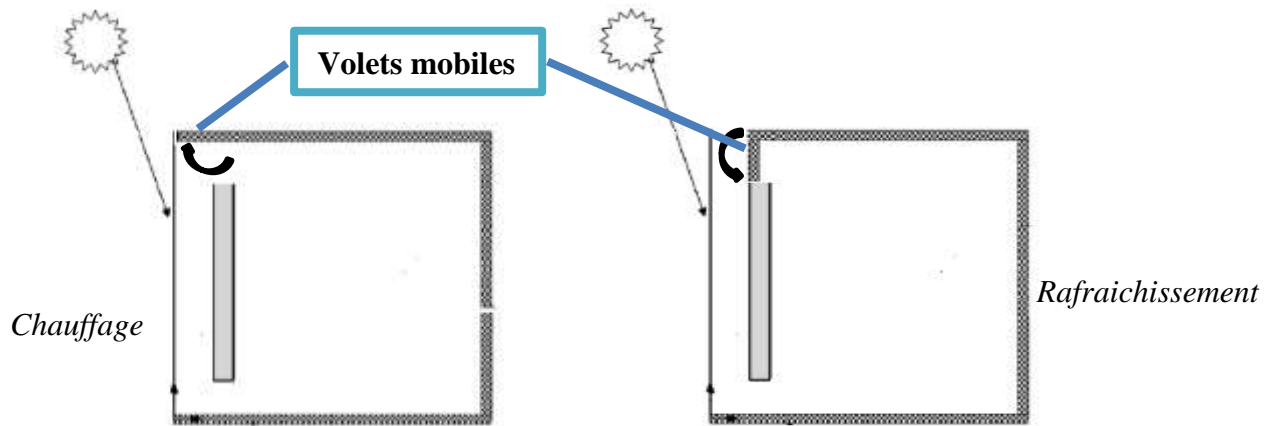


Figure 6.22 : prototype proposé avec des volets mobiles

- ❖ L'utilisation d'un système d'isolation pour éliminer le système de chauffage de la paroi solaire hybride, ou bien le démontage de la cellule photovoltaïque (figure 6.23)

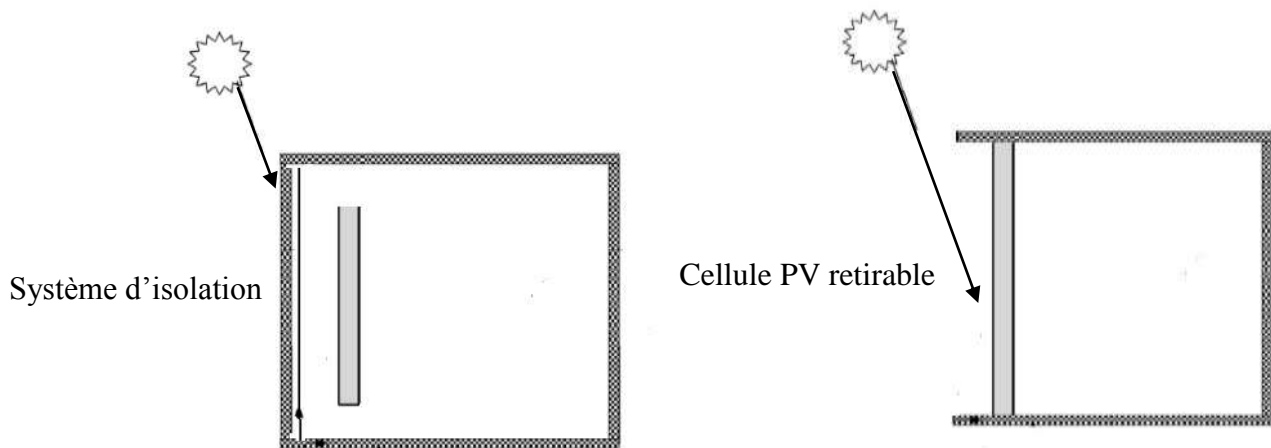


Figure 6.23 : Techniques proposées pour éliminer le sur-chauffage durant la période chaude de l'année.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le but de ce travail est de présenter les performances de l'intégration d'une paroi solaire hybride dans un bâtiment écologique. La simulation numérique du modèle proposé par le code fluent 6.3 est réalisée selon les données climatiques de la ville de Tlemcen.

Le modèle prend en compte les transferts de masse d'air, les échanges convectifs au niveau de la cheminée solaire, et aussi les transferts radiatifs.

La thèse s'appuie sur des approches numériques qui ont pour ambition d'être appliquées dans une situation hivernale où le chauffage est indispensable et durant laquelle les problématiques de gestion de l'humidité conduisent à une utilisation non rationnelle de l'énergie. L'intégration d'une paroi solaire hybride a pour but :

- ❖ Assurer le besoin en électricité le point qui n'est pas traité dans cette thèse.
- ❖ assurer le chauffage passif de la chambre qui est l'objectif de cette étude.

Cette étude montre d'abord que la paroi solaire est une solution efficace pour le chauffage passif des bâtiments. En adaptant une paroi solaire, la température moyenne de l'air à l'intérieur de la pièce peut atteindre 28 ° C lorsque la température ambiante est inférieure à 20 ° C.

La simulation des différentes configurations étudiées a été assurée avec le code de calcul commercial ANSYS-FLUENT. Le modèle géométrique étudié est tridimensionnelle (3D) en régime instationnaire (fonctionnement journalier des panneaux avec un rayonnement variable du lever au coucher de soleil). Une validation du modèle numérique utilisé en 2D a été effectuée avec les résultats de la littérature. Les résultats de simulation montrent une bonne concordance avec les résultats expérimentaux.

Les résultats obtenus montrent que la température de la cellule photovoltaïque a augmenté par 4°C quand on a subdivisé la cavité du capteur solaire hybride en petites parties, y compris par la suite une libération plus importante de la chaleur de la cellule photovoltaïque, de sorte que la température de l'air à l'intérieur de la paroi solaire hybride augmente également. Les plaques séparatrices intégrées dans la paroi solaire hybride diminuent la vitesse de l'air à l'intérieur de la cheminée.

L'ajout des plaques séparatrices à l'intérieur de la paroi solaire hybride améliore nettement le chauffage d'air de la chambre (T_{air} à augmenter par 6°C), tandis que cette dernière affecte négativement l'efficacité électrique de la cellule photovoltaïque.

En ce qui concerne la prise en compte de la course du soleil, puisqu'elle ne situe pas rigoureusement dans un plan, une modélisation en 3 dimensions est indispensable pour déterminer l'influence de chaque composant sur le comportement thermique de la chambre (influence de la fenêtre).

Il existe plusieurs options pour améliorer l'efficacité de notre paroi solaire :

- ❖ augmenter l'insolation des parois environnantes pour limiter les pertes de chaleur vers l'extérieur.
- ❖ l'intégration du MCP (Matériaux à Changement de Phase) pour prolonger le temps de fonctionnement de notre mur de stockage.
- ❖ L'installation d'un ventilateur dans l'entrée de la paroi solaire hybride accélère le renouvellement d'air de la chambre et en même temps assure le refroidissement de la cellule photovoltaïque et par conséquent on aura une efficacité électrique meilleure.
- ❖ Une étude de l'impact du nombre des plaques séparatrice à l'intérieur de la paroi solaire pour maximiser le gain de la chaleur ou bien un couplage entre l'insertion d'un ventilateur et un nombre optimal des plaques séparatrices fera l'objet d'une optimisation du chauffage passif de la chambre et l'efficacité électrique de la cellule à la fois.
- ❖ Dernièrement, la mise en évidence de ce type des parois solaire hybride dans l'habitat doit être justifié par une étude économique coté besoin électrique et du chauffage, et valider expérimentalement.

Références bibliographiques

- [1] PEUSER F. A., REMMERS K., H., SCHNAUSS M. Installations solaires thermiques : Conception et mise en œuvre. Paris : Systèmes solaires, 2004. 403 p.
- [2] **EUROSERV'ER**. Le baromètre du solaire thermique. [En ligne]. Disponible sur : < http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/stat_baro/observ/baro180.pdf> (consulte le 29. 10. 2007).
- [3] EPIA, IEA-PVPS, EPVTP. Compared assessment of selected environmental indicators of photovoltaic electricity in OECD cities. Eds. Bruxelles, Belgique: EPIA, IEAPVPS, EPVTP, 2006, 32 p.
- [4] HAMADA Y., NAKAMURA M., OCHIFUJI K., et al. Field performance of a japanese low energy home relying on renewable energy. *Energy and Buildings*, 2001, vol. 33, n° 8, pp. 805-814.
- [5] HEADLEY O. Renewable energy technologies in the Caribbean. *Solar Energy*, 1997, vol. 59, n° 1-3, pp.1-9.
- [6] Projet de Recherche Intégré 6.2. Intégration de capteurs hybrides photovoltaïques-thermiques au bâti. Ed. Rapport final. Lyon, France, 2004, 52 p.
- [7] LAUGIER A., ROGER J. A. Les photopiles solaires : du matériau au dispositif, du dispositif aux applications. Paris, France : Technique et documentation, 1981, 307 p.
- [8] Projet de Recherche Intégré 6.2. Intégration de capteurs hybrides photovoltaïques thermiques au bâti. Ed. Rapport final. Lyon, France, 2004, 52 p.
- [9] TSELEPIS S., TRIPANAGONOSTOPOULOS Y. Economic analysis of hybrid photovoltaic/thermal solar systems and comparison with standard PV modules. In: *Proceedings of the International conference PV in Europe, 2002, Rome, Italie*, pp.856- 859.
- [10] RADZIEMSKA E. Thermal performance of Si and GaAs based solar cells and modules: a review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2003, vol. 29, n° 5, pp. 407-424.
- [11] KALOGIROU S. A. Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2004, vol. 30, n° 3, pp. 231-295.
- [12] ZONDAG H. A. Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2005. Accepté pour publication.
- [13] ZONDAG H. A., BAKKER M., HELDEN W. G. J. Eds. PV/T Roadmap-a European guide for the development and market introduction of PV-Thermal technology. Rapport EU-Project PV - Catapult. 2005, 87 p.
- [14] WOLF M. Performance analyses of combined heating and photovoltaic power systems for residences. *Energy Conversion*, 1976, vol. 16, n° 1-2, pp.79-90.

- [15] KERN E. C., RUSSELL M. C. Combined photovoltaic and thermal hybrid collector systems. In: Proceeding of 13th IEEE Photovoltaic Specialists, 1978, Washington DC, Etats-Unis, pp. 1153-1157.
- [16] HENDRIE S. D. Photovoltaic/thermal collector development program. Rapport final. Etats-Unis: Massachusetts Institute of Technology, 1982.
- [17] RAGHURAMAN P. Analytical predictions of liquid and air photovoltaic/thermal, flat -plate collector performance. *Journal Solar Energy Engineering*, 1981, vol.103, n° 2, pp. 291-298.
- [18] COX C. H., RAGHURAMAN P. Design considerations for flat-plate photovoltaic/thermal collectors. *Solar Energy*, 1985, vol. 35, n° 3, pp. 227-241.
- [19] LALOVIC B., KISS Z., WEAKLIEM H. A hybrid amorphous silicon photovoltaic and thermal solar collector. *Solar Cells*, 1986, vol. 19, n° 2, pp. 131-138.
- [20] D.M. Utzinger, '*Analysis of Building Components Related to Direct Solar Heating of Building*', M.S. Thesis, University of Wisconsin, Madison, 1979.
- [21] N. K. BANSAL*, RAJESH MATHUR*, M. S. BHANDARI*, *Solar Chimney for Ventilation Enhanced Stack ventilation*, building and environment. vol. 28. No. 3. pp. 373-377. 1993).
- [22] Ramadan Bassiouny *, Nader S.A. Koura, *An analytical and numerical study of solar chimney use for room natural ventilation*, *Energy and Buildings* 40 (2008) 865–873
- [23] Ramadan Bassiouny *, Nader S.A. Korah, *Effect of solar chimney inclination angle on space flow pattern and ventilation rate*, *Energy and Buildings* 41 (2009) 190–196.
- [24] Guohui Gan, Simulation of buoyancy-driven natural ventilation of buildings-Impact of computational domain, *Energy and Buildings* 42 (2010) 1290–1300.
- [25] Laurent Zalewski et al, *Experimental study of small-scale solar wall integrating phase change material*, *Solar Energy* 86 (2012) 208–219.
- [26] Bourdeau, L., Jaffrin, A., 1979. *Actual performance of a latent heat diode wall*. In: Proceedings of Izmir International Symposium II on Solar Energy Fundamentals and applications, Izmir Turkey.
- [27] Knowles, T., 1983. *Proportioning composites for efficient thermal storage walls*. *Solar Energy* 31 (3), 319–326.
- [28] N.K. Bansal, R. Mathur, M.S. Bhandari, *Solar chimney for enhanced stack ventilation*, *Building and Environment* 28 (3) (1993) 373–377.

- [29] J. Mathur, N.K. Bansal, S. Mathur, M. Jain, Anupma, *Experimental investigations on solar chimney for room ventilation*, Solar Energy 80(2006) 927–935.
- [30] M. Macias, A. Mateo, M. Schuler, E.M. Mitre, *Application of night cooling concept to social housing design in dry hot climate*, Energy and Buildings 38 (2006) 1104–1110.
- [31] J. Matrti-Herrero, M.R. Heras-Celemin, *Dynamic physical model for a solar chimney*, Solar Energy 81 (5) (2007) 614–622.
- [32] S. Chungloo, B. Limmeechockai, *Application of passive cooling systems in the hot and humid climate: the case study of solar chimney and wetted roof in Thailand*, Building and Environment 42 (9) (2007) 3341–3351.
- [33] J.Mathur, S. Mathur, Anupma, *Summer-performance of inclined roof solar chimney for natural ventilation*, Energy and Buildings 38 (2006) 1156–1163.
- [34] L. Author and B. Pollard, *Double skin façades more is less*, in Proc. Int. Sol. Energy Soc. Conf, 2000, vol. 21, pp. 1–25.
- [35] Mostafa M. S. Ahmed et al. *Double Skin Façade: The State of Art on Building Energy Efficiency*, Journal of Clean Energy Technologies, Vol. 4, No. 1, January 2016
- [36] Nazanin Nasrollahi*, Majid Salehi, *Performance enhancement of double skin facades in hot and dryclimates using wind parameters*, Renewable Energy 83 (2015) 1e12.
- [37] Hanan M. Taleb*, *Natural ventilation as energy efficient solution for achieving low-energy houses in Dubai*, Energy and Buildings 99 (2015) 284–291.
- [38] J. K. Afriyie^{a,*}, H. Rajakaruna^a, M. A. A. Nazha^b, F. K. Forson^c, *Simulation and optimisation of the ventilation in a chimney-dependent solar crop dryer*, Solar Energy 85 (2011) 1560–1573.
- [39] Basak Kundakci Koyunbaba , Zerrin Yilmaz, *The comparison of Trombe wall systems with single glass, double glass and PV panels*, Renewable Energy 45 (2012) 111e118.
- [40] Wei Sun *, Jie Ji, Chenglong Luo, Wei He, *Performance of PV-Trombe Wall in winter correlated with South façade design*, Applied Energy 88 (2011) 224–231.
- [41] Ahmer A.B. Baloch, Haitham M.S. Bahaidarah, Palanichamy Gandhidasan and Fahad A. Al-Sulaiman, 2015. Experimental and numerical performance analysis of a converging channel heat exchanger for PV cooling. Energy Conversion and Management, 103 14–27.
- [42] Fujisawa T & T.Tani, 1997. Annual exergy evaluation on photovoltaic-thermal hybrid collector. Solar Energy Materials and Solar Cells, 47 135–48.

- [43] Tripanagnostopoulos Y, Nousia TH, Souliotis M, Yianoulis P, 2002. Hybrid PV/thermal solar systems. *Solar Energy*, 72 (3) 217–234.
- [44] Amna A. Alzaabi, Nadine K. Badawiyeh, Hind O. Hantoush, A. K. Hamid, 2014. Electrical/thermal performance of hybrid PVT system in Sharjah, UAE. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 3 385-389.
- [45] Adnan Ibrahim, Ahmad Fudholi, Kamaruzzaman Sopian, Mohd Yusof Othman, Mohd Hafidz Ruslan, 2014. Efficiencies and improvement potential of building integrated photovoltaic thermal (BIPVT) system. *Energy Conversion and Management*, 77 527–534.
- [46] Kiran S, U Devadiga, 2014. Performance Analysis of Hybrid Photovoltaic/Thermal Systems. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4 80-86.
- [47] Majdi Hazami, Ali Riahi, Farah Mehdaoui, Omeima Nouicer, Abdelhamid Farhat, 2016. Energetic and exergetic performances analysis of a PVT (photovoltaic thermal) solar system tested and simulated under to Tunisian (North Africa) climatic conditions, *Energy*, 107 78-94.
- [48] Tiwari A, Sodha MS, 2007. Parametric study of various configurations of hybrid PV/Thermal air collector : experimental validation of theoretical model. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91 17–28.
- [49] Joshi A.S., Tiwari A, 2007. Energy and exergy efficiencies of a hybrid photovoltaic thermal (PVT) air collector. *Renewable Energy*, 32 (13) 2223-2241.
- [50] Aste N, M. Beccaliand G. Chiesa, 2002. Experimental evaluation of the performance of a prototype hybrid solar photovoltaic-thermal (PVT) air collector for the integration in sloped roof.
- [51] Tonui J. K, Y. Tripanagnostopoulos, 2008. Performance improvement of PVT solar collectors with natural air flow operation, *Solar Energy*, 82 1–12.
- [52] Basant Agrawal, G.N. Tiwari, 2010. Life cycle cost assessment of building integrated photovoltaic thermal (BIPVT) systems. *Energy and Buildings*, 42 1472–1481.
- [53] Jong-Gwon Ahn, Jin-Hee Kim, Jun-Tae Kim, 2015. A Study on Experimental Performance of Air-Type PVT Collector with HRV, *Energy Procedia*, 78 3007 – 3012.
- [54] Mojumdera JC, Chonga WT, Onga HC, Leong KY, Al-Mamoon A, 2016. Experimental investigation on performance analysis of air type PV thermal collector system integrated with cooling fins design. *Energy and Building*, 130 272–285.
- [55] Tripanagnostopoulos Y. & al, 2001. Hybrid PVT systems with dual heat extraction operation. In: proceedings of the 17th European PV Solar Energy Conference, Munich, Allemagne, 2515-2518.

- [56] Assoa Y B, Menezo C, Fraisse G, Yezou R, Brau J, 2007. Study of a new concept of photovoltaic-thermal hybrid collector. *Solar Energy*, 81(9) 1132–43.
- [57] Kostic Lj T & al, 2010. Optimal design of orientation of PVT collector with reflectors. *Applied Energy*, 87 3023–9.
- [58] Coventry JS, 2005. Performance of a concentrating photovoltaic/thermal solar collector. *Solar Energy*, 78 211–22.
- [59] Monia Chaabane, Wael Charfi, Hatem Mhiri, Philippe Bournot, 2013. Performance evaluation of concentrating solar photovoltaic and photovoltaic/thermal systems. *Solar Energy*, 98 315–321.
- [60] Davide Del Col, Matteo Bortolato, Andrea Padovan, Michele Quaggia, 2014. Experimental and numerical study of a parabolic trough linear CPVT system. *Energy Procedia*, 57 255 – 264.
- [61] Hasan A, McCormack S, Huang M, Norton B, 2010. Evaluation of phase change materials for thermal regulation enhancement of building integrated photovoltaic, *Solar Energy*, 84 1601–1612.
- [62] Christopher J. Smith, Piers M. Forster, Rolf Crook, 2014. Global analysis of photovoltaic energy output enhanced by phase change material cooling. *Applied Energy*, 126 21–28.
- [63] Hagar Elarga, Francesco Goia, Angelo Zarrella, Andrea Dal Monte, Ernesto Benini, 2016. Thermal and electrical performance of an integrated PV-PCM system in double skin façades: A numerical study. *Solar Energy*, 136 112–124.
- [64] Sajan Preet, Brij Bhushan, Tarun Mahajan, 2017. Experimental investigation of water based photovoltaic/thermal (PVT) system with and without phase change material (PCM). *Solar Energy*, 155 1104–1120.
- [65] Mohammad Sardar abadi, Mohammad Passandideh-Fard, Mohammad-Javad Maghrebi, Mohsen Ghazikhani, 2017. Experimental study of using both ZnO/ water nano-fluid and phase change material (PCM) in photovoltaic thermal systems, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 161 62–69.
- [66] M.Y. Othman, S.A. Hamid, M.A.S. Tabook , K. Sopian , M.H. Roslan , Z. Ibarahim « Performance analysis of PV/T Combi with water and air heating system: An experimental study » *Renewable Energy* 86 716e722. 2016
- [67] A.Khelifa, H. Ben Moussa , K. Touafek , M. Adouane et I. Tabet « Etude du chauffage de l'eau par le capteur solaire hybride ». *Revue des Energies Renouvelables SIENR'14 Ghardaïa* 285 – 291. 2014

- [68] M. Viloz, Centrales photovoltaïques, Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets, PACER, 1996.
- [69] M.A. Green :Third Generation photovoltaics: Advanced Solar Electricity Generation. Springer. Berlin, 75,2003.
- [70] IEC 61194, Characteristic parameters of stand-alone photovoltaic (PV) systems, 1992
- [71] IEC 61724, Photovoltaic system performance monitoring- Guidelines for measurement, data exchange and analysis, 1998
- [72] J. Bernard, Energie solaire calcul et optimisation, 1ère édition, ELLIPES, Paris, 2004.
- [73] Kalogirou S. A & TRIPANAGNOSTOPOULOS Y, 2007. Industrial application of PV/T solar energy systems. *Applied Thermal Engineering*, 27 (8-9) 1259-1270.
- [74] Zaatri A., Azzizi N., (2016), “Evaluation of some mathematical models of solar radiation received by a ground collector”, *World Journal of Engineering*, vol. 13: 376 – 380.
- [75] Lealea T., Tchinda R., (2013), “Estimation of diffuse solar radiation in the north and far north of Cameroon”, *European Scientific Journal*, vol. 9.
- [76] El-Mghouchi Y., El Bouardi A., Choulli Z. et al., (2014), “Estimate of the Direct, Diffuse and Global Solar Radiations”, *International Journal of Science and Research*, vol.3: 1449-1457.
- [77] Gueymard C., (2014), “The sun’s total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models”, *Solar Energy*, 76 (4), 423-453.
- [78] Otunla T., (2019), “Estimates of clear-sky solar irradiances over Nigeria”, *Renewable Energy*, vol. 131:778-787.
- [79] Ruiz-Arias J., Gueymard C., (2018), “Worldwide inter-comparison of clear-sky solar radiation models: Consensus-based review of direct and global irradiance components simulated at the earth surface”, *Solar Energy*, vol. 168:10-29.
- [80] Scarpa F., Bianco V., Tagliafico L., (2018), “A clear sky physical based solar radiation decomposition model”, *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 6:323-329.
- [81] Berk A., Bernstein L., Robertson D., (1989), “MODTRAN: A Moderate Resolution Model for LOWTRAN7”, Rep. GL-TR-89-0122. Air Force Geophys. Lab., Bedford, MA.
- [82] Bird R., Riordan C., (1986), “Simple Solar Spectral Model for Direct and Diffuse Irradiance on Horizontal and Tilted Planes at the Earth’s Surface for Cloudless Atmospheres”, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, vol. 25:87-97.
- [83] Gueymard C., (1995), “A simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine: algorithms and performance assessment », *Florida Solar Energy Center*.
- [84] Ashrae, (1985), “Handbook of fundamentals. Atlanta, Georgia: American Society of Heating”, *Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers*.

- [85] Hegazy AA, 2000. Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collectors. *Energy Conversion Management*, 41 861-881.
- [86] Kostic Lj T, 2010. Optimal design of orientation of PV/T collector with reflectors. *Applied Energy*, 87 3023–9.
- [87] Norton, T., Sun, D.W., Grant, J., Fallon, R., Dodd, V., 2007. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in agricultural industry: a review. *Bioresource technology* 98, 2386-2414.
- [88] Bournet, P.-E., Boulard, T., 2010. Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: a review of experimental and CFD studies. *Comput. Electron. Agric.* 74, 195–217.
- [89] Boussinesq, J., 1903. *Théorie analytique de la chaleur mise en harmonie avec la thermodynamique et avec la théorie mécanique de la lumière*, volume 2, Gauthier-Villars.
- [90] Tennekes, H., Lumley, J.L., 1972. *A First Course in Turbulence*. MIT Press, Cambridge, New York.
- [91] McAdams W.H, 1954. *Heat Transmission*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York.
- [92] S. Patankar, *Numerical heat transfer and fluid flow*: Hemisphere, Washington, D,C, 1980.
- [93] S. V. Patankar and D. B. Spalding, "A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 15, pp. 1787-1806, 1972.
- [94] J. Van Doormaal and G. Raithby, "Enhancements of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flows," *Numerical heat transfer*, vol. 7, pp. 147-163, 1984.
- [95] R. I. Issa, "Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting," *Journal of computational physics*, vol. 62, pp. 40-65, 1986.
- [96] Zondag HA, de Vries DW, van Helden WGJ, van Zolingen RJC, van Steenhoven AA. The thermal and electrical yield of a PV-thermal collector. *Sol Energy* 2002; 72(2):113–28.