

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 : RETERI Ahmed

Sujet

Modélisation thermique du refroidissement des capteurs hybrides photovoltaïques-thermiques à l'aide des matériaux à changement de phase

Soutenue publiquement, le 24 / 06 / 2018 , devant le jury composé de :

M. SELADJI Chakib	Professeur	UAB Tlemcen	Président
M. A. N. KORTI	Professeur	UAB Tlemcen	Directeur de thèse
M. SAIM Rachid	Professeur	UAB Tlemcen	Examineur 1
M. DRAOUI Belkacem	Professeur	Université Béchar	Examineur 2

Louange à Allah

A ma mère et mon Père

A mes sœurs

A toute ma famille,

A mes amis

Pour m'avoir permis de réaliser mes rêves

Remercîments

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 capteurs hybrides PVT ont connu une importance considérable grâce à leurs doubles utilisations énergétiques thermique et électrique. Si l'objectif principal du capteur PVT est la production de l'électricité, l'analyse thermique se limite à l'amélioration de la chaleur évacuée par les cellules pour augmenter le rendement électrique.

L'objectif de cette thèse consiste à améliorer les performances électriques des cellules PV en améliorant la chaleur récupérée des panneaux PVT. Pour cela, six configurations (06) de panneau PV ont été analysées et comparées : module PV classique (sans refroidissement), module PV avec MCP (PV-MCP), module PV-MCP avec ailettes, module PV avec convection forcée (PVT), panneau PVT avec ailettes et panneau PV-MCP alternés avec des passages d'air forcée séparés par ailettes (PVT-MCP).

L'étude analyse les effets de la présence du MPC, de l'intégration des ailettes, de la vitesse de l'air à l'entrée et la profondeur de canal sur la température de la cellule, l'efficacité électrique de la cellule, le nombre de Nusselt moyen et la température de l'air à la sortie. Les résultats obtenus montrent l'amélioration du refroidissement les différentes techniques utilisées.

Mots Clés : capteur hybride PVT, CFD, matériaux à changement de phase, ailettes, convection forcé, efficacité électrique.

Abstract

Hybrid photovoltaic thermal (PVT) collectors have assumed considerable importance for their dual-energy applicability which is presented in thermal and electrical form. In the case where the main objective of the PVT collector is to produce electricity, the thermal behavior of the hybrid collector plays an ameliorative role in dissipating the heat generated in the cell, and this increases the electrical efficiency accordingly.

The objective of this thesis is to study the effect of temperature on the electrical performance of the PV cell in the presence of MCP and forced air cooling. Six configurations (06) of PV panel were analyzed and compared: conventional photovoltaic module (without cooling), PV module with PCM (PV-PCM), PV-PCM module with fins, PV module with forced convection (PVT), PVT panel with fins and PV panel with MCP alternating with forced air passages separated by vanes (PVT-PCM).

Several parameters, such as the temperature of the cell, electrical efficiency, average Nusselt number and air temperature at the outlet of the channel, were studied, depending on: number of fins, air velocity and the channel depth. The results obtained confirm the ameliorative effect of forced convection cooling, with and without fins, as well as the important improvement in cooling due to the presence of the PCM.

Keywords: PVT collectors, CFD, phase change material, fin, forced convection, electrical efficiency.

اكتسبت الألواح الشمسية الهجينة أهمية كبيرة نظرا لإنتاجها المزدوج للطاقة الحرارية والكهربائية في آن واحد. في حالة ان الهدف الرئيسي من هذه الألواح هو إنتاج الكهرباء، الا ان استغلال الحرارة المتولدة في الخلية الكهروضوئية له دور كبير في تحسين الكفاءة الكهربائية.

الهدف من هذه الرسالة هو دراسة تأثير درجة الحرارة على الأداء الكهربائي للخلايا الكهروضوئية باستعمال المواد المتغيرة الحالة والتيار الهوائي المفتعل. تم تحليل ستة تشكيلات (06) من الألواح الكهروضوئية ومقارنتها: الوحدة الكهروضوئية التقليدية (بدون تبريد)، وحدة الكهروضوئية مع المواد المتغيرة الحالة، وحدة مع المواد المتغيرة الحالة مع زعانف الالمنيوم، وحدة الكهروضوئية مع التيار الهوائي المفتعل، وحدة الكهروضوئية مع التيار الهوائي وزعانف الالمنيوم، وحدة الكهروضوئية مع التيار الهوائي والمواد المتغيرة الحالة مفصولة بزعانف الالمنيوم.

تم دراسة العديد من المعاملات: درجة حرارة الخلية، الكفاءة الكهربائية، متوسط عدد NUSSELT ودرجة حرارة الهواء عند المخرج، اعتمادا على: عدد الزعانف، سرعة الهواء عند المدخل وعمق القناة. النتائج التي تم الحصول عليها تظهر التأثير المحسن للتبريد الهوائي المفتعل مع وبدون زعانف وكذلك التأثير الهام للمواد المتغيرة الحالة على التبريد.

الكلمات المفتاحية : اللوحات الكهروضوئية الحرارية، المواد المتغيرة الحالة، زعانف الالمنيوم، التيار الهوائي المفتعل، الكفاءة الكهربائية.

Liste des abréviations

<i>Unités physiques</i>		
J	Joule	
k	Kilo	
K	Kelvin	
m	Mètres	
mm	Millimètre	
m²	mètres carrés	
m³	mètres cubes	
Pa	Pascal	
s	Second	
W	Watt	
<i>Acronymes</i>		
Exp	Expérimentale	
MCP	Matériaux à Changement de Phase	
MVF	Méthode des Volumes Finis	
PV	Capteur solaire photovoltaïque	
PVT	Capteur solaire hybride photovoltaïque/thermique	
Sim	Simulation	
UDF	User Defin Function	
<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>Indices</i>		
<i>Al</i>	Aluminium	
<i>eff</i>	Effective	

Liste d'abréviations

<i>l</i>	Liquide	
<i>oc</i>	Circuit-ouvert	
<i>p</i>	Matériaux à changement de phase	
<i>Ref</i>	Référence	
<i>s</i>	Solide	
<i>sc</i>	Court-circuit	
<i>v</i>	Vitrage	
<i>Symboles</i>		
A	Surface	[m ²]
C	Constante de la zone poreuse	[kg/m ³ .s]
C_p	Chaleur spécifique de fluide caloporteur,	[J/kg.K]
D_h	Diamètre hydraulique	[m]
e	Epaisseur	[m]
f_l	Fraction liquide	
FF	Facteur de remplissage de la cellule photovoltaïque	
g	L'accélération gravitationnelle	[m/s ²]
G	Rayonnement solaire	[W/m ²]
H	Enthalpie spécifique	[J/kg]
I	L'intensité du courant électrique	[A]
L	La chaleur latente	[J/kg]
P_m	La puissance électrique maximale	[W]
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,	[K]
T_e	Température de l'air à l'entrée du canal	[K]
T_s	Température de l'air à la sortie du canal,	[K]
T_c	Température de la cellule solaire	[K]
U	La tension du courant électrique	[V]
u	Vecteur vitesse composant dans x-direction,	[m/s]
v	Vecteur vitesse composant dans y-direction,	[m/s]
w	Vecteur vitesse composant dans z-direction,	[m/s]
2D	Deux Dimensions	
3D	Trois Dimensions	

Sommaire

Résumé

Abstract

المخلص

Sommaire

Introduction.....01

Chapitre 01 : Techniques de refroidissement des capteurs PV

1.1. Capteurs solaires photovoltaïque	05
1.1.1. Cellule PV.....	05
1.1.2. Différents types des cellules PV	06
1.1.2.1. Cellules en silicium	06
A. Cellules monocristallines	06
B. Cellules poly-cristallines.....	07
C. Cellules amorphes.....	07
1.1.2.2 Cellules en couche mince	08
1.1.2.3 Cellules à concentration	09
1.1.2.4 Cellules organiques	09
1.1.3. Effet photovoltaïque	10
1.1.4. Efficacité de conversion d'énergie	11
1.1.5. Facteurs influant l'efficacité de la conversion	11
1.1.6. Influence de la température sur les performances du module PV	13
1.2. Capteurs solaires hybrides photovoltaïque thermique PVT	14
1.2.1. Capteurs solaires hybrides PVT plan	14
1.2.1.1 Capteurs solaires hybrides PVT à eau	14
1.2.1.2 Capteurs solaires hybrides PVT à air	15
1.2.2. Capteurs solaires hybrides PVT à concentration	16
1.2.3. Application des capteurs solaires hybride PVT	17
1.3. Les matériaux à changement de phase MCP	17
1.3.1. Stockage par chaleur latente	18
1.3.2. Classification des MCP	19
A. MCP organique	19
B. MCP inorganique	20
C. MCP eutectique	20
1.3.3. Les propriétés désirables des MCP	21

Sommaire

1.3.4. Applications des MCP dans les capteurs solaires thermiques	21
1.3.5. Refroidissement des capteurs solaires photovoltaïque	22

Chapitre 02 : Etude bibliographique

2.1. Les capteurs solaires photovoltaïques	24
2.2. Capteurs solaires hybrides photovoltaïque thermique PVT	25
2.2.1. Capteurs solaires hybrides PVT plan	26
2.2.1.1 Capteurs solaires hybrides PVT à eau	26
2.2.1.2 Capteurs solaires hybrides PVT à air	30
2.2.1.3 Capteurs solaires hybrides PVT bi-fluide	35
2.2.2. Capteurs solaires hybrides PVT à concentration CPVT	38
2.3. Les capteurs solaires photovoltaïque PV avec MCP (PV-MCP)	41
2.4. Les capteurs solaires hybrides PVT avec MCP (PVT-MCP)	44

Chapitre 03 : Modélisation mathématique des phénomènes de changement de phase

3.1. Modélisation mathématique des phénomènes de changement de phase	47
3.1.1. Schémas avec maillage mobile	47
3.1.2. Schémas avec maillage fixe	48
A. Méthode enthalpique	48
B. Méthode de la capacité effective	50
C. Méthode de la transformation de température	51
D. Méthode de source de chaleur	51
3.2. ANSYS fluent	52
3.2.1. Méthode des volumes finis (MVF)	52
3.2.1.1. Subdivision du domaine d'étude (maillage)	52
3.2.1.2. L'équation de transport	53
3.2.2. Couplage pression-vitesse	56
3.2.3. Sous relaxation et convergence des calculs	56

Chapitre 04 : Simulation numérique du refroidissement des modules PV avec MCP et ailettes

4.1. Positionnement du problème	58
4.1.1. Modèle physique	58
4.1.2. Modèle mathématique	60
4.1.3. Condition initiales et aux limites	61
4.1.4. Procédure numérique	63
4.1.5. Test de maillage	63
4.1.6. Validation du phénomène de changement de phase	65
4.2. Résultats et discussions	67
4.2.1. L'influence du MCP	67
4.2.2. Effet des ailettes	69

Chapitre 05 : Etude numérique de l'amélioration des performances du capteur PVT avec MCP et ailettes

5.1. Positionnement du problème	75
5.1.1. Modèle physique	75
5.1.2. Modèle mathématique	76
5.1.3. Condition initiales et aux limites	77
5.2. Résultats et discussions	79
5.2.1. Validation du modèle	79
5.2.2. Test du maillage	80
5.2.3. L'influence des ailettes	82
5.2.4. L'utilisation des MCP	85
Conclusion générale.....	94
Références bibliographiques.....	97

Sommaire

LISTES DES FIGURES

Chapitre 01 : Techniques de refroidissement des capteurs PV

Figure 1.1. Panneaux solaires photovoltaïques.	05
Figure 1.2. Schéma d'une cellule photovoltaïque.....	05
Figure 1.3. Cellule en silicium monocristalline.....	06
Figure 1.4. Cellule en silicium poly-cristalline.	07
Figure 1.5. La cellule en silicium amorphe.	08
Figure 1.6. Cellule en couches minces.	08
Figure 1.7. Capteur PV avec des cellules à concentration.	09
Figure 1.8. Capteur PV avec des cellules organiques.....	09
Figure 1.9. L'effet photovoltaïque et la jonction PN.	10
Figure 1.10. Caractéristiques courant-tension d'un module PV de 72 cellules à 25 et 60° C avec un rayonnement de 830 W/m ² [3].....	12
Figure 1.11. Evolution de la puissance maximale en fonction de la température de cellule [4]	12
Figure 1.12. Section du capteur solaire hybride à eau étudié [9].....	15
Figure 1.13. Coupe transversale de capteur hybride PVT à air avec modèle d'absorbeur de forme rectangulaire [10].	15
Figure 1.14. Les prototypes I, II, III et IV de capteur solaire PVT à air [11].....	16
Figure 1.15. Capteur solaire CPVT [12].....	16
Figure 1.16. Classification des matériaux de stockage d'énergie [13].....	18
Figure 1.17. Différents types des matériaux à changement de phase.	20
Figure 1.18. Schéma de capteur solaire double passe avec MCP: (a) Parallèle (b) séries [15].....	21
Figure 1.19. Schéma du transfert de chaleur dans un système PV / PCM [16]	22

Chapitre 02 : Etude bibliographique

Figure 2.1. Schéma de l'échangeur de chaleur à canal convergent avec des modes de transfert de chaleur [36].....	27
Figure 2.2. Capteur hybride à eau [37].....	27

Sommaire

Figure 2.3. Système PVT avec réflecteur [38].....	28
Figure 2.4. Photo du système PVT à eau [39].....	28
Figure 2.5. Photo du système de PVT [40].....	29
Figure 2.6. Système PVT et de la plate-forme d'essai extérieure [41].....	29
Figure 2.7. Capteur PVT avec ballon de stockage [42].....	30
Figure 2.8. PVT à air avec et sans vitrage, avec et sans tedlar [43].....	31
Figure 2.9. Photographie de l'installation expérimentale d'un collecteur d'air hybride PVT [44].....	32
Figure 2.10. Systèmes PVT avec circulation d'air [45].....	32
Figure 2.11. Les différentes configurations étudiées : (a) système conventionnel (b) système avec une feuille de métal (c) système avec ailettes [46].....	33
Figure 2.12. Section transversale du système PVT [47].....	33
Figure 2.13. Photo du bâtiment expérimental [48].....	34
Figure 2.14. Schéma de la conception de capteur PVT [49].....	35
Figure 2.15. Capteur solaire PVT à deux fluides et à fonctions superposées [50].....	35
Figure 2.16. Section du prototype bi-fluide initial et localisation interdépendants [51].....	36
Figure 2.17. Schéma du capteur PVT [52].....	37
Figure 2.18. La vue en coupe du capteur PVT avec deux canaux pour différents fluides [53].....	37
Figure 2.19. a) Vue en coupe b) Vue en perspective du capteur PVT bi-fluide [54].....	38
Figure 2.20. Capteur solaire CPVT [55].....	39
Figure 2.21. Prototype concentrateur CPVT type ANU [56].....	39
Figure 2.22. Concentrateur CPVT [57].....	40
Figure 2.23. Prototype CPVT lors des essais à l'Université de Padoue [58].....	41
Figure 2.24. Schéma de la configuration expérimentale [59].....	42
Figure 2.25. Schéma du PV-MCP [60].....	42
Figure 2.26. Le panneau PV-MCP testé [61].....	43
Figure 2.27. Bureau vitré intégré avec le module PV (a) avec MCP, (b) sans MCP [62].....	44
Figure 2.28. Schéma de principe du système PVT à base d'eau [63].....	44
Figure 2.29. Schéma de principe du système PVT/MCP à base d'eau [63].....	45
Figure 2.30. Système PVT/MCP [64].....	45

Sommaire

Chapitre 03 : Modélisation mathématique des phénomènes de changement de phase

Figure 3.1. Classification des approches de modélisation par changement de phase.....	47
Figure 3.2. Evolution de l'enthalpie avec la température: (a) approximation de changement de phase isotherme (b) par changement de phase non isotherme, adoptée à partir de [70].....	49
Figure 3.3. Propriétés physiques dépendant de la température.....	50
Figure 3.4. Maillage et volume de contrôle.....	53

Chapitre 04 : Simulation numérique du refroidissement des modules PV avec MCP et ailettes

Figure 4.1. Modèle physique étudié.....	59
Figure 4.2. Evolution du rayonnement solaire, la température ambiante et la température de ciel pendant la journée.....	63
Figure 4.3. Test de maillage basé sur l'évolution de la température de silicium pendant la journée pour 4 configuration, a) avec MCP seul, b) avec MCP et 7 ailettes, c) avec MCP et 11 ailettes, d) avec MCP et 14 ailettes.....	64
Figure 4.4. L'indépendance de pas du temps basé sur l'évolution de la température de la cellule solaire pendant la journée.....	65
Figure 4.5. Comparaison transitoire de la fraction liquide.....	66
Figure 4.6. La variation de la température de silicium et l'efficacité électrique pour le cas A et B pendant la journée.....	67
Figure 4.7. L'évolution des isothermes et la fraction liquide (au milieu suivant x et y) du MCP pendant la journée.....	68
Figure 4.8. Evolution de la température de silicium et l'efficacité électrique pour le cas B sans et avec différents nombres d'ailettes pendant la journée.....	69
Figure 4.9. L'évolution instationnaire des isothermes du MCP pour différents nombres d'ailettes	71
Figure 4.10. L'évolution instationnaire de la fraction liquide dans le MCP pour différents nombres d'ailettes.....	72
Figure 4.11. Moyenne quotidienne de l'efficacité électrique pour les trois cas différents A, B, C.....	73

Chapitre 05 : Etude numérique de l'amélioration des performances du capteur PVT avec MCP et ailettes

Figure 5.1. Les différentes configurations étudiées	75
Figure 5.2. Evolution du rayonnement solaire, la température ambiante et la température de ciel pendant la journée.....	79
Figure 5.3. Variation de la température de silicium et la température de l'air à la sortie pendant la journée.....	80
Figure 5.4. L'indépendance de pas du temps basé sur l'évolution de la température de silicium en fonction du temps.....	81
Figure 5.5. Variation de la température de silicium et l'efficacité électrique pendant la journée.....	82
Figure 5.6. Variation de la température de l'air à la sortie pendant la journée.....	83
Figure 5.7. Variation de température de silicium, l'efficacité électrique pour trois différentes vitesses pendant la journée	84
Figure 5.8. Variation du Nusselt moyen d'air circule au canal pour trois différentes vitesses pendant la journée.....	84
Figure 5.9. Variation de la température de l'air à la sortie pour trois différentes vitesses pendant la journée.....	85
Figure 5.10. Variation de la température de silicium et l'efficacité électrique pendant la journée pour le cas C et D.0000.....	86
Figure 5.11. Variation de la température de l'air à la sortie du canal pour les deux cas C et D pendant la journée	87
Figure 5.12. Evolution de la fraction liquide et les isothermes à 11 :40 a.m et 14 :20 p.m pour le cas D.....	88
Figure 5.13. Variation de température de silicium, l'efficacité électrique pour trois différentes vitesses pendant la journée.....	88
Figure 5.14. Variation du Nusselt moyen d'air circule au canal pour trois différentes vitesses pendant la journée.....	89
Figure 5.15. Variation de la température de l'air à la sortie pour trois différentes vitesses pendant la journée.....	90
Figure 5.16. Variation de la température de silicium et l'efficacité électrique pendant la journée pour trois différents d'épaisseurs le cas (D).....	91

Sommaire

Figure 5.17. Moyenne quotidienne de l'efficacité électrique pour quatre cas différents A, B, C et D..... 92

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1. Efficacités des cellules photovoltaïques..... 10
Tableau 1.2. Rapport efficacité / température du module PV..... 13
Tableau 1.3. L'influence de température de la cellule sur l'efficacité électrique pour différents types de cellules..... 14
Tableau 4.1. Propriétés thermo-physiques des matériaux utilisés..... 59
Tableau 4.2. Maillages adoptés..... 65
Tableau 4.3. Propriétés thermo-physiques du MCP utilisées pour la validation..... 66
Tableau 5.2. Optimisation du maillage..... 81

Introduction Générale

Introduction Générale

Les préoccupations environnementales croissantes et l'épuisement des combustibles fossiles poussent le monde à accorder plus d'attention à l'utilisation des énergies renouvelables. Ces dernières connaissent depuis une décennie une irrésistible ascension et commencent à dépasser les énergies fossiles en nouvelles capacités annuelles de production installée. En effet, la progression respective des différentes formes d'énergies propres a permis de produire en 2016 environ 960 TWH par le vent et 375 TWH par voie solaire (4 % et 1,2 % de la production mondiale d'électricité) **[L'irrésistible ascension de l'énergie solaire]**

Les systèmes d'énergie solaire sont installés et utilisés grâce à des encouragements et des subventions en faveur des énergies propres et renouvelables. L'énergie solaire peut être convertie en énergies thermique ou électrique. Les systèmes thermiques à petite échelle sont souvent destinés au chauffage des bâtiments. Cependant, les systèmes solaires qui convertissent l'énergie thermique produite en électricité, sont généralement des systèmes à grande échelle. L'énergie solaire peut également être convertie directement en électricité à l'aide de modules photovoltaïques. Des applications à petite et à grande échelle de la technologie photovoltaïque peuvent être observées aujourd'hui.

Le panneau photovoltaïque (PV) convertit seulement environ 16 % de l'énergie solaire incidente en électricité, le reste est transformé en chaleur. Cependant, l'augmentation de la température des cellules photovoltaïques par 1 °C diminue leur efficacité d'autour 0,5 %. Généralement, l'efficacité nominale de la cellule est atteinte avec une température de fonctionnement de 25 °C. Également, les cellules peuvent subir une dégradation à long terme si la température dépasse une certaine limite.

Pour contrôler la température des cellules, plusieurs mesures ont été envisagées afin de réduire la chaleur accumulée dans les modules PV et de mieux utiliser la chaleur évacuée. Cette approche, connue sous le nom de technologie Photovoltaïque-Thermique (PVT), s'est avérée efficace pour augmenter le taux de conversion solaire du système et en offrant simultanément de l'énergie thermique et de l'électricité à partir d'un seul capteur solaire.

Les fluides couramment utilisés pour refroidir les cellules PV dans un module PVT sont l'air et l'eau. Ces systèmes de refroidissement sont chers et présentent un faible transfert de chaleur avec des coûts de maintenance assez élevés. De ce fait, une nouvelle méthode pour réguler la température des cellules PV a été développée et utilisée dans cette dernière décennie. Cette méthode repose sur l'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP),

Introduction Générale

qui absorbent l'énergie thermique sous forme de chaleur latente pour diminuer la température de la cellule.

L'objectif de la thèse est d'analyser l'effet de l'utilisation des MCP sur le comportement thermique et électrique du capteur solaire photovoltaïque. Afin d'améliorer le transfert de chaleur entre les cellules PV et le MCP, des ailettes ont été additionnées. Le code ANSYS-FLUENT est utilisé pour simuler cette analyse avec une représentation 3D du modèle PVT.

Le travail de cette thèse a été enchaîné selon le plan suivant :

- Une introduction générale présentant le but de la thèse et l'intérêt du refroidissement des cellules photovoltaïques.
- Le premier chapitre présente des généralités sur les capteurs solaires photovoltaïques, leurs inconvénients et l'impact des techniques de refroidissement sur leurs performances.
- Le deuxième chapitre présente une recherche bibliographique approfondie sur l'état de l'art des technologies de refroidissement des panneaux photovoltaïques.
- Le troisième chapitre fourni expose les différents modèles mathématiques utilisés pour décrire le phénomène de changement de phase solide-liquide.
- Le quatrième chapitre présente le problème physique étudié avec une formulation mathématique détaillée du modèle PV-MCP munie d'ailettes. Les résultats de la simulation numérique analysent l'effet du MCP sur le comportement thermique et électrique du module PV.
- Le cinquième chapitre est consacré à l'étude du modèle PVT-MCP à air avec description mathématique complète suivi d'une étude paramétrique détaillée.
- On termine notre thèse par une conclusion générale et perspective.

Chapitre 1
Techniques de refroidissement des
capteurs PV

Chapitre 01 : Techniques de refroidissement des capteurs PV

Le soleil est une source abondante et écologique d'énergie renouvelable. Aujourd'hui, nous captons l'énergie solaire pour produire la chaleur et de l'électricité au moyen de deux différentes méthodes et technologies : l'énergie thermique et l'énergie photovoltaïque. Dans ce chapitre nous avons présenté des généralités sur les capteurs solaires photovoltaïques, leurs inconvénients et les différentes techniques de refroidissement.

1.1. Capteurs solaire photovoltaïque

Un module photovoltaïque est basé sur la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire absorbé en électricité. Cette conversion s'effectue par une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un processus appelé effet photovoltaïque.

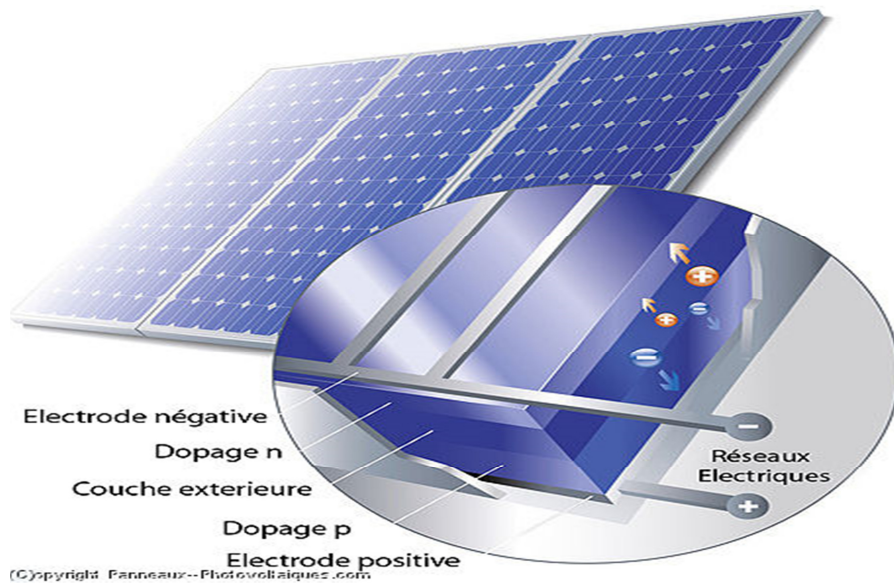


Fig. 1.1. Panneaux solaires photovoltaïques.

1.1.1. Cellule PV

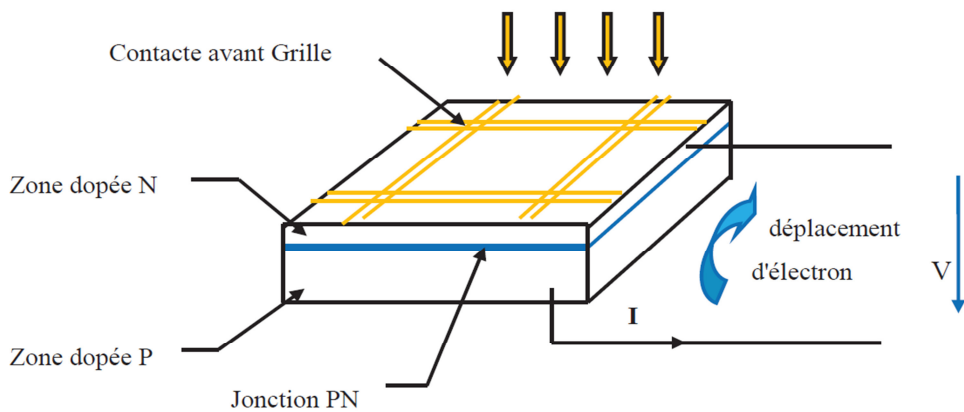


Fig. 1.2. Schéma d'une cellule photovoltaïque.

Chapitre 01 : Techniques de refroidissement des capteurs PV

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectronique qui transforment directement la lumière solaire en énergie électrique par un phénomène appelé « effet photovoltaïque » découvert par E. Becquerel en 1839 [1]. Les plaques solaires sont fabriquées à partir d'un matériau semi-conducteur, généralement du cristal de silicium. Lorsque le rayonnement solaire atteint le capteur solaire photovoltaïque, la lumière est absorbée par les cristaux de silicium. Cette absorption décolle les électrons de leurs atomes, faisant circuler les électrons à travers les cristaux de silicium et produit de l'électricité.

1.1.2. Différents types des cellules PV

Il existe plusieurs familles de cellules photovoltaïques. Actuellement, les plus utilisées sur le marché sont les cellules en silicium cristallin et les cellules en couches minces. D'autres sont encore en phase de recherche et développement.

1.1.2.1. Cellules en silicium

Le silicium est obtenu à partir d'un ou plusieurs cristaux : on parle alors de cellules monocristallines ou poly-cristallines. Un autre type de cellule en silicium sont les cellules amorphes.

A. Cellules monocristallines

Les cellules monocristallines sont fabriquées à partir d'un seul cristal cylindrique de silicium (**la figure 1.3**). Le principal avantage de ces cellules est leur rendement élevé, typiquement autour de 15 %. Cependant, le processus de leur fabrication est compliqué et entraînant des coûts plus élevés par rapport aux autres technologies.



Fig. 1.3. Cellule en silicium monocristalline.

B. Cellules poly-cristallines

Dans le processus de fabrication des cellules poly-cristallines, le silicium fondu est coulé en lingots de silicium poly-cristallin. Ces lingots sont ensuite sciés en tranches très fines et assemblés en cellules complètes (**figure 1.4**). Ce processus aboutit à des cellules qui sont nettement moins chères que les cellules monocristalline, par contre, l'efficacité est plus faible par 12 % en raison de la résistance interne aux limites des cristaux de silicium.

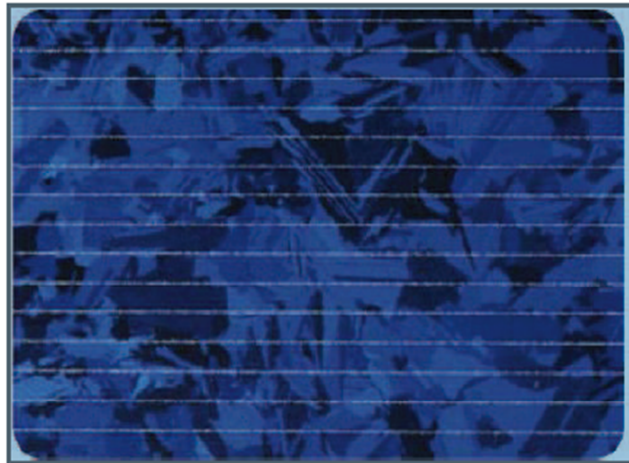


Fig. 1.4. Cellule en silicium poly-cristalline.

C. Cellules amorphes

Les cellules de silicium amorphe incluent des atomes de silicium dans une couche mince homogène plutôt qu'une structure cristalline. Le silicium amorphe absorbe la lumière solaire plus efficacement que le silicium cristallin, les cellules peuvent donc être plus minces. Pour cette raison, le silicium amorphe est connu sous le nom de technologie PV « les cellules à couche mince » (**figure 1.5**). Puisque les cellules de silicium amorphe n'ont aucune structure cristalline, l'efficacité de ces cellules n'est actuellement que d'environ 6 % en raison de pertes d'énergie internes importantes.



Fig. 1.5. La cellule en silicium amorphe.

1.1.2.2. Cellules en couche mince

Les cellules en couches minces sont fabriquées en déposant une ou plusieurs couches semi-conductrices et photosensibles sur un support (acier, verre, plastique ...etc.). Cette technologie permet de diminuer le coût de fabrication, mais son rendement est inférieur à celui des cellules en silicium cristallin (il est entre 5 et 13 %). Les cellules en couches minces les plus connues sont en silicium amorphe, composée de silicium projeté sur un matériel souple.

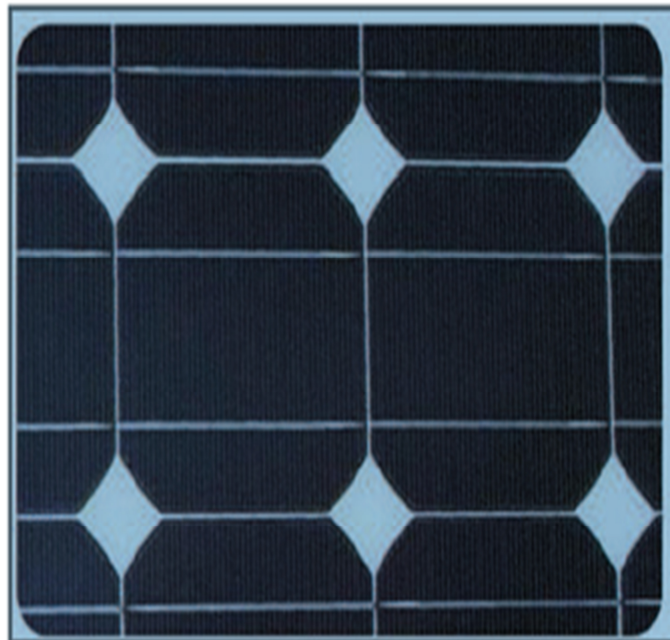


Fig. 1.6. Cellule en couches minces.

Chapitre 01 : Techniques de refroidissement des capteurs PV

1.1.2.3. Cellules à concentration

Elles sont placées au sein d'un foyer optique qui concentre la lumière. Leur rendement est élevé, qui atteint 20 à 30 %, mais nécessite un support mobile afin de traquer la position du soleil.



Fig. 1.7. Capteur PV avec des cellules à concentration.

1.1.2.4. Cellules organiques

Composées de semi-conducteurs organiques déposés sur un substrat en verre ou en plastique, Ces cellules offrent un rendement moyennement de l'ordre de 5 à 10 %. Bien qu'ils soient encore au stade expérimental, ces cellules présentent des perspectives intéressantes en termes de réduction de coûts.

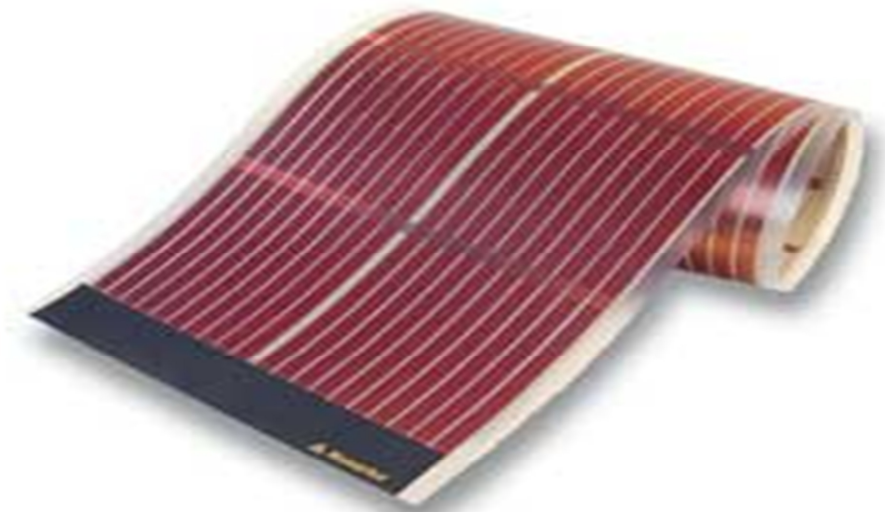


Fig. 1.8. Capteur PV avec des cellules organiques.

Chapitre 01 : Techniques de refroidissement des capteurs PV

Le tableau 1.1 montre l'efficacité électrique pour différentes cellules photovoltaïques [2].

Tableau 1.1. Efficacités des cellules photovoltaïques [2]

Type de cellule	Efficacités électriques
Poly-cristalline	11 – 15 %
Monocristalline	10 – 17 %
HIT	16 – 17 %
Ribbon et EFG	12 – 13 %
a-Si (simple jonction)	4 – 6 %
a-Si (triple jonction)	5 – 7 %
CIS	9 – 11 %
Cdte	6 – 9 %

1.1.3. Effet photovoltaïque

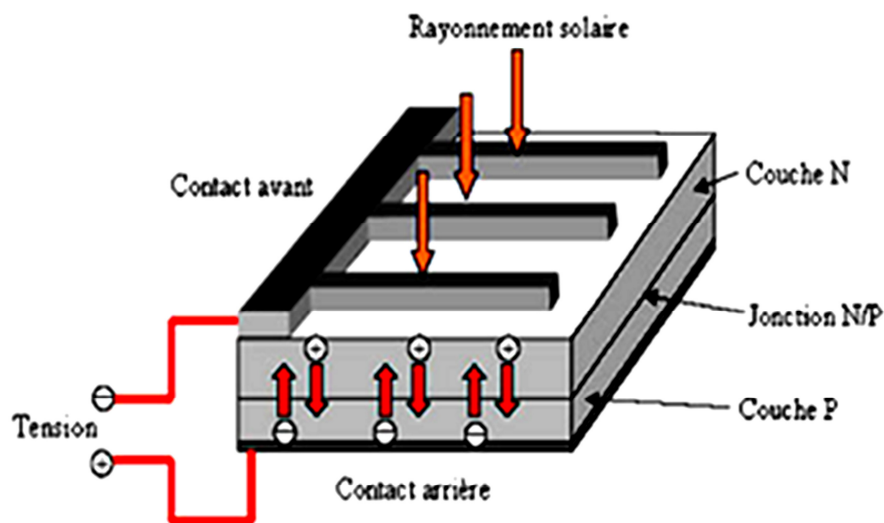


Fig. 1.9. L'effet photovoltaïque et la jonction PN.

Le fonctionnement de la cellule PV est basé sur un phénomène physique appelé l'effet photovoltaïque (Fig.1.9). Une cellule PV est réalisée à partir d'un matériau semi-conducteur (exemple le silicium) dont la réalisation est comparable à une diode classique. La cellule est composée de deux différentes couches : une couche supérieure dopée N et une couche inférieure dopée P. La jonction PN développée crée une barrière de potentiel. Lorsque les

Chapitre 01 : Techniques de refroidissement des capteurs PV

grains de lumière (les photons) heurtent la surface de ce matériau, ils transfèrent leur énergie aux atomes de la matière. Ce gain d'énergie libère les électrons de ces atomes.

Ceci engendre donc une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel crée un champ E qui draine les porteurs libres vers les contacts métalliques des régions P et N. Il en résulte alors un courant électrique et une différence de potentiel dans la cellule PV. Le courant et la tension fournis par une cellule PV dépendent de différents paramètres.

1.1.4. Efficacité de conversion d'énergie

L'efficacité de la conversion de l'énergie d'une cellule solaire est le pourcentage de la conversion du rayonnement solaire absorbée en énergie électrique, lorsqu'une cellule solaire est connectée à un circuit électrique. Ce terme est calculé en divisant la puissance électrique maximale P_m [W] par l'irradiation solaire G [W/m^2] et la surface de la cellule solaire A_c [m^2].

$$\eta = \frac{P_m}{G.A_c} \quad (1.1)$$

La qualité d'une cellule peut être décrite par le facteur de remplissage (FF), qui est le rapport entre la puissance maximale de la cellule et le produit du courant de court-circuit et de la tension du circuit-ouvert.

$$FF = I_{mp}U_{mp}/I_{sc} U_{oc} \quad (1.2)$$

Plus la valeur du facteur de remplissage s'approche de l'unité, plus le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est meilleur. Le facteur de remplissage est abaissé par la résistance ohmique de la cellule.

1.1.5. Facteurs influant l'efficacité de la conversion

Une grande partie de l'énergie du rayonnement solaire qui atteint une cellule PV est perdue avant d'être convertie en électricité. Les facteurs qui affectent sur les performances des cellules PV sont la longueur d'onde de la lumière, la résistance électrique, la réflexion, les ombres et la température de la cellule PV.

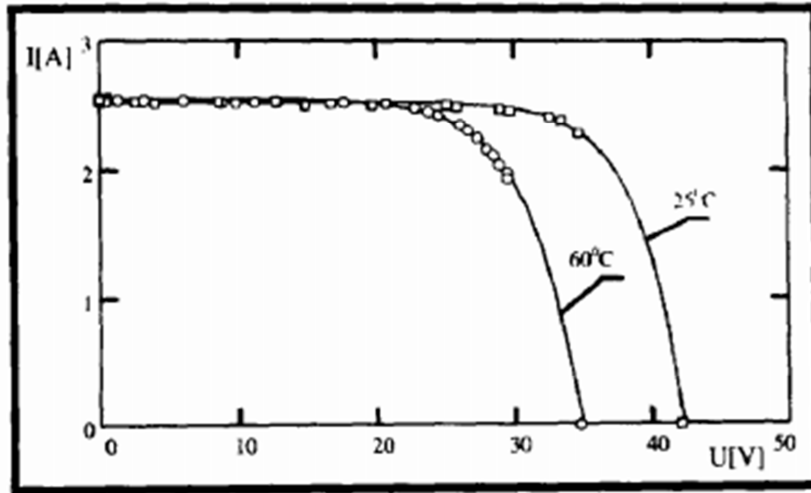


Fig. 1.10. Caractéristiques courant-tension d'un module PV de 72 cellules à 25 et 60° C avec un rayonnement de 830 W/m² [3].

L'influence de la température sur la caractéristique courant-tension d'un module PV est illustrée par la **Figure 1.10**. Il s'agit d'un module composé de 72 cellules solaires en silicium monocristallin à 25 et 60 ° C sous le rayonnement solaire de 830 W/m² [3]. La figure montre clairement la nécessité de refroidir les modules des cellules solaires en silicium PV afin d'éliminer l'effet négatif de la température élevée sur la puissance du module PV, **Figure 1.11** [4].

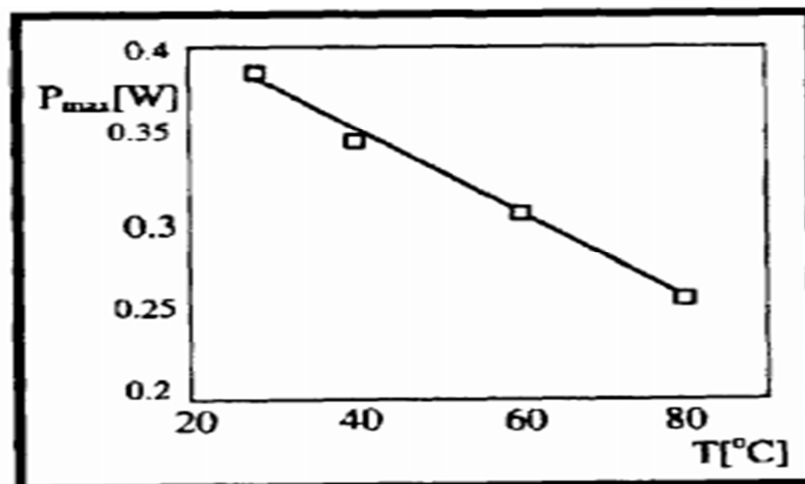


Fig. 1.11. Evolution de la puissance maximale en fonction de la température de cellule [4].

Chapitre 01 : Techniques de refroidissement des capteurs PV

1.1.6. Influence de la température sur les performances du module PV

La manière la plus courante de déterminer la température de la cellule T_c consiste à utiliser la température de cellule opérationnelle non-nominale (NOCT) [5]. La valeur de ce paramètre est donnée par le fabricant du module PV. La température de la cellule T_c dépend en outre de la température ambiante T_{amb} et du rayonnement solaire.

$$T_c = T_{amb} + (NOCT - 20^\circ C) \frac{G}{800} \quad (1.3)$$

Cette méthode simple donne des résultats satisfaisants pour des modules PV non intégrés au toit. Une définition complète de NOCT est présentée par Myers [6]. Del Cueto [7] a étudié les performances de plusieurs modules photovoltaïques utilisant différentes technologies, à savoir, en silicium cristallin (c-Si), silicium poly-cristallin (pc-Si), tellure de cadmium (CdTe) et cuivre indium di sélénium (CIS). Il a noté que pour tous les modules (c-Si, poly c-Si et CIS), l'efficacité varie entre 10 et 15% pour une variation de température de 30 °C, tableau 1.2.

Tableau 1.2. Rapport efficacité / température du module PV (Del Cueto [7])

type de module	c-Si A	c-Si B	c-Si C	pc-Si X	pc-Si Z	CIS	CdTe
$\eta_c \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	- 0.496	-0.388	-0.427	-0.401	-0.431	-0.484	-0.035

L'effet de la température doit être pris en compte dans tout modèle d'efficacité du module photovoltaïque. Le modèle le plus connu est donné par l'équation suivante

$$\eta = \eta_{ref} [1 - \beta(T_c - T_r) + \gamma \text{Log } G] \quad (1.4)$$

η_r est l'efficacité du module de référence à une température de cellule PV, $T_r = 25^\circ\text{C}$ et le rayonnement solaire $G = 1000 \text{ W/m}^2$. γ et β sont respectivement les coefficients de rayonnement solaire et de la température du module PV. Généralement, les paramètres (T_r , η_r) sont donnés par le constructeur photovoltaïque, mais γ et β dépendent du matériau utilisé pour le module PV.

Une autre formulation a été utilisée par Bergene et al [8], qui montre que l'efficacité dépend linéairement de la température de la cellule:

$$\eta_c = 0.125(1 - 0.004(T_{cellule} - 293)) \quad (1.5)$$

Le tableau 1.3 montre l'influence de température de la cellule sur l'efficacité électrique pour différents types de modules donnés par les fabricants.

Tableau 1.3. L'influence de température de la cellule sur l'efficacité électrique pour différents types de cellules (Zondag, [2])

fabricants	type de cellule	$\eta_c \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
(référence)	Cristalline Si	-0.4%/K to -0.5%/K
mitsubishi Heavy	a-Si	-0.2%/K
RWE Schott Solar	a-Si	-0.2%/K
Uni-Solar	a-Si	-0.21%/K
Kaneka	a-Si / pc-Si hybride	-0.23%/K
Würtk	CIS	-0.36%/K
First Solar	CdTe	-0.25%/K

1.2. Capteur solaire hybride photovoltaïque thermique PVT

Un capteur photovoltaïque thermique (PVT) est un capteur solaire hybride permettant de convertir une partie de l'énergie solaire captée en électricité et de valoriser l'autre, habituellement perdue, en chaleur. Le concept consiste à superposer les deux fonctions énergétiques électrique et thermique. Dans ce type de composant hybride, les cellules PV fonctionnent comme absorbeur thermique et sont refroidies grâce à la circulation d'un fluide caloporteur en face arrière. Plusieurs configurations de capteur existent et varient principalement selon la nature du fluide utilisé.

1.2.1. Capteurs solaires hybrides PVT plans

Les capteurs solaires photovoltaïques thermiques (PVT) plans sont souvent utilisés pour leur simplicité dans la conception. Ils sont classés selon le fluide caloporteur utilisé.

1.2.1.1. Capteurs solaires hybrides PVT à eau

Dans ces capteurs, le fluide caloporteur (l'eau) circule à l'intérieur des tuyaux en contact avec l'absorbeur et recueille la chaleur de l'absorbeur. Si les cellules PV sont montées sur l'absorbeur (**figure 1.12**), la chaleur est extraite des cellules en entraînant l'augmentation du rendement électrique. L'énergie thermique utile est extraite à la sortie des tuyaux. Le fluide caloporteur peut circuler soit par une pompe (un système pompé), soit par la différence de densité du fluide caloporteur (un système gravitationnelle).

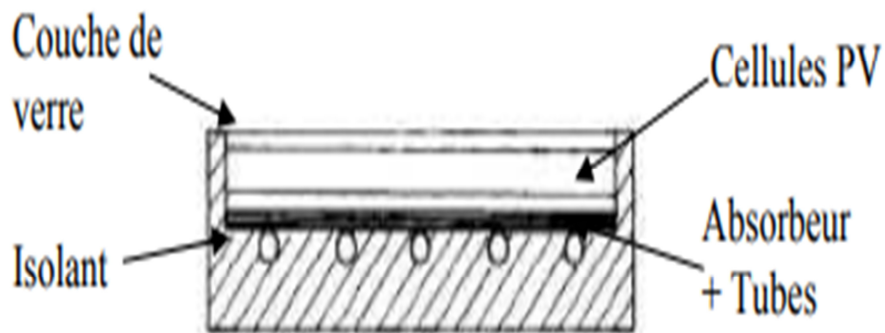


Fig. 1.12. Section du capteur solaire hybride à eau étudié [9].

1.2.1.2. Les capteurs solaires hybrides PVT à air

Ces capteurs utilisent l'air comme fluide caloporteur (**figure 1.13**) qui circule par ventilation naturelle ou par ventilation forcée. Ces capteurs peuvent être distingués en fonction du principe d'écoulement d'air : sur l'absorbeur, sous l'absorbeur ou des deux côtés de l'absorbeur (simple ou double passes) **figure 1.14**.

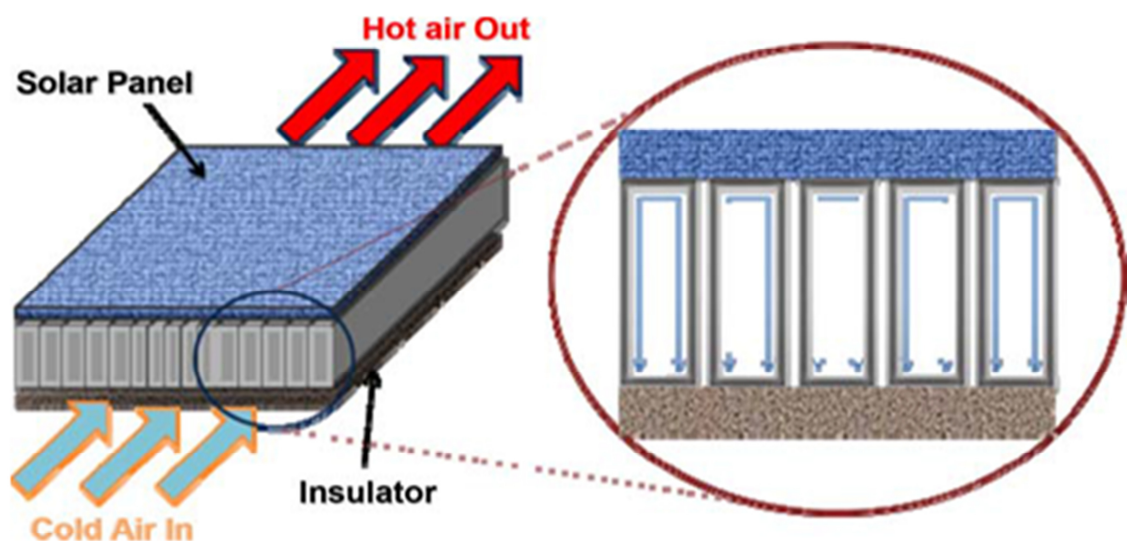


Fig. 1.13. Coupe transversale de capteur hybride PVT à air avec modèle d'absorbeur de forme rectangulaire [10].

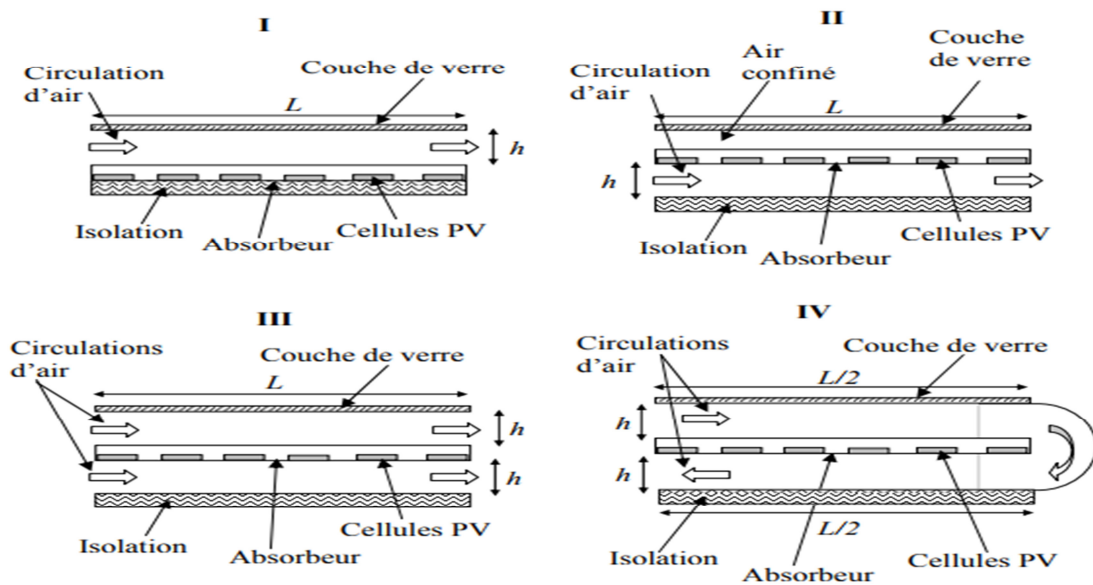


Fig. 1.14. Les prototypes I, II, III et IV de capteur solaire PVT à air [11].

1.2.2. Capteurs solaires hybrides PVT à concentration

La plage de température des capteurs PVT plans est parfois non suffisante pour les applications thermiques à haute température. Les PVT à concentration (CPVT) avec des cellules solaires à haut rendement et des réflecteurs concentrés (**figure 1.15**) peuvent produire un courant plus élevé avec plus de puissance thermique en raison des températures élevées atteintes.

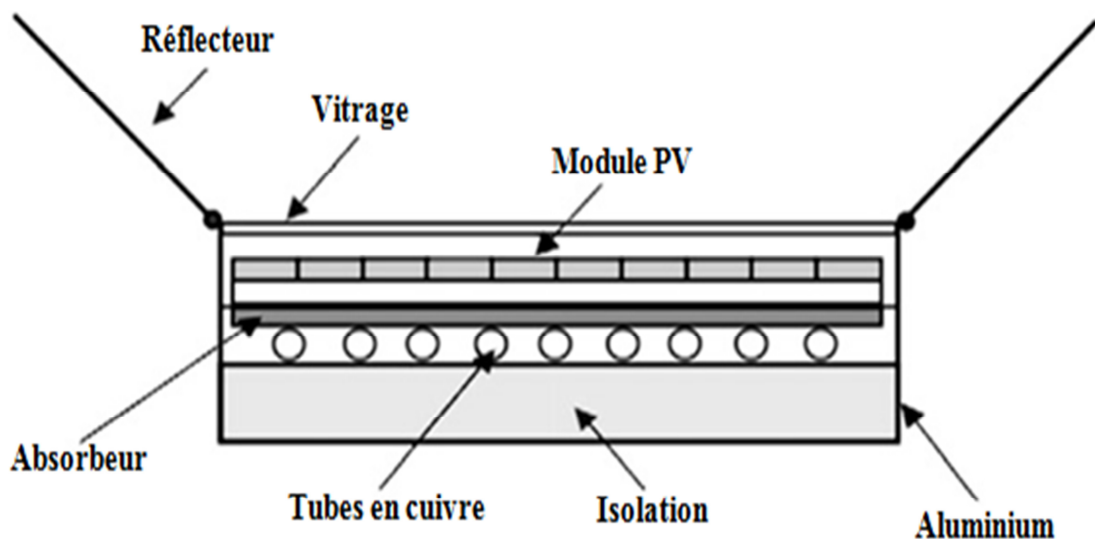


Fig. 1.15. Capteur solaire CPVT [12].

1.2.3. Application des capteurs solaires hybride PVT

L'application des PVT vitrés à eau pour le chauffage de l'eau domestique est une application prometteuse. De plus, la combinaison de PVT non vitré avec une pompe à chaleur est considérée aussi très intéressante, mais la consommation électrique importante de la pompe à chaleur devrait être prise en compte dans l'évaluation du système. Ce qui est particulièrement intéressant pour les applications où la surface disponible est petite.

Pour les applications des PVT à air, le préchauffage de l'air de ventilation semble une application très logique, en particulier pour les bâtiments ayant une grande demande de ventilation. Cependant, puisque cela n'est requis que pendant la saison de chauffage, il vaut la peine de chercher aussi l'application de la chaleur en été.

Pour les applications domestiques, ainsi que pour les applications utilitaires avec une grande demande en eau du robinet, la chaleur peut être utilisée pour le chauffage de l'eau à travers un échangeur de chaleur. Pour les bâtiments utilitaires, la chaleur peut être utilisée pour la climatisation solaire, ou l'effet de flottabilité peut être utilisé pour faciliter la ventilation.

1.3. Les matériaux à changement de phase (MCP)

Le stockage d'énergie (surtout de nature intermittente) joue un rôle important dans la conservation de l'énergie disponible et dans l'amélioration de son utilisation. Les stockages à court terme (quelques heures) et à long terme (quelques mois) sont essentiels dans la plupart des applications.

L'énergie solaire est disponible uniquement pendant la journée, et par conséquent, son application nécessite un stockage d'énergie efficace, de sorte que la chaleur produite pendant les heures d'ensoleillement soit stockée pour une utilisation ultérieure pendant la nuit. Des problèmes similaires se posent dans les systèmes de récupération de chaleur où la disponibilité de chaleur perdue et les périodes d'utilisation sont différents, nécessitant un certain stockage d'énergie. Par conséquent, l'application efficace de l'énergie solaire dépend dans une large mesure de la méthode de stockage utilisée.

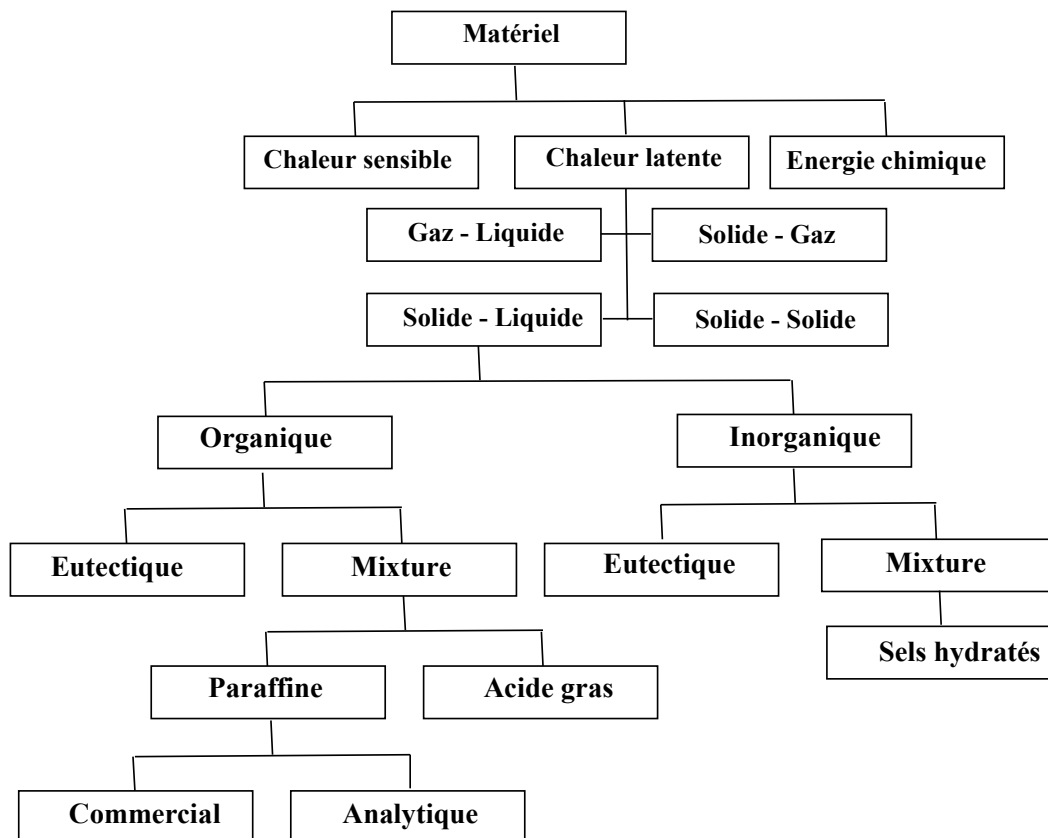


Fig. 1.16. Classification des matériaux de stockage d'énergie [13].

En 1983, Abhat [13] a donné une classification utile des substances utilisées pour le stockage de l'énergie thermique (TES), **figure 1.16**. La méthode de stockage d'énergie thermique la plus couramment utilisée est la méthode à chaleur sensible (à eau). En plus d'être abondante, bon marché et non toxique, l'eau a une capacité thermique élevée permettant de l'utilisée à la fois comme un stockeur d'énergie et comme un fluide caloporteur.

Cependant, la méthode de stockage par chaleur latente a attiré un grand nombre d'applications. Cette méthode fournit une densité de stockage d'énergie plus élevée avec une gamme de température plus petite. Néanmoins, des difficultés pratiques surviennent habituellement lors du stockage par chaleur latente en raison de la faible conductivité thermique, du changement de densité, de la stabilité des propriétés durant plusieurs cycles prolongés et parfois de la ségrégation et du sous-refroidissement des matériaux à changement de phase.

1.3.1. Stockage par chaleur latente

Comme on le sait depuis plus de 200 ans, il faut ajouter la chaleur à un solide cristallin à son point de fusion pour le transformer en liquide. L'énergie ajoutée brise les liaisons entre

les atomes ou les molécules dans la structure cristalline ordonnée, augmentant ainsi leur énergie potentielle tandis que la température reste constante pendant le processus. L'énergie qui doit être ajoutée durant le changement de phase est appelée chaleur latente. Lorsque la substance se recristallise lors du refroidissement ultérieur, cette chaleur est récupérée à nouveau. La quantité de chaleur latente associée à une transition de phase peut être substantielle. La quantité relativement importante de chaleur latente associée à la transition de phase donne une densité de stockage d'énergie plus élevée par rapport aux systèmes traditionnels de stockage de chaleur sensible, et permet donc une réduction du volume et de la masse. Un autre avantage est le comportement isotherme pendant la fusion / solidification qui réduit la plage de température de fonctionnement. La chaleur stockée peut être calculée comme suit:

$$Q_{latent} = \int_{T_i}^{T_{mcp}} C_{p,s} \cdot dT + \Delta H_{pc} + \int_{T_{mcp}}^{T_f} C_{p,l} \cdot dT \quad (1.7)$$

1.3.2. Classification des MCP

A. MCP organique

Les MCP organiques comprennent de la paraffine et de la non-paraffine. La paraffine est une substance qui a une consistance cireuse à température ambiante. Elles contiennent un composant majeur appelé alcanes C_nH_{2n+2} ; la teneur en n-alcanes dans les cires de paraffine dépasse généralement 75% et peut atteindre 100%. La paraffine pure est composée uniquement d'alcanes, par exemple la paraffine octadécane, CI 8H38. Le point de fusion des alcanes augmente à mesure que le nombre de carbone augmente. Les cires de paraffine sont chimiquement stables, non corrosives, compatibles avec la plupart des matériaux de construction, possèdent une chaleur latente massique élevée et recyclables. Leurs inconvénients résident dans leurs faibles conductivités, changements importants de volume pendant le changement de phase et l'inflammabilité.

La non-paraffine implique une grande variété de matériaux organiques tels que les acides gras, les esters, les alcools et les glycols. Une étude de Hasnain (1998) [14] montre que les acides gras ont des points de fusion adaptés aux applications de chauffage et qu'ils présentent d'excellents cycles de fusion-solidification sans surfusion. Cependant, l'inconvénient majeur est leur coût qui est environ trois fois supérieur à celui de la paraffine.

B. MCP inorganique

Les composés inorganiques tels que les hydrates de sel (sels, métaux et alliages) ont une chaleur latente par unité de volume beaucoup plus élevée, une conductivité thermique plus élevée, sont ininflammables et moins coûteux que les composés organiques. Potentiellement, ils peuvent être recyclés après leur vie utile. Cependant, ils sont corrosifs pour la plupart des métaux et souffrent de surfusion et de décomposition, ce qui peut affecter leurs propriétés de changement de phase. Des agents de nucléation et d'épaississement peuvent être ajoutés aux MCP inorganiques pour minimiser la surfusion et la décomposition.

C. MCP eutectique

Les MCP eutectiques sont des substances composées de plusieurs MCP purs. En général, il s'agit des mélanges de MCP organiques et inorganiques (organique-organique, organique-inorganique, inorganique-inorganique).

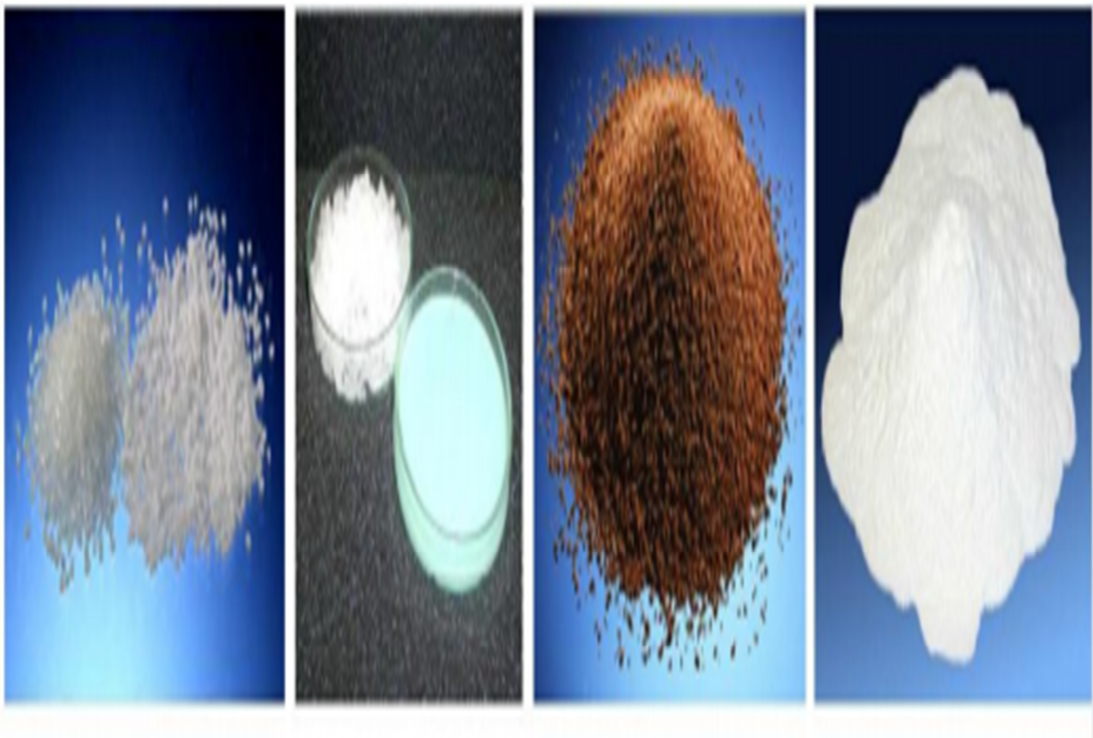


Fig. 1. 17. Différents types des matériaux à changement de phase.

1.3.3. Les propriétés désirables des MCP

Le MCP utilisé dans la conception du système de stockage thermique devrait avoir les propriétés suivantes :

Propriétés thermo-physiques

- Température de fusion dans la plage de température de fonctionnement souhaitée.
- Grande masse volumique pour assurer un stockage suffisant dans le volume le plus faible possible.
- Chaleur spécifique élevée pour fournir un stockage de chaleur sensible significatif supplémentaire.
- Conductivité thermique élevée pour accélérer le stockage et le déstockage.

Propriétés chimiques

- Cycle de solidification / fusion complet et réversible.
- Aucune dégradation après un grand nombre de cycles de solidification/ fusion.
- Aucune corrosivité pour les matériaux de construction.
- Matériau non toxique, ininflammable et non explosif pour la sécurité.

1.3.4. Applications des MCP dans les capteurs solaires thermiques

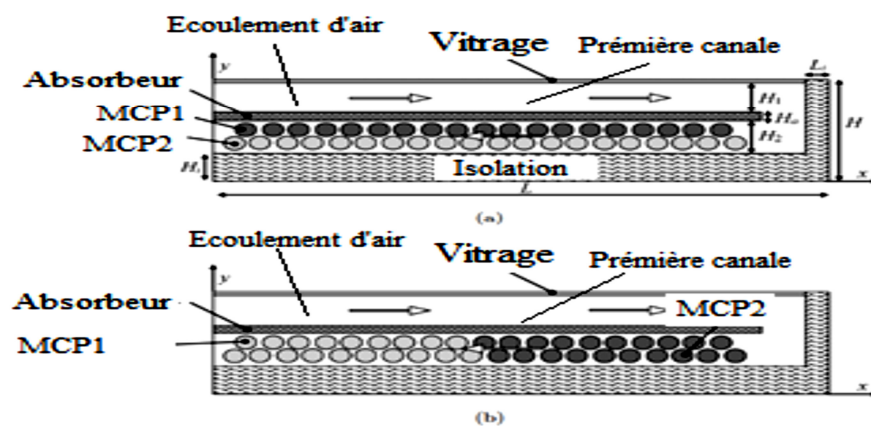


Fig. 1.18. Schéma de capteur solaire double passe avec MCP: (a) Parallèle (b) séries [15].

L'énergie solaire thermique peut être stockée sous forme de chaleur sensible ou de chaleur latente ou d'une combinaison de celles-ci. Dans la plupart des systèmes de stockage,

l'énergie est stockée sous forme de chaleur sensible dans des matériaux tels que l'eau et les roches. Dans les systèmes de stockage de chaleur latente, la chaleur latente provenant du changement de phase d'un matériau est utilisée pour le stockage d'énergie thermique (**figure 1.18**). Les MCP peuvent stocker une grande quantité de chaleur latente durant le changement de phase. En général, les systèmes utilisant des MCP fournissent une densité de stockage d'énergie beaucoup plus élevée que celle des systèmes utilisant la chaleur sensible.

1.3.5. Refroidissement des capteurs solaires photovoltaïques

Comme il a été mentionné, seulement environ 16% de l'énergie solaire incidente sur un capteur photovoltaïque (PV) est convertie en électricité et le rayonnement absorbé restant est transformé en chaleur. La dissipation active de la chaleur dans le PV utilisant un refroidissement à air ou à eau peut nécessiter des niveaux d'entretien élevés. L'incorporation d'un MCP à température de fusion similaire à la température de caractérisation PV est une nouvelle approche du contrôle la température des cellules solaires (**Figure 1.19**). En fonction des conditions ambiantes, un système PV-MCP peut permettre au PV de fonctionner à proximité de sa température de caractérisation et donc avec une bonne efficacité de conversion solaire / électrique. Un avantage potentiel supplémentaire réside dans le stockage d'énergie dans le MCP destiné au chauffage des bâtiments durant la nuit.

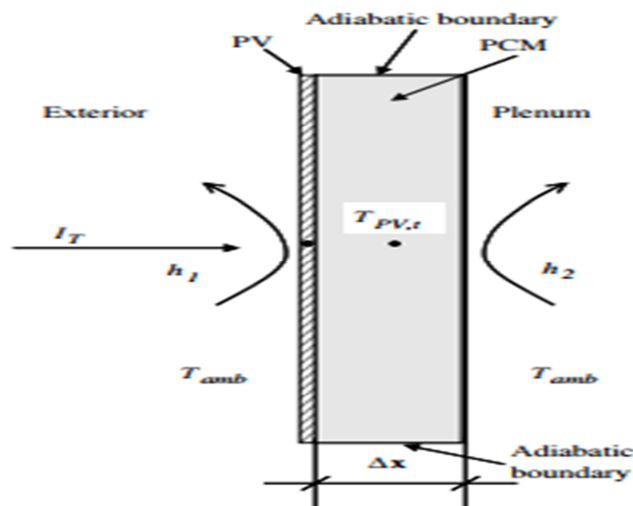


Fig. 1.19. Schéma du transfert de chaleur dans un système PV-MCP [16].

Chapitre 2

Etude bibliographique

Un module photovoltaïque (PV) classique de technologie silicium cristallin convertit entre 12 et 18 % de l'énergie solaire incidente. Pour arriver à ce résultat, ce module PV absorbe en réalité entre 80 et 90% du rayonnement incident, dont la majeure partie est dissipée sous forme de chaleur, augmentant ainsi la température interne du module. Cette augmentation de la température réduit sensiblement les performances électriques du module. Pour les cellules solaires en silicium cristallin, lorsque la température augmente par 1°C l'efficacité de conversion d'énergie solaire en énergie électrique se réduit par 0,4 à 0,5% [17, 18].

Plusieurs efforts ont été consentis pour trouver une solution à ce problème. Il y a eu certaines idées comme la combinaison du système PV avec un système thermique pour former le capteur hybride PVT, le refroidissement par un matériau à changement de phase PV-MCP et l'incorporation d'un matériau à changement de phase dans un capteur hybride PVT-MCP.

2.1. Les capteurs solaires photovoltaïques

L'histoire du photovoltaïque remonte à 1839, lorsque le physicien français Edmond Becquerel a d'abord observé l'effet PV. En 1886, l'américain Charles Fitts construit une cellule PV au sélénium qui convertit la lumière visible en électricité avec une efficacité de 1% [19]. Dans les années 1930, la théorie des effets photoélectriques a été développée grâce aux propriétés électriques du silicium et d'autres semi-conducteurs cristallins.

En 1954, des scientifiques des laboratoires Bell, à la recherche d'un moyen pratique pour produire de l'électricité pour les systèmes téléphoniques dans les zones rurales éloignées des lignes électriques, produisent une cellule PV en silicium avec une efficacité de 6% [20]. Bientôt, cette efficacité a été améliorée à 11%.

Les années 1950 ont été un moment défavorables pour le développement d'une technologie énergétique basées sur l'effet PV. Le prix du pétrole était inférieur à 2 dollars le baril et de grandes centrales à combustible fossile ont été construites. De plus, en 1954, la construction du premier réacteur nucléaire commercial au monde a commencé. Les chercheurs en PV ont également fait face à une réalité économique troublante. Les cellules de silicium développées étaient extrêmement coûteuses, avec des coûts dépassant 600 \$ par watt comparativement à 5 \$ en 2016.

Entre 1957 et 1958, les Russes et les Américains lancent leurs premiers satellites à énergie solaire [21]. Les cellules connaissent alors une augmentation importante de leurs efficacités avec réduction des coûts. En 1986, Lalovic et d'autres [22] proposent un nouveau

type de cellules amorphes a-Si transparentes. Depuis le début des années 1990, la croissance annuelle du marché mondial des cellules solaires a été de 20 à 40%. Depuis 1999, les vingt pays de l'AIE (Agence internationale de l'énergie) ont représenté plus de 90% de la production mondiale de cellules solaires dont environ 80% ont été installée dans ces pays. En 2005, la capacité des cellules solaires installées dans le monde avait atteint 10 877 MW.

2.2. Les capteurs solaires hybrides photovoltaïques thermiques PVT

Les capteurs hybrides photovoltaïques thermiques (PVT) sont des dispositifs qui convertissent simultanément l'énergie solaire en électricité et en chaleur. Une quantité importante de recherche sur les capteurs PVT a été effectuée au cours des 30 dernières années. L'examen porte sur des modèles analytiques et numériques ainsi que des travaux de simulation et d'expérimentation. Parmi les principaux travaux on peut citer :

En 1976, Wolf [23] effectue l'analyse d'un capteur solaire thermique comportant des modules PV à base de silicium et couplé à un système de stockage de chaleur. Par la suite, Kern et Russell, 1978 [24], donnent les principaux concepts de ces systèmes par l'usage d'eau ou de l'air comme fluide caloporteur. En 1979, Hendrie [25] propose un modèle théorique sur les systèmes PVT. En 1981, Raghuraman [26] présente des méthodes numériques permettant l'analyse des performances des capteurs solaires plans PVT à eau ou à air. Plus tard, en 1985, Cox et Raghuraman [27] développent des logiciels de simulation permettant l'étude des performances des systèmes PVT hybride 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 1991, un système PVT hybride à air a été analysé par Bhargava et al [28]. La zone optimale des cellules solaires nécessaires pour fonctionner la pompe est calculée pour différentes configurations. Ils ont montré que le système hybride n'est autosuffisant que pour certains paramètres de conception et certains débits. Les performances des capteurs hybrides ont été étudiées par Sopian et al, en 1995 et 1996 [29]. Dans les travaux précités, le rendement thermique des systèmes PVT était dans la gamme de 45 à 65 %. Ensuite, Bergene et Lovvik 1995 [8], ont analysé le transfert de l'énergie entre les différents composants du système hybride PVT utilisant de l'eau comme fluide caloporteur.

Le capteur hybride PVT avec réservoir d'eau chaude a été proposé par Huang et al, en 2001 [30]. Une autre conception des systèmes PVT a été incluse par Zondag et al, en 2002 [31] et 2003 [32]. En 2005, Zondag [33] propose un état de l'art sur les capteurs solaires PVT hybrides en se basant sur le rapport du projet européen PV-Catapult [34]. En 2006, Tiwari et

al [35] présentent l'étude théorique et expérimentale d'un capteur solaire PVT à air. Ce système est constitué de deux modules PV connectés en série et montés sur une couche isolante non-corrosive de Tedlar. Une lame d'air isolée à l'aide d'une couche en bois permet la ventilation naturelle ou forcée des modules PV en sous-face.

La plupart des recherches menées dans ce domaine ont pour objectif d'évaluer les performances thermiques et électriques ou d'analyser l'aspect économique des systèmes hybrides. Pour cela, certains chercheurs proposent des modèles thermiques analytiques à l'aide d'une analogie électrique. D'autres recherches portent sur l'optimisation des performances des composants solaires en améliorant les conditions de fonctionnement (inclinaison, orientation, etc.) ou en proposant des configurations géométriques innovantes. Ainsi, ces recherches se basent sur la modification des dimensions ou des propriétés des matériaux de construction (isolant thermique, absorbeur, cellules PV, etc.) ou des fluides caloporteurs (air, eau glycolée, etc.). Ces améliorations visent soit à accroître la quantité d'énergie solaire absorbée et les transferts thermiques entre le fluide caloporteur et l'absorbeur ou à réduire les pertes thermiques extérieures du capteur solaire hybride.

2.2.1. 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).

2.2.1.1. Les capteurs solaires hybrides PVT à eau

En 2015, Baloch et al [36] 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 (**Fig. 2.1**).

Fujisawa et Tani [37] 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%), **Fig.2.2**. 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).

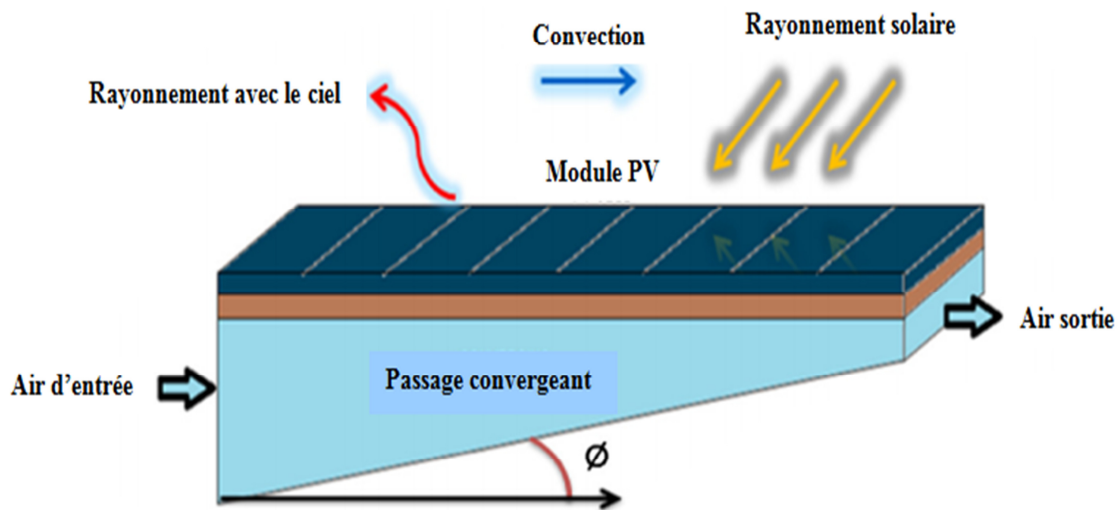


Fig. 2.1. Schéma de l'échangeur de chaleur à canal convergent avec des modes de transfert de chaleur [36].

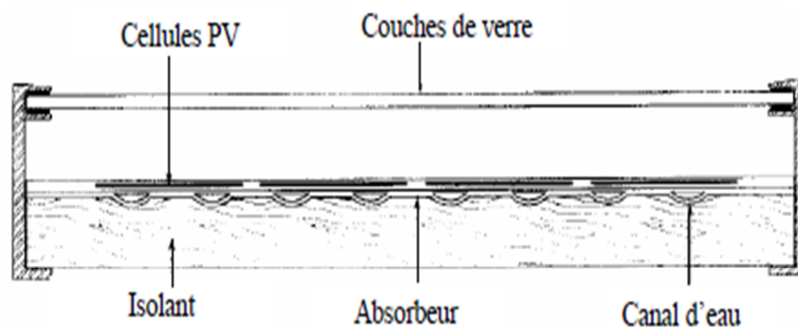


Fig. 2.2. Capteur hybride à eau [37].

Tripanagnostopoulos et al. [38] ont réalisé une étude expérimentale sur des systèmes PVT (**Fig. 2.3**) 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.

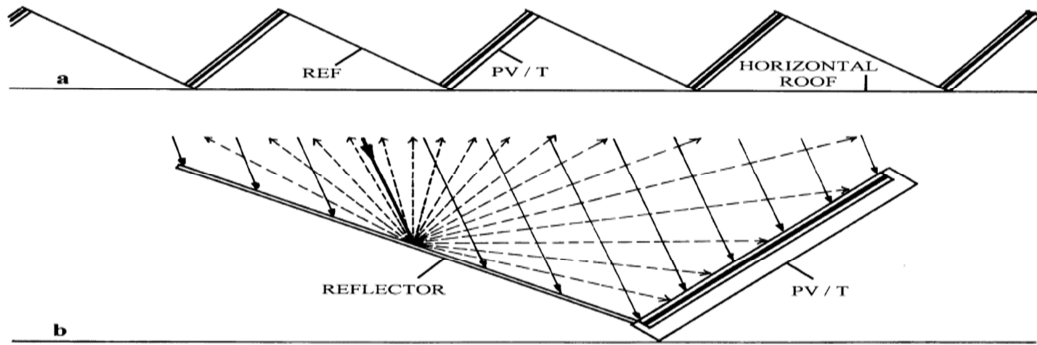


Fig. 2.3. Système PVT avec réflecteur [38].

Alzaabi et al. [39] ont proposé une conception pour améliorer l'efficacité électrique des panneaux PV à l'aide d'un système PVT hybride refroidi à eau, **Fig. 2.4**. 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 poly-cristallin 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%.



Fig. 2.4. Photo du système PVT à eau [39].

Un système PVT contenant un module PV sur un absorbeur avec écoulement d'eau en spirale a été étudié par Ibrahim et al. [40], **Fig.2.5**. 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%.



Fig. 2.5. Photo du système de PVT [40].

Une analyse de la performance d'un système PVT refroidi à eau (**Fig.2.6**) a été réalisée par Kiran et Devadiga [41]. 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.



Fig. 2.6. Système PVT et de la plate-forme d'essai extérieure [41].

Hazami et al. [42] ont étudié le potentiel offert par l'utilisation d'un capteur solaire PVT (**Fig.2.7**) 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%.

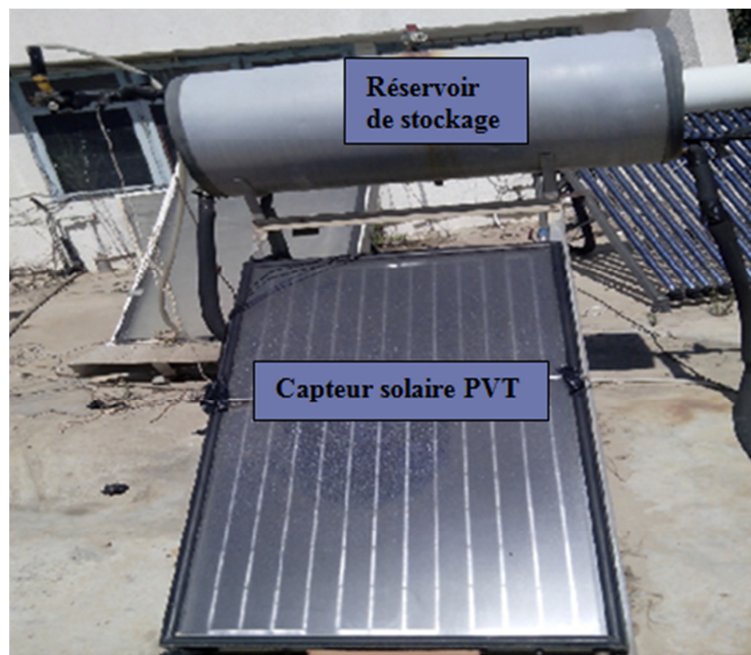


Fig. 2.7. Capteur PVT avec ballon de stockage [42].

2.2.1.2. 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 [43] proposent une étude paramétrique et comparative de quatre types des capteurs solaires à air, **Fig. 2.8**. 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 identique.

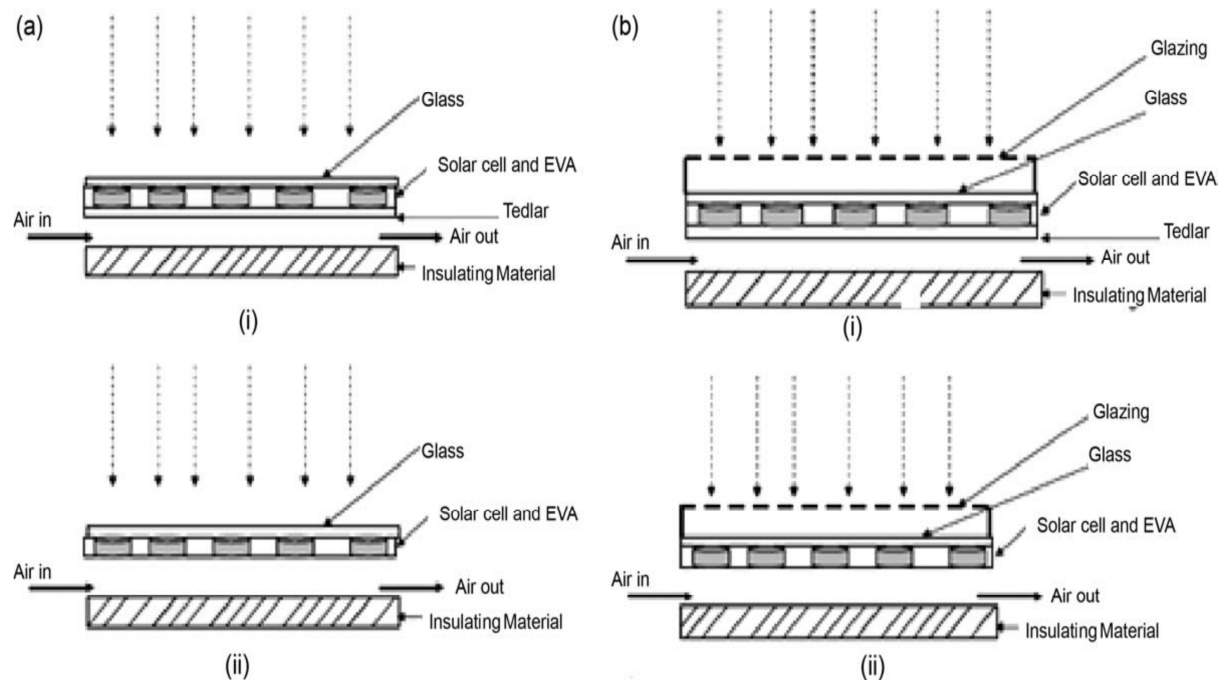


Fig. 2.8. PVT à air avec et sans vitrage, avec et sans tedlar [43].

Joshi et Tiwari [44] 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 (**Fig. 2.9**).

Une étude expérimentale qui porte sur la conception et le développement des systèmes PVT avec circulation d'air intégrée dans un toit (**Fig.2.10**) a été réalisé par Aste et al. [45]. 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.



Fig. 2.9. Photographie de l'installation expérimentale d'un collecteur d'air hybride PV / T [44].



Fig. 2.10. Systèmes PVT avec circulation d'air [45].

Tonui et Tripanagnostopoulos [46] ont présenté un système de capteur solaire PVT avec refroidissement à air (**Fig.2.11**). 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.

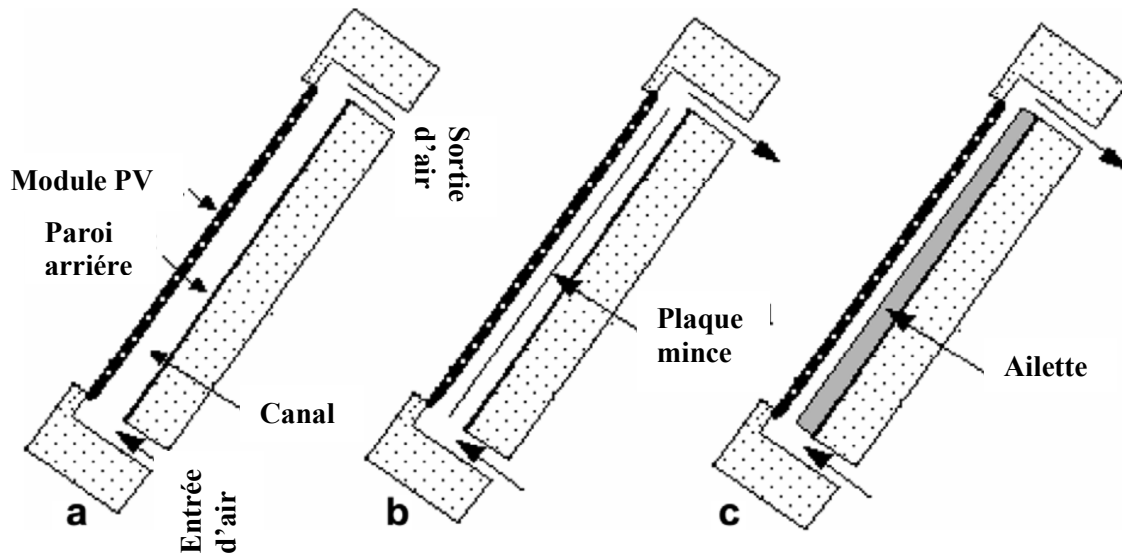


Fig. 2.11. Les différentes configurations étudiées : (a) système conventionnel (b) système avec une feuille de métal (c) système avec ailettes [46].

Agwaral et Tiawri [47] ont étudié un système PVT installé comme toit d'un bâtiment (Fig.2.12). 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.

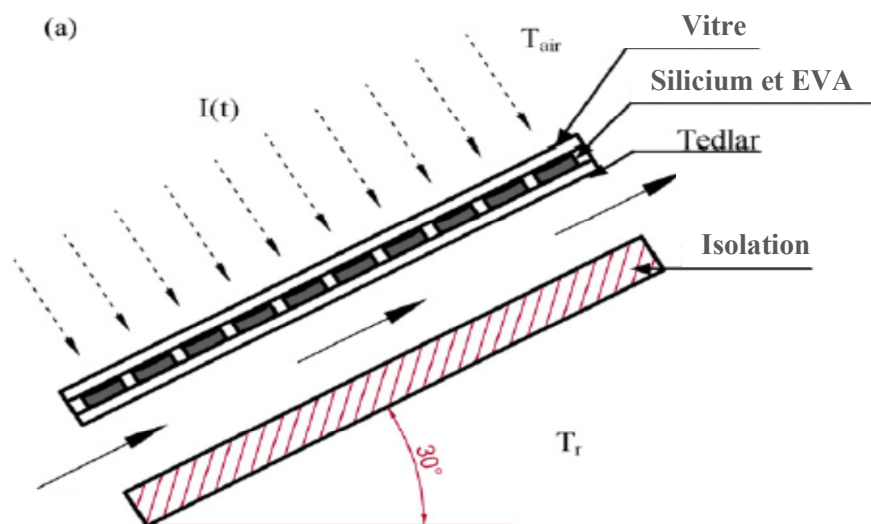


Fig. 2.12. Section transversale du système PVT [47].

Ahn et al. [48] ont couplé un capteur PVT à air avec un système de ventilation à récupération de chaleur (VRC), **Fig.2.13**. 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.



Fig.2.13. Photo du bâtiment expérimental [48].

Un capteur solaire PVT à air avec ailettes rectangulaires minces est proposé par Mojumder et al. [49], **Fig. 2.14**. 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.

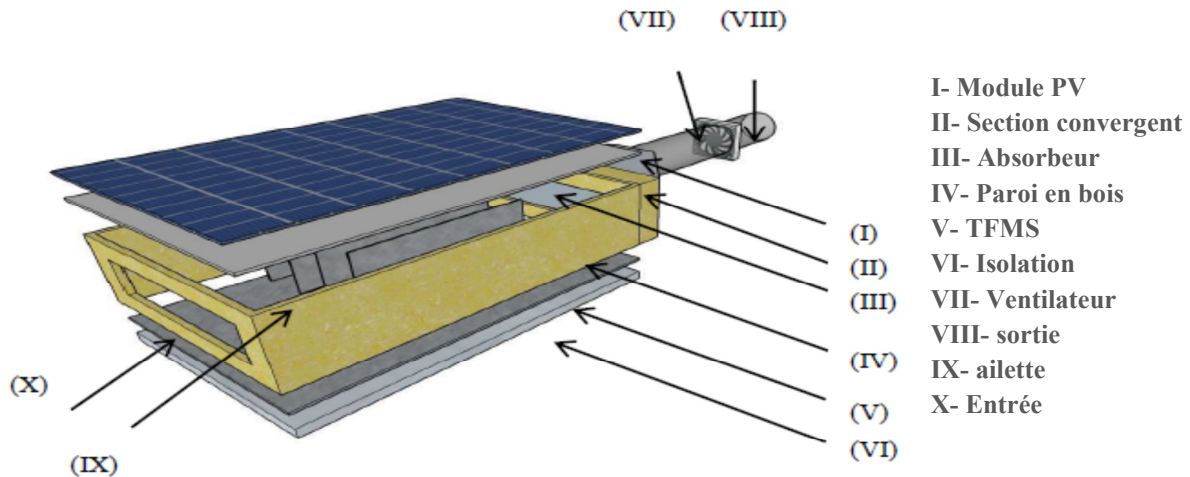


Fig. 2.14. Schéma de la conception de capteur PVT [49].

2.2.1.3. Les capteurs solaires hybrides PVT bi-fluide

Tripanagnostopoulos [50] 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 (Fig.2.15) 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 %.

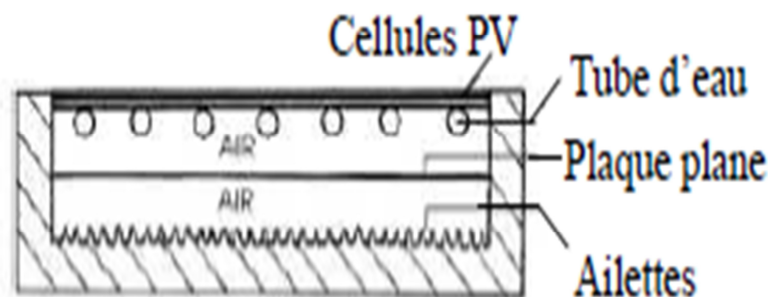


Fig. 2.15. Capteur solaire PVT à deux fluides et à fonctions superposées [50].

Une étude comparative expérimentale et numérique a été effectuée par Assoa et al. [51], Fig.2.16. 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.

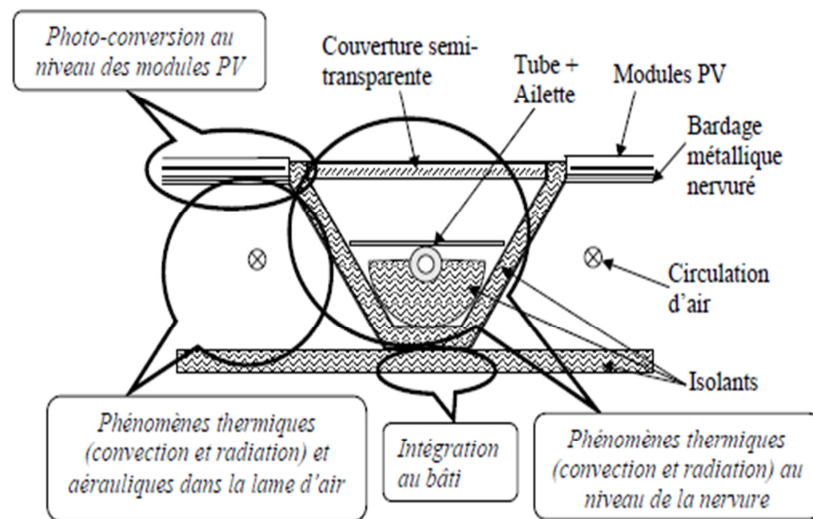


Fig. 2.16. Section du prototype bi-fluide initial et localisation interdépendants [51].

Othman et al [52] présenté un système PVT bi-fluide (eau-air) (Fig. 2.17). Les principaux composants du système sont deux modules PV transparents connectés en parallèle pour générer de l'électricité, un canal d'air plat à double passage, un tube d'eau en cuivre et un réservoir pour stocker l'eau chaude produite. Les températures des cellules solaires, de l'eau et de l'air dans les deux canaux ont été mesurées. Dans un environnement contrôlé (assurant un rayonnement de 800 W/m^2 , un débit d'air de $0,05 \text{ kg/s}$ et un débit d'eau de $0,02 \text{ kg/s}$) la température de sortie enregistrée était de $27,4 \text{ }^\circ\text{C}$. L'efficacité électrique atteignait 17% avec une puissance électrique moyenne de 145 W et une efficacité thermique de 76%.

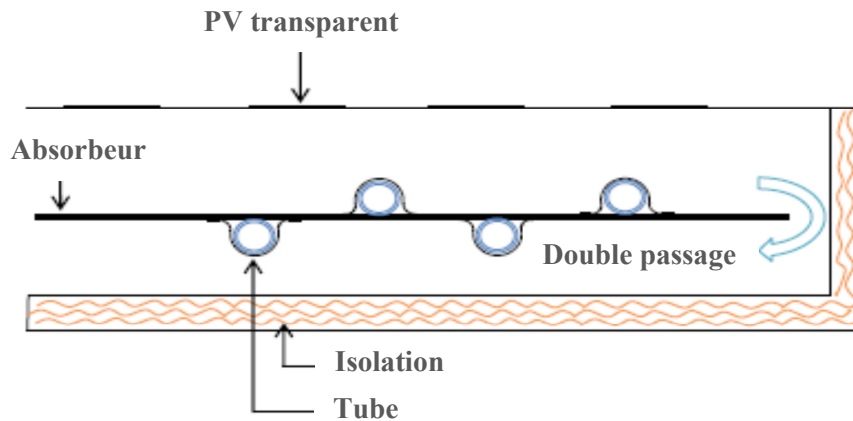


Fig. 2.17. Schéma du capteur PVT [52].

Su et al. [53] ont étudié les performances d'un capteur solaire (PVT) à double canalisation avec différents fluides (Fig. 2.18). Les caractéristiques électriques et thermiques du capteur (températures de la cellule solaire et des fluides à la sortie, efficacités électrique et thermique) sont analysées pour quatre capteurs PVT avec différents fluides. Ils ont constaté que le capteur PVT refroidi à eau-eau est le plus efficace en termes de performance électrique et thermique en fournissant la plus grande quantité d'eau chaude. La température de l'eau dans le cas air-eau est la plus élevée. Le capteur PVT refroidi à air-air peut fournir la plus grande quantité d'air chaud. Ils constatent également qu'une augmentation du débit massique de l'eau conduit à un meilleur rendement global du capteur PVT refroidi à eau-eau.

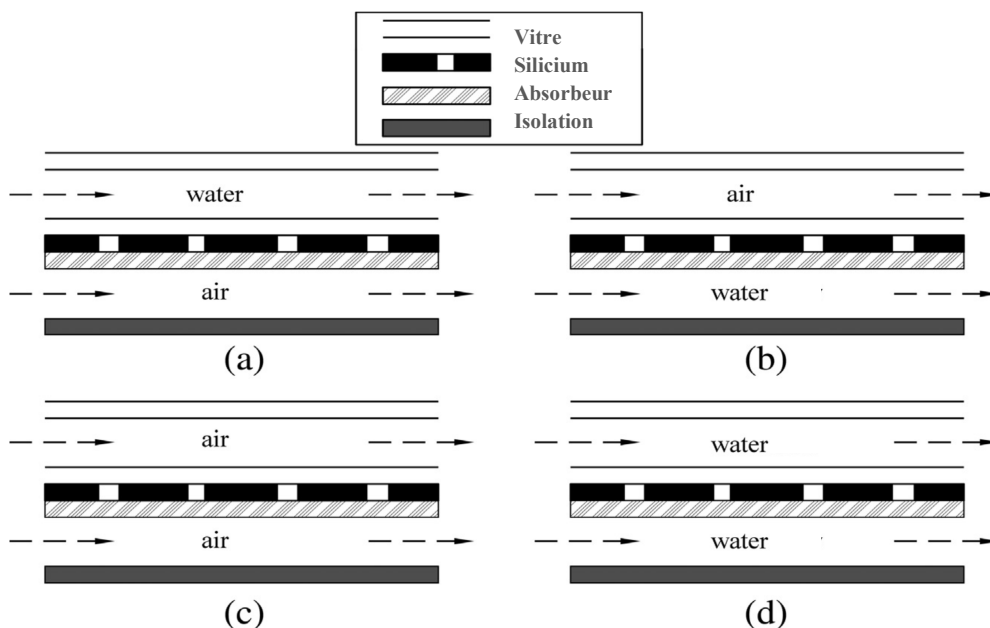


Fig. 2.18. La vue en coupe du capteur PVT avec deux canaux pour différents fluides [53].

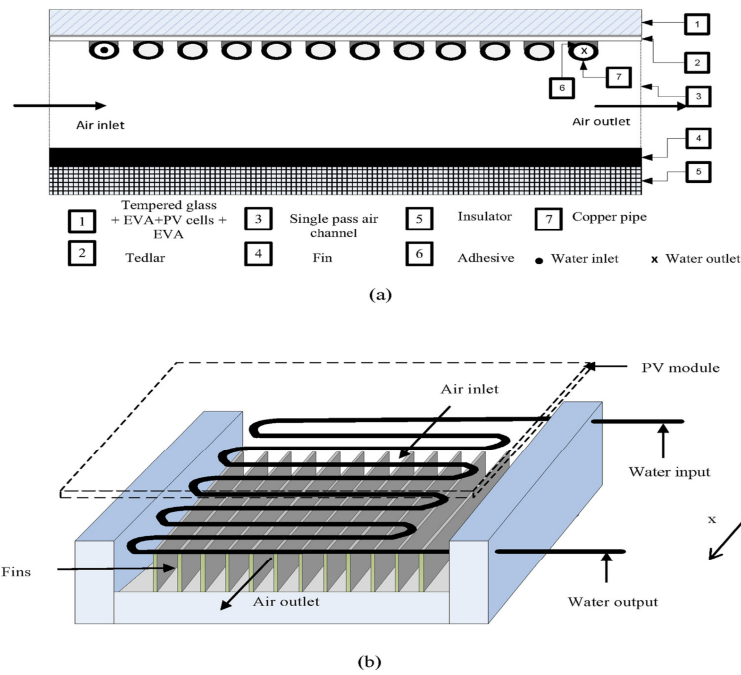


Fig. 2.19. a) Vue en coupe b) Vue en perspective du capteur PVT bi-fluide [54].

Une étude expérimentale et théorique d'un capteur solaire PVT de type bi-fluide (**Fig. 2.19**) a été réalisée par Jarimi et al [54]. Une simulation 2D en régime permanent a été développée en utilisant MATLAB. Les essais comprennent les trois modes de fonctionnement du fluide sous le même système PVT, à savoir, les modes à air, à eau et à eau-air. Les résultats de la simulation ont été validés avec l'expérimentale et un bon accord a été observé. Le capteur PVT conçu à travers cette étude peut avoir une variété d'applications puisqu'il fonctionne dans trois modes différents.

2.2.2. 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 (**Fig. 2.20**) par Kostic et al. [55]. 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.

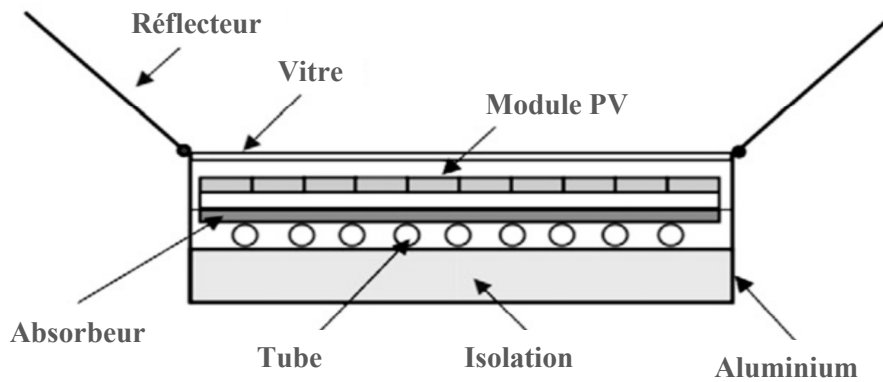


Fig. 2.20. Capteur solaire CPVT [55].

Coventry [56] a conçu un concentrateur photovoltaïque thermique CPVT parabolique avec un taux de concentration de 37 % à l'Australie ANU, **Fig.2.21**. 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%.



Fig. 2.21. Prototype concentrateur CPVT type ANU [56].

Des systèmes CPVT ont été conçus et testés par Chaabane et al. [57] pour les conditions climatiques de printemps dans une ville saharienne tunisienne de Tozeur. Les résultats ont montré que le système CPVT (**Fig. 2.22**) 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.

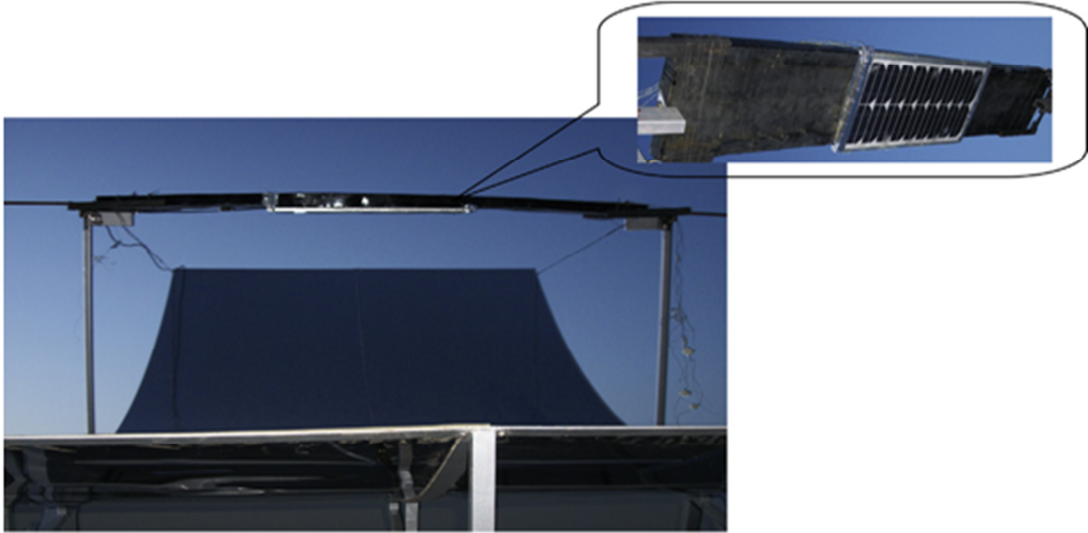


Fig. 2.22. Concentrateur CPVT [57].

Les performances électriques et thermiques d'un système CPVT (**Fig. 2.23**) fonctionnant à Padoue (nord de l'Italie) sont étudiées expérimentalement par Del Col et al. [58]. 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 électriques produite). Ces résultats sont utilisés pour évaluer un modèle numérique développé. Les résultats obtenus montrent que l'efficacité globale mesurée atteint 70%.



Fig. 2.23. Prototype CPVT lors des essais à l'Université de Padoue [58].

2.3. 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.

La régulation de la température des modules PV en utilisant des matériaux à changement de phase MCP (**Fig. 2.24**) a été étudiée par Hasan et al. [59]. 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.

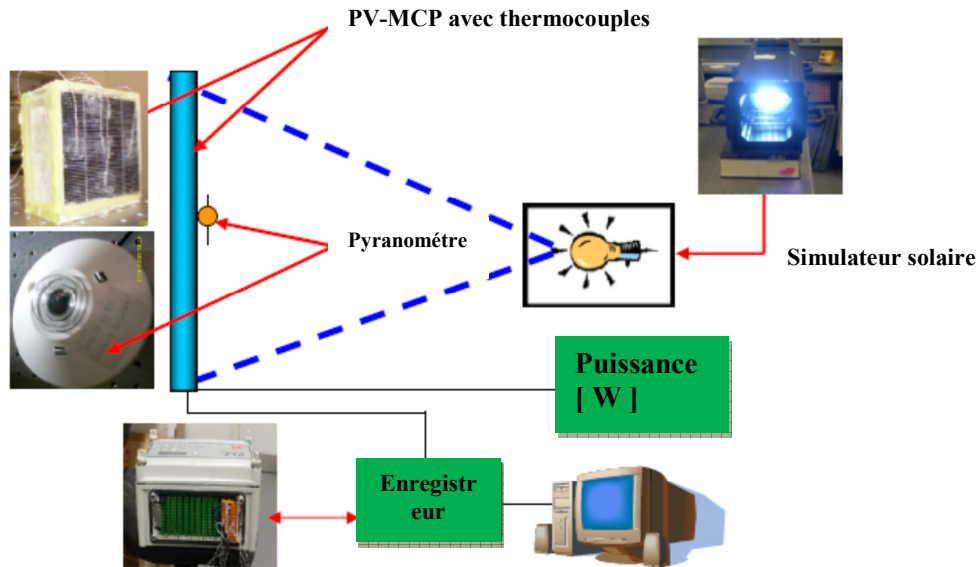


Fig. 2.24. Schéma de la configuration expérimentale [59].

Smith et al. [60] 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, Fig. 2.25. 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.

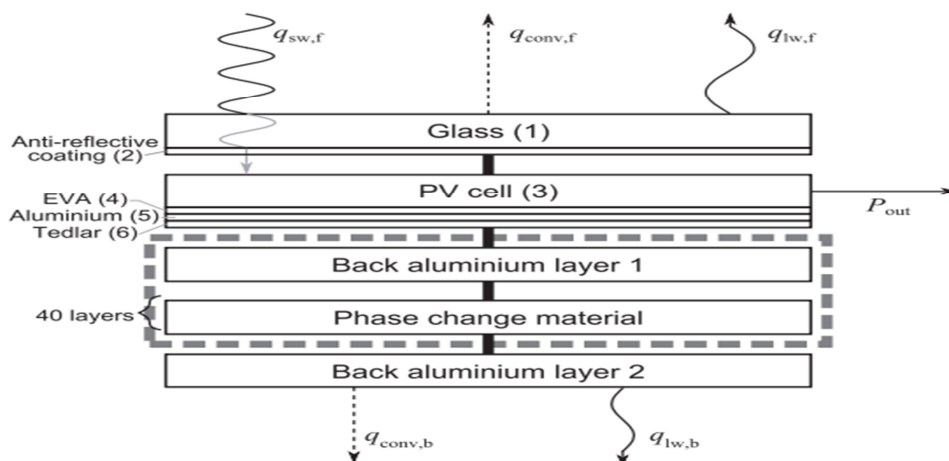


Fig. 2.25. Schéma du PV-MCP [60].

Kazanci et al. [61] ont évalué la performance d'un système PV-MCP par rapport à une installation PV construite avec les mêmes cellules PV (Fig. 2.26). Les résultats annuels montrent que le système PV-MCP combiné est plus avantageux que les deux systèmes séparés. La plus grande amélioration de l'efficacité électrique du PV était de 15,5%.

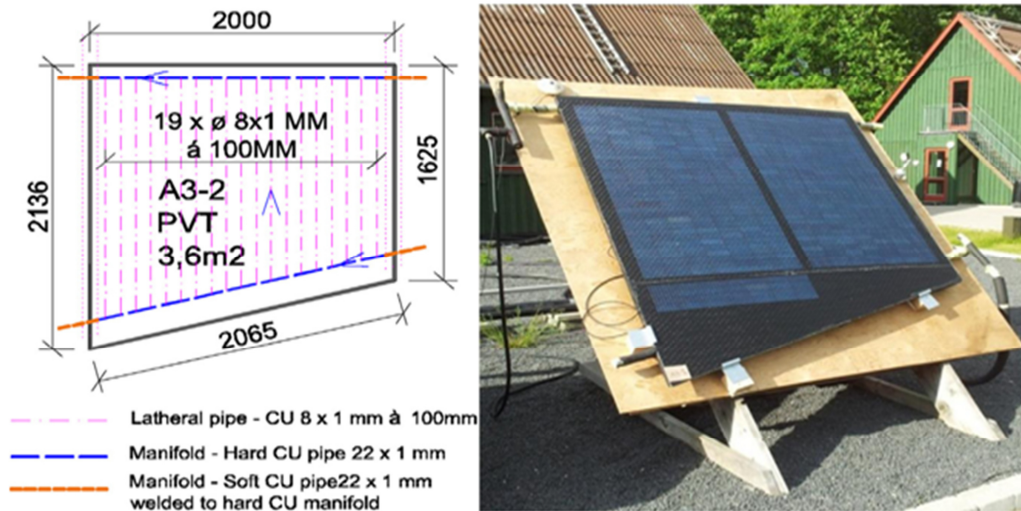


Fig. 2.26. Le panneau PV-MCP testé [61].

Elarga et al. [62] ont développé un modèle mathématique pour étudier la performance d'un capteur PV-MCP intégrant une couche PV et une couche de MCP (Fig. 2.27). 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%.

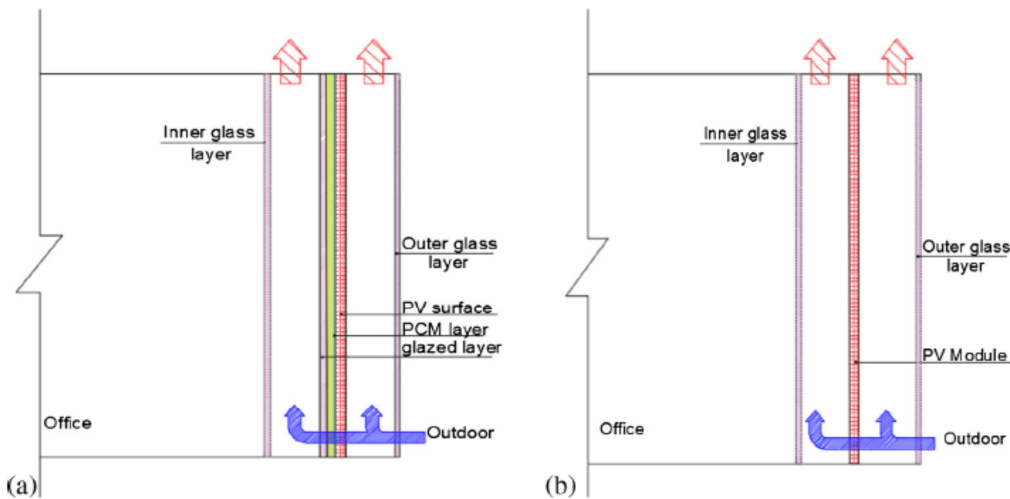


Fig. 2.27. Bureau vitré intégré avec le module PV (a) avec MCP, (b) sans MCP [62].

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

Preet et al. [63] 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 (Fig. 2.28) et un système PVT-MCP à eau (Fig. 2.29). 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.

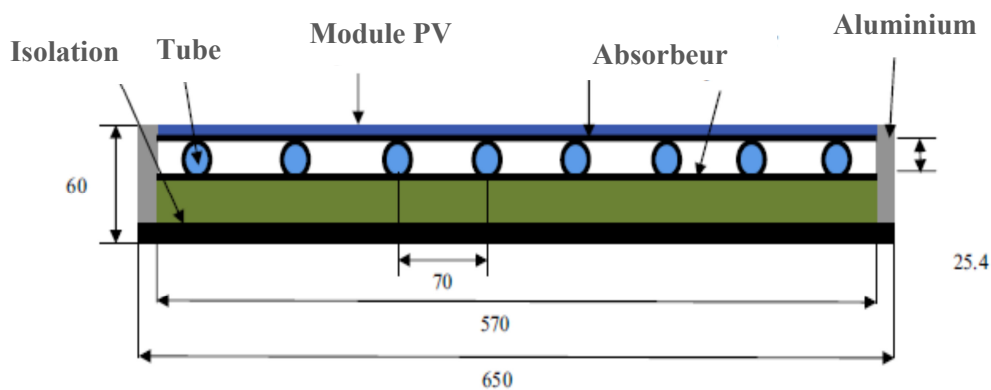


Fig. 2.28. Schéma de principe du système PVT à base d'eau [63].

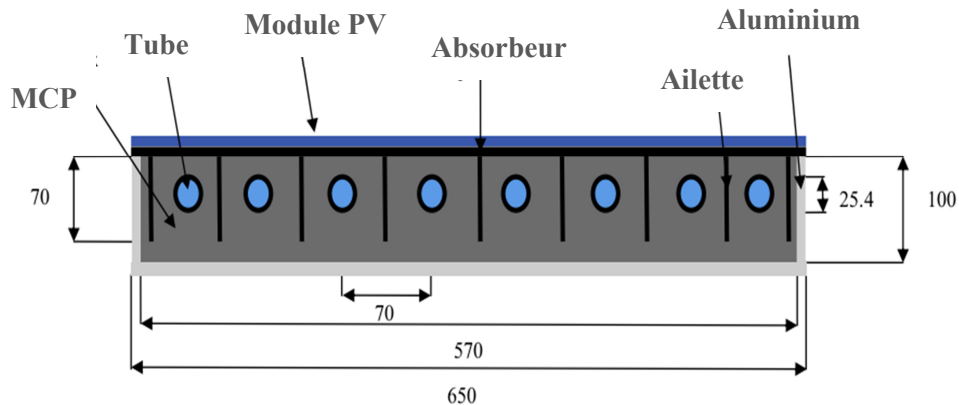


Fig. 2.29. Schéma de principe du système PVT-MCP à base d'eau [63].

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. [64]. Les auteurs ont monté deux systèmes, un PVT simple et un PVT-MCP (Fig. 2.30). 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%.

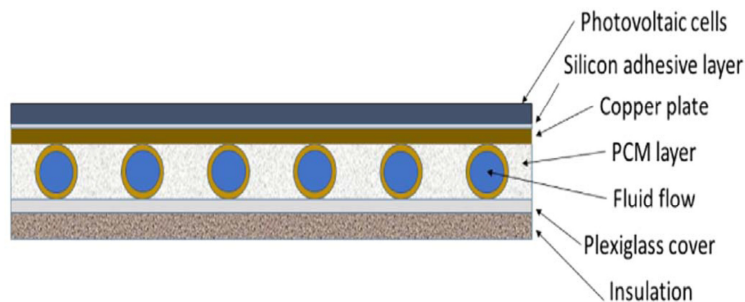


Fig. 2.30. Système PVT-MCP [64].

Chapitre 03
Modélisation mathématique des phénomènes de
changement de phase

Les processus de changement de phase présentent un phénomène transitoire et non linéaire avec une interface liquide-solide mobile. Ils impliquent des problèmes d'écoulement associés aux transferts thermiques. Par conséquent, il est difficile de prédire le comportement des processus de changement de phase.

3.1. Modélisation mathématique des phénomènes de changement de phase

Les modèles mathématiques sont des outils bénéfiques et puissants pour effectuer des analyses thermo-convectifs dans un grand nombre de conditions. Des configurations quasi optimales peuvent être développées avec l'analyse des systèmes thermiques complexes réels. Les modèles numériques développés pour la résolution des problèmes de changement de phase peuvent être classés en deux groupes principaux: schémas avec maillage variable et schémas avec maillage fixe (figure 3.1) [65] [66] :

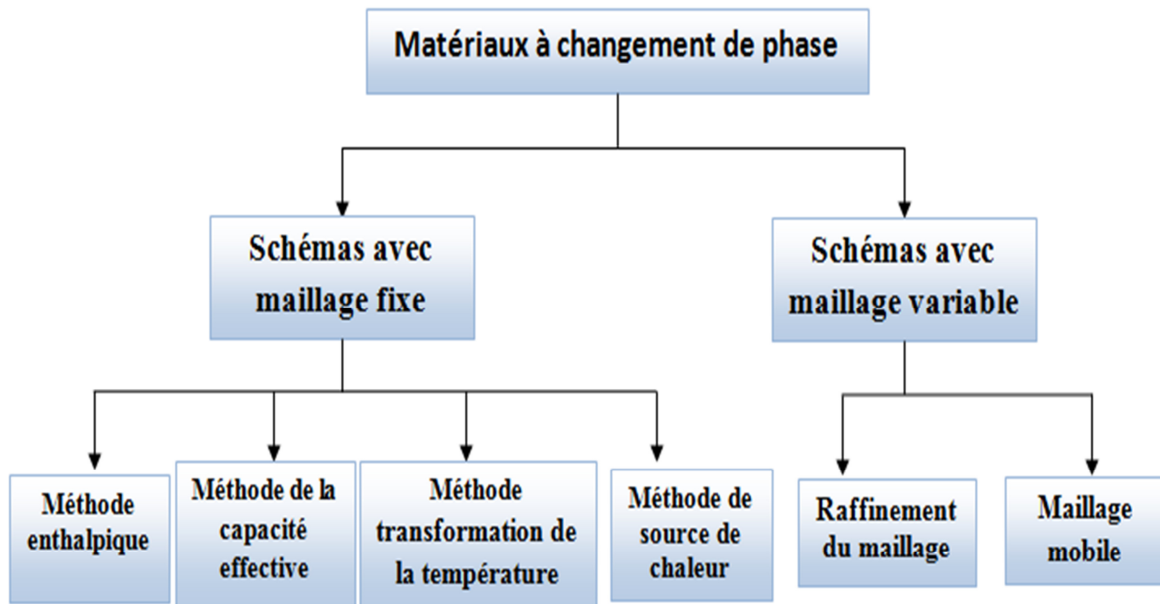


Figure 3.1. Classification des approches de la modélisation du changement de phase.

3.1.1. Schémas avec maillage variable

Deux techniques sont généralement utilisées dans le groupe des schémas avec maillage variable [67], le raffinement du maillage et le maillage mobile. Le raffinement du maillage peut être général lorsque le domaine spatial en entier est divisé en un grand nombre de cellules (volumes). Cette technique présente l'avantage de bien capturer la non-linéarité générée autour de la transition, mais nécessite une mémoire d'ordinateur assez importante. Donc, elle est appliquée uniquement à proximité de la position de l'interface mobile pour offrir un excellent compromis entre les coûts de calcul et la précision. Cependant, la

complexité de la mettre en œuvre s'accroît considérablement. Dans la technique du maillage variable, la position de l'interface est traquée à chaque pas de temps. Ainsi, le maillage se régénère continuellement avec le développement du changement de phase. Cette technique a l'avantage de réduire les coûts de calcul et le stockage des données sans affecter la précision. Dans les problèmes de changement de phase, la technique du maillage variable traite les deux régions solide et liquide comme deux domaines distincts [68] dont les deux équations gouvernantes sont (dans le cas tridimensionnel) :

- Phase solide

$$C_{ps}\rho_s \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = \lambda_s \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.1)$$

- Phase liquide

$$C_{pl}\rho_l \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda_l \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.2)$$

- A l'interface Solide /liquide (condition de Stefan)

$$\begin{cases} T_l = T_s = T_f \\ -\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} + \lambda_l \frac{\partial T_l}{\partial x} = \rho_s L_s \frac{\partial \xi}{\partial t} \end{cases} \quad (3.3)$$

Avec : ξ représente la position du front solide/liquide.

3.1.2. Schémas avec maillage fixe

Dans les schémas avec maillage fixe [66], les équations gouvernantes (conservation de l'énergie, de la masse et de la quantité de mouvement) sont résolues dans un maillage numérique fixe. L'interface solide/liquide est obtenue par une nouvelle équation décrivant le changement de phase et sa position est identifiée une fois la solution obtenue. Différentes approches de la méthode avec maillage fixe ont été développées, à savoir, les méthodes enthalpique, de la capacité effective, de la transformation de température et de la source de chaleur [65].

A. Méthode enthalpique

La méthode d'enthalpie a été développée par Eyres et al. [69] afin de prendre en compte la dépendance en température des propriétés thermiques. Il combine deux processus physiques (les stockages de chaleur sensible et latente) en une seule équation de conservation d'énergie en utilisant l'enthalpie spécifique dépendant de la température ($h(T)$) [65] :

$$\rho \frac{\partial h(T)}{\partial t} + u \frac{\partial h(T)}{\partial x} + v \frac{\partial h(T)}{\partial y} + w \frac{\partial h(T)}{\partial z} = \nabla(\lambda \nabla T) \quad (3.4)$$

La relation qui décrit l'enthalpie (h) en fonction de la température peut s'écrire sous la forme intégrale [70]:

$$h(T) = \int_{T_r}^T C_p(T) dT \quad (3.5)$$

T_r est une température de référence à laquelle l'enthalpie est nulle. Dans le cas de changement de phase isotherme, la fonction d'enthalpie présente une discontinuité à la température de fusion (T_l) formulée comme suit :

$$h(T) = \begin{cases} \int_{T_r}^T C_{p,s}(T) dT & T \leq T_l \\ \int_{T_r}^T C_{p,s}(T) dT + L_f + \int_{T_l}^T C_{p,l}(T) dT & T > T_l \end{cases} \quad (3.6)$$

L_f représente la chaleur latente de fusion ou de solidification. Dans le cas où le changement de phase se produit sur un intervalle de température finie (non-isotherme) [T_s, T_l], $h(T)$ est défini comme suit:

$$h(T) = \begin{cases} \int_{T_r}^T C_{p,s}(T) dT & T \leq T_l \\ \int_{T_r}^T C_{p,s}(T) dT + \int_{T_s}^{T_l} \frac{\partial L_f}{\partial T} dT & T_s < T \leq T_l \\ \int_{T_r}^T C_{p,s}(T) dT + \int_{T_s}^{T_l} \frac{\partial L_f}{\partial T} dT + \int_{T_l}^T C_{p,l}(T) dT & T > T_l \end{cases} \quad (3.7)$$

Nedjar et al. [70] ont montrés que des instabilités numériques peuvent se produire au cours du changement de phase isotherme puisque l'enthalpie est discontinue à la température de transition. Pour surmonter ce problème, il est recommandé de considérer une petite plage autour de la température de changement de phase [65, 66, 70], Fig. 3.2.

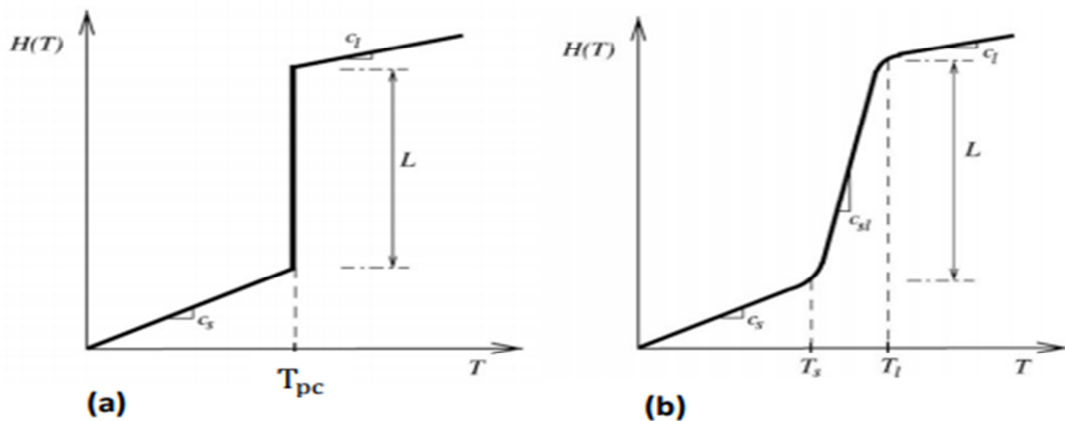


Figure 3.2. Evolution de l'enthalpie avec la température (a) approximation isotherme
(b) approximation non isotherme.

B. Méthode de capacité effective

La formulation de la capacité effective (apparente) est largement utilisée pour la modélisation des phénomènes de changement de phase avec maillage fixe [65]. Les capacités de stockage de chaleur sensible et latente du PCM sont décrites par une chaleur spécifique apparente du matériau pour différentes plages de température. L'avantage principal de cette méthode est que la température représente la variable dépendante primaire, directement obtenue à partir de la solution. La chaleur latente est introduite dans le comportement de la capacité calorifique avec la température [66]. L'inconvénient majeur est lié au «problème de singularité» [65, 67], où la capacité calorifique apparente ($C_{p,app}$) et la conductivité thermique (λ) vont à l'infini au voisinage de la température de fusion. Pour surmonter ce problème, Bonacina et al. [71] ont proposé d'utiliser un intervalle de température autour de changement de phase (région pâteuse), figure 3.3. La dépendance en température de ($C_{p,app}$) et (λ) peut s'écrire comme suit:

$$C_{p,app} = \begin{cases} C_{p,s} & T < T_l - \Delta T \\ \frac{C_{p,s} + C_{p,l}}{2} + \frac{L}{2\Delta T} & T_l - \Delta T < T < T_l + \Delta T \\ C_{p,l} & T > T_l + \Delta T \end{cases} \quad (3.8)$$

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_s & T < T_l - \Delta T \\ \lambda_s + \frac{\lambda_s - \lambda_l}{2\Delta T} (T - (T_l - \Delta T)) & T_l - \Delta T < T < T_l + \Delta T \\ \lambda_l & T > T_l + \Delta T \end{cases} \quad (3.9)$$

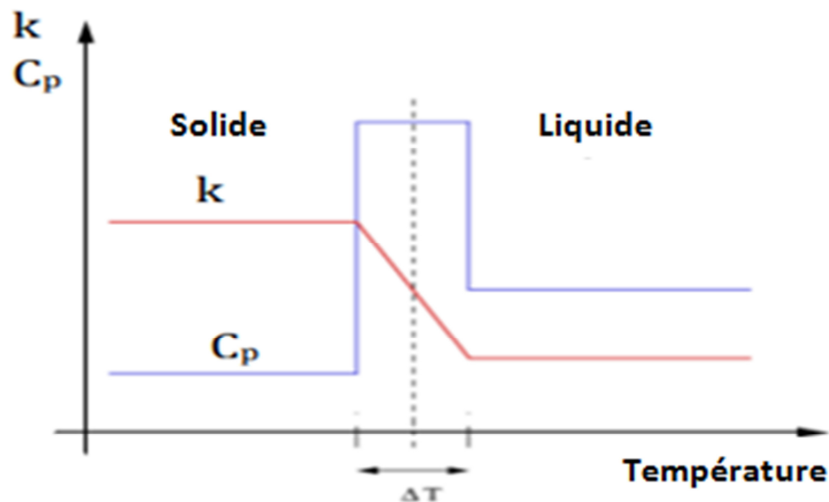


Figure.3.3. Propriétés physiques dépendant de la température.

C. Méthode de transformation de la température (TTM)

Le modèle TTM a été développé pour améliorer la stabilité numérique de la méthode enthalpique. Il convertit la forme enthalpique de l'équation d'énergie en une équation non linéaire, où la température est la seule variable dépendante [65, 67] :

$$\rho(T)C_p(T) \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho(T) \left(\frac{\partial L(T)}{\partial t} \right) = \nabla(\lambda \nabla T) \quad (3.10)$$

Cette approche est simple et efficace, mais le principal défi consiste à assurer des vitesses nulles dans la phase solide [67]. Pour surmonter ce problème, il existe deux méthodes connues: la méthode d'extinction et la méthode d'extinction progressive utilisant une équation de correction de vitesse. La TTM montre également des résultats peu fiables lorsque le transfert de masse pendant le changement de phase est considérable.

D. Méthode de source de chaleur (HSM)

La méthode de source de chaleur, également appelée formulation enthalpique de porosité, considère que la zone pâteuse pendant le changement de phase comme un milieu poreux. Un nouveau terme représentant la fraction massique du PCM liquide (f_l) est introduit dans l'équation d'énergie (Eq.3.4). L'équation d'énergie s'écrit dans ce cas en termes de chaleur spécifique et de chaleur latente. Ce dernier agit comme un terme source et l'équation gouvernante peut être exprimée comme suit [65]:

$$\rho C_p(T) \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \nabla(\lambda \nabla T) - \rho L \left(\frac{\partial f_l(T)}{\partial t} \right) \quad (3.11)$$

Dans l'équation (3.11), f_l permet de suivre l'interface de changement de phase, où il prend la valeur 0 dans la phase solide, 1 dans la phase liquide et une valeur entre 0 et 1 dans la région pâteuse [65, 72] :

$$f_l = \begin{cases} 0 & T < T_s \\ \frac{T-T_s}{T_l-T_s} & T_s < T < T_l \\ 1 & ; T > T_l \end{cases} \quad (3.12)$$

TTM et HSM sont des approches similaires. La seule différence est que dans le premier modèle, la chaleur latente est considérée dépendante de la température. Tandis que dans la HSM, elle est traitée comme une source de chaleur ou un puits en raison du changement de fraction liquide avec le temps. TTM et HSM restent efficaces lorsque l'interface est suivie macroscopiquement (ce qui n'est pas le cas pour les boues MCP) et lorsque les propriétés thermo-physiques sont bien connues (fournies par le fabricant) [72].

3.2. ANSYS Fluent

La résolution des équations de transport avec changement de phase nécessite très souvent l'utilisation des solveurs numériques très puissants. Le solveur ANSYS Fluent est un logiciel commercial contenant de larges capacités de modélisation physique. Il permet la prédiction des écoulements des fluides par la résolution des équations de transports par la technique de discrétisation **MVF (la méthode des volumes finis)**. IL permet de simuler les écoulements des fluides (incompressible et compressible) impliquant des phénomènes physiques complexes tels que le flux monophasique et multiphasique, le transfert thermique sans et avec changement de phase, la turbulence, les réactions chimiques... etc.

3.2.1. Méthode des volumes finis (MVF)

La méthode des volumes finis [73, 74] est une technique de discrétisation où la formulation intégrale des lois de conservation est discrétisée directement dans l'espace physique. Le domaine est divisé en volumes ou cellules qui stockent la valeur moyenne des variables de fluide. C'est la méthode la plus répandue aujourd'hui dans le domaine CFD (Computational Fluid Dynamics). Elle est conservative, donc parfaitement adaptée à la résolution des lois de conservation. En général, les méthodes de discrétisation sont basées sur deux tâches principales :

- la discrétisation du domaine de calcul (physique) : transformation en domaine géométrique numérique
- la discrétisation des équations qui gouvernent le problème physique : les équations continues sont transformées en systèmes d'équations discrètes en gardant la cohérence avec les équations originales et en imitant, autant que possible, le phénomène physique.

3.2.1.1. Subdivision du domaine d'étude (maillage)

Le maillage est la subdivision du domaine d'étude en grilles longitudinales et transversales dont l'intersection représente un nœud. Un volume de contrôle est défini autour de chaque nœud et les grandeurs scalaires (pression et température) sont stockées dans le nœud P du maillage (Fig.3.4). Les composantes de la vitesse (u , v et w) sont stockées aux milieux des segments reliant les nœuds (maillages décalés). L'équation générale du transport est intégrée sur le volume de contrôle associé aux variables scalaires et les équations de la quantité de mouvement sont intégrées sur le volume de contrôle associé aux composantes de la vitesse.

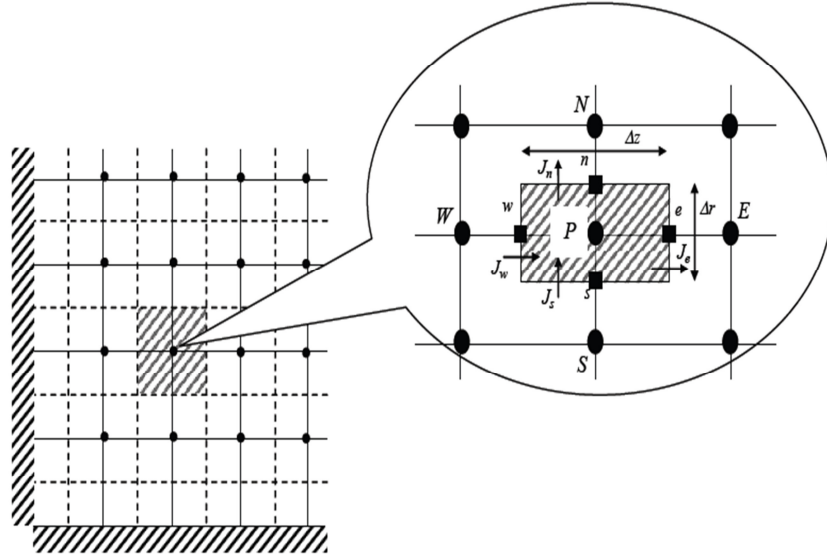


Figure. 3.4. Maillage et volume de contrôle.

3.2.1.2. L'équation de transport

Ensemble, les équations de Navier Stokes, l'équation de la chaleur et l'équation de continuité, forment l'équation de transport générale :

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi)}_I + \underbrace{div(\rho U\phi)}_II = \underbrace{div(\Gamma_\phi grad\phi)}_III + \underbrace{S_\phi}_IV \quad (3.13)$$

Où ϕ désigne la variable scalaire ou vectorielle, Γ la diffusivité de la variable (tel que la viscosité μ ou la conductivité λ) et S_ϕ est un terme source.

I : Terme transitoire,

II : Terme convectif,

III : Terme diffusif,

IV : Terme source.

Pour chaque variable, ϕ , l'équation de transport s'écrit dans le cas stationnaire, tridimensionnel :

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u\phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v\phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w\phi) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\phi \frac{\partial\phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_\phi \frac{\partial\phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma_\phi \frac{\partial\phi}{\partial z}\right) + S_\phi \quad (3.14)$$

L'équation (3.14) peut être écrite sous la forme :

$$\frac{\partial}{\partial x}(j_x) + \frac{\partial}{\partial y}(j_y) + \frac{\partial}{\partial z}(j_z) = S_\phi \quad (3.15)$$

Avec :

$$\begin{cases} j_x = \rho u \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \\ j_y = \rho v \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \\ j_z = \rho w \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z} \end{cases} \quad (3.16)$$

Où j_x , j_y et j_z sont les flux globaux (convection et diffusion) par unité de surface dans les directions x , y et z . La discrétisation consiste à transformer l'équation différentielle de transport en un système d'équation algébrique. L'équation (3.15) est d'abord intégrée sur le volume de contrôle :

$$\int_b^t \int_s^n \int_w^e \left(\frac{\partial j_x}{\partial x} + \frac{\partial j_y}{\partial y} + \frac{\partial j_z}{\partial z} \right) dx dy dz = \int_b^t \int_s^n \int_w^e S_\phi dx dy dz \quad (3.17)$$

Les indices (e , w , n , s , t et b) indiquent respectivement (est, ouest, nord, sud, haut et bas) du volume de contrôle. Les flux globaux (convection et diffusion) intégrés sur les faces du volume de contrôle sont donnés par les expressions suivantes :

$$\begin{aligned} J_e &= \int_b^t \int_s^n \left(\rho u \phi - \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e dy dz & J_w &= \int_b^t \int_s^n \left(\rho u \phi - \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w dy dz \\ J_n &= \int_b^t \int_w^e \left(\rho v \phi - \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n dx dz & J_s &= \int_b^t \int_w^e \left(\rho v \phi - \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s dx dz \\ J_t &= \int_s^n \int_w^e \left(\rho w \phi - \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_t dx dy & J_b &= \int_s^n \int_w^e \left(\rho w \phi - \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_b dx dy \end{aligned} \quad (3.18)$$

Pour pouvoir approximer l'équation sous forme algébrique, on considère les hypothèses suivantes :

- La variable généralisée ϕ varie linéairement entre les nœuds principaux dans les trois directions ;
- Les termes convectifs et diffusifs sont uniformes à travers les faces correspondantes ;
- Le terme source est uniforme sur le volume de contrôle.

L'intégration du terme convectif et diffusif de l'équation (3.17) sur tout le volume de contrôle donne :

$$\begin{aligned}
 j_e &= (j_x)_e \Delta y \Delta z & j_w &= (j_x)_w \Delta y \Delta z \\
 j_n &= (j_y)_n \Delta x \Delta z & j_s &= (j_y)_s \Delta x \Delta z \\
 j_t &= (j_z)_t \Delta x \Delta y & j_b &= (j_z)_b \Delta x \Delta y
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

Où :

$$\begin{aligned}
 J_e &= \left[(\rho u)_e \phi_e - \frac{\Gamma_{\phi,e}}{\Delta x_{EP}} (\phi_E - \phi_P) \right] \Delta y \Delta z \\
 J_w &= \left[(\rho u)_w \phi_w - \frac{\Gamma_{\phi,w}}{\Delta x_{PW}} (\phi_P - \phi_W) \right] \Delta y \Delta z \\
 J_n &= \left[(\rho v)_n \phi_n - \frac{\Gamma_{\phi,n}}{\Delta y_{NP}} (\phi_N - \phi_P) \right] \Delta x \Delta z \\
 J_s &= \left[(\rho v)_s \phi_s - \frac{\Gamma_{\phi,s}}{\Delta y_{PS}} (\phi_P - \phi_S) \right] \Delta x \Delta z \\
 J_t &= \left[(\rho w)_t \phi_t - \frac{\Gamma_{\phi,t}}{\Delta z_{TP}} (\phi_T - \phi_P) \right] \Delta x \Delta y \\
 J_b &= \left[(\rho w)_b \phi_b - \frac{\Gamma_{\phi,b}}{\Delta z_{PB}} (\phi_P - \phi_B) \right] \Delta x \Delta y
 \end{aligned} \tag{3.20}$$

L'intégration du terme source de l'équation (3.17) sur tout le volume de contrôle donne :

$$\int_b^t \int_s^n \int_w^e S_\phi dx dy dz = (S_c + S_p \phi_P) \Delta x \Delta y \Delta z \tag{3.21}$$

Où S_c est la partie constante de S_ϕ et S_p le coefficient de ϕ_P . Donc, l'équation (3.17) devient :

$$j_e + j_w + j_n + j_s + j_t + j_b = (S_c + S_p \phi_P) \Delta x \Delta y \Delta z \tag{3.22}$$

Les quantités J_i ($i : e, w, n, s, t$ et b) sont des flux globaux (convection est diffusion) intégrés sur les faces de volume de contrôle.

L'équation discrétisée complète peut alors s'écrire sous la forme :

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_T \phi_T + a_B \phi_B + S_u \tag{3.23}$$

L'équation (3.23) peut être arrangée comme suit :

$$a_P \phi_P = \sum a_{nb} \phi_{nb} + S_u \quad (3.245)$$

a_{nb} et a_P sont les coefficients liés aux schémas de discrétisation utilisés pour un volume de contrôle considéré, et les volumes de contrôle qui l'entoure. S_u membre dépendant du terme source de chaque volume de contrôle considéré.

3.2.2. Couplage pression-vitesse

La nécessité de l'utilisation d'un algorithme de couplage pression-vitesse revient au fait qu'il n'existe pas d'équation donnant directement le champ de pression. La méthode SIMPLE de Patankar et Spalding (1972) est la plus simple et la plus utilisée. Une estimation initiale du champ de pression P^* est injectée dans les équations de quantité de mouvement dont leur résolution donne un champ de vitesse intermédiaire U^* . L'équation de continuité est transformée en équation de correction dont la résolution fournit une correction de pression. La nouvelle pression est réinjectée dans les équations de quantité de mouvement. La procédure se répète autant de fois que nécessaire jusqu'à l'obtention d'une correction de pression nulle, signe de la convergence de l'algorithme [75].

3.2.3. Sous relaxation et Convergence des calculs

A cause de la non linéarités des équations obtenues et afin d'éviter la divergence du processus itératif. Il est nécessaire de contrôler le changement de la variable ϕ par une sous relaxation qui réduit le changement de ϕ produit durant chaque itération. La nouvelle valeur est donnée comme suit :

$$\phi = \phi_{old} + \alpha \Delta\phi \quad (3.26)$$

Où ϕ_{old} désigne l'ancienne valeur et α le facteur de sous relaxation.

La convergence est quantifiée par l'intermédiaire des résidus normalisés R_ϕ de chaque grandeur ϕ définis comme la somme des erreurs sur le bilan de ϕ . Ils permettent de suivre la convergence des calculs durant les itérations. Ce résidu est défini par :

$$R_\phi = \frac{\sum |\sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + S_c - a_P \phi_P|}{F_{in,\phi}} \quad (3.27)$$

$F_{in,\phi}$ est le flux total à l'entrée de la variable ϕ .

Chapitre 04
Simulation numérique du refroidissement des
modules PV avec MCP et ailettes

L'utilisation des MCP pour le refroidissement des modules PV peut réduire l'augmentation rapide de leur température pendant la journée de fort rayonnement et d'assurer une température de fonctionnement optimale pendant les heures de pointe. Cette technique permet d'améliorer l'efficacité des cellules solaires et leur production en énergie électrique.

Le présent chapitre porte sur l'étude tridimensionnelle du refroidissement d'un capteur solaire photovoltaïque à l'aide d'un matériau à changement de phase (MCP). L'étude consiste à voir l'influence de la température sur le comportement électrique du module PV avec et sans MCP. Des ailettes rectangulaires lisse sont intégrées dans le système de refroidissement afin d'accélérer le processus de changement de phase du MCP. L'effet du nombre d'ailettes utilisées sur le comportement thermique est analysé.

4.1. Positionnement du problème :

4.1.1. Modèle physique

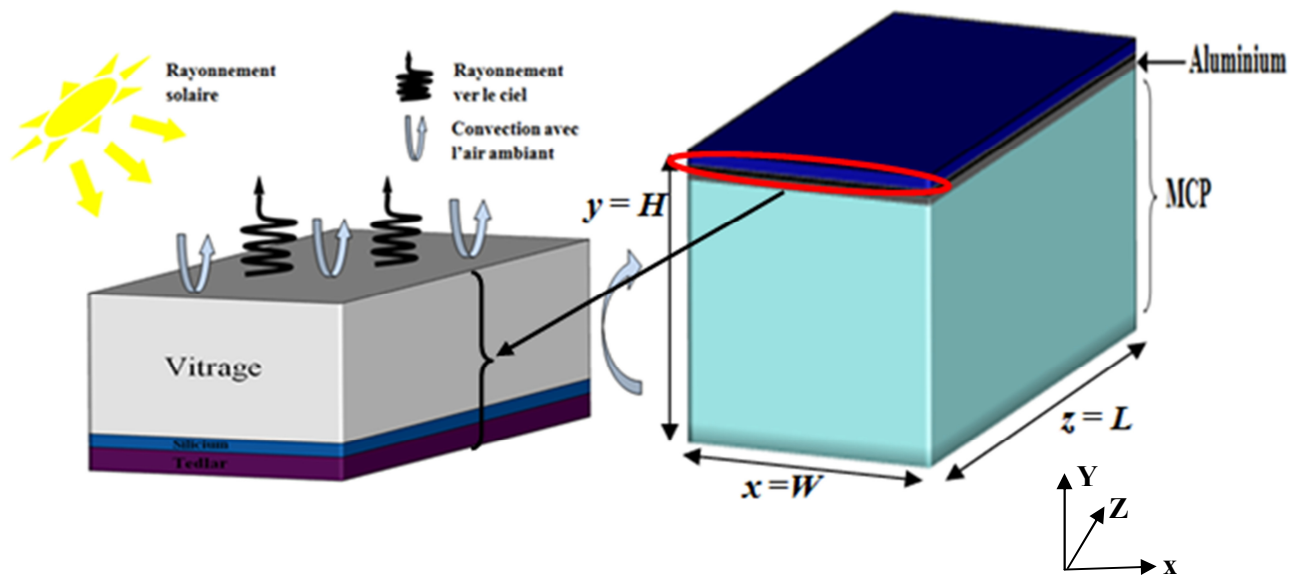
Le capteur solaire photovoltaïque étudié se compose d'un vitrage, d'une plaque en silicium poly-cristallin collée sur une couche mince en tedlar. Le capteur est collé sur un conteneur en aluminium remplie en MCP de type RT31. La figure 4.1 indique les 3 différents cas étudiés dans cette partie :

- Cas A : capteur PV sans refroidissement
- Cas B : capteur PV avec MCP collé au-dessous de la cellule PV
- Cas C : capteur PV avec MCP et ailettes rectangulaires collés au-dessous de la cellule PV

La largeur et la longueur du capteur sont 0,6 m et 1,2 m, respectivement. Les épaisseurs du vitrage, du silicium, du tedlar, de l'aluminium, des ailettes et du MCP sont 3, 0.3, 0.5, 1, 1 et 500 mm, respectivement. Les propriétés thermo-physiques utilisées dans la simulation numérique sont données dans le tableau 4.1.

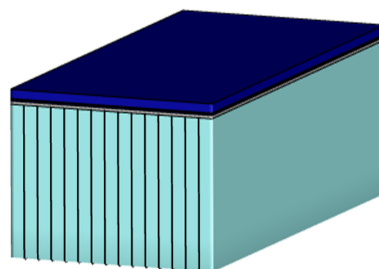
Tableau.4.1. Propriétés thermo-physiques des matériaux utilisés.

Paramètres	MCP (RT 31)	Panneau PV [76]			Aluminium
		Vitrage	Silicium	Tedlar	
ρ (Kg/m ³)	820	2530	2300	1550	2719
λ (W/mK)	0.2	1	0.036	0.033	202.4
c_p (KJ/Kg.K)	2000	720	650	1760	871
μ (Kg/ms)	0.234	/	/	/	/
L (J/Kg)	170000	/	/	/	/
T_s (K)	300	/	/	/	/
T_i (K)	304	/	/	/	/
e (m)	0.05	0.003	0.0003	0.0005	0.001



Cas A (sans MCP et sans ailettes)

Cas B (avec MCP et sans ailettes)



Cas C (avec MCP et avec ailettes)

Fig. 4.1. Modèle physique étudié.

4.1.2. Modèle mathématique :

Pour la modélisation mathématique du système PV-MCP étudié, nous adoptons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Le domaine d'analyse est tridimensionnel.
- Le changement de masse volumique du fluide avec la température répond à l'hypothèse de Boussinesq.
- Le MCP dans la phase liquide est considéré comme un fluide incompressible, Newtonien dont l'écoulement est laminaire.
- Le MCP est homogène et isotrope.

Sur la base de ces hypothèses, le système d'équations qui régit les phénomènes dynamique et thermique dans notre système est le suivant :

MCP :

Les MCP sont gouvernés par l'équation de continuité, l'équation du mouvement modifiée dans les directions x , y et z et l'équation d'énergie.

- Continuité :

$$\frac{\partial u_p}{\partial x} + \frac{\partial v_p}{\partial y} + \frac{\partial w_p}{\partial z} = 0 \quad (4.1)$$

- Equation du mouvement modifiée suivant la direction x :

$$\rho_p \left(\frac{\partial u_p}{\partial t} + u_p \frac{\partial u_p}{\partial x} + v_p \frac{\partial u_p}{\partial y} + w_p \frac{\partial u_p}{\partial z} \right) = \mu_p \left(\frac{\partial^2 u_p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_p}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_x \quad (4.2)$$

- Equation du mouvement modifiée suivant la direction y :

$$\rho_p \left(\frac{\partial v_p}{\partial t} + u_p \frac{\partial v_p}{\partial x} + v_p \frac{\partial v_p}{\partial y} + w_p \frac{\partial v_p}{\partial z} \right) = \mu_p \left(\frac{\partial^2 v_p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_p}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho_p g \beta_p (T - T_{ref}) + S_y \quad (4.3)$$

- Equation du mouvement modifiée suivant la direction z :

$$\rho_p \left(\frac{\partial w_p}{\partial t} + u_p \frac{\partial w_p}{\partial x} + v_p \frac{\partial w_p}{\partial y} + w_p \frac{\partial w_p}{\partial z} \right) = \mu_p \left(\frac{\partial^2 w_p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_p}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_z \quad (4.4)$$

Avec : S_x , S_y et S_z représentent les termes sources utilisés pour modifier les équations de la quantité de mouvement dans la région pâteuse considérée comme un milieu poreux.

D'après la loi de Darcy [77] on a :

$$S_x = P_{or} u, S_y = P_{or} v \text{ et } S_z = P_{or} w \quad (4.5)$$

Avec P_{or} la porosité du milieu exprimée par

$$P_{or} = C \frac{(1-f_l)^2}{f_l^3 + D} \quad (4.6)$$

D est un petit nombre utilisé pour éviter la division par zéro. f représente la fraction massique

$$f_l = \begin{cases} 1 & \text{si } T > T_l \\ \frac{T-T_s}{T_l-T_s} & \text{si } T_s < T < T_l \\ 0 & \text{si } T < T_s \end{cases} \quad (4.7)$$

- Equation d'énergie modifiée :

Liquide :

$$\rho_p C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda_p \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + S_T \quad (4.8)$$

Avec

$$S_T = \rho L_s \left(\frac{\partial f_l}{\partial t} + u \frac{\partial f_l}{\partial x} + v \frac{\partial f_l}{\partial y} + w \frac{\partial f_l}{\partial z} \right) \quad (4.9)$$

Solide :

$$\rho_s C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = \lambda_s \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (4.10)$$

Avec $(u_p, v_p \text{ et } w_p)$ sont les composants de la vitesse du MCP liquide, ρ_p est la densité du MCP, μ_p sa viscosité dynamique, β_p son coefficient de dilatation thermique, C_p sa capacité calorifique et λ_p sa conductivité thermique moyenne. L'indice p définit les caractéristiques du MCP à l'état liquide et l'indice s à l'état solide.

L'efficacité électrique est calculée selon l'équation suivante [78] :

$$\eta_c = 0.125 (1 - 0.004(T_{cell} - 293)) \quad (4.11)$$

4.1.3. Conditions initiales et aux limites :

- Au début ($t = 0$), l'ensemble du domaine est maintenu à la température ambiante (297 K). Le MCP est en phase solide (les composantes de la vitesse suivant x , y et z sont nulles).

$$u = v = w = 0 \quad (4.12)$$

- La face supérieure du capteur : $0 \leq x \leq W, y = H$ et $0 \leq z \leq L$

Elle est exposée à un rayonnement solaire avec des pertes thermiques convectif avec l'ambiance et radiatif avec le ciel.

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = G - h_a(T_v - T_{amb}) - \sigma \varepsilon_v(T_v^4 - T_{ciel}^4) \quad (4.13)$$

- Le coefficient de convection avec l'extérieur est calculé selon Mac Adams par la corrélation suivante [79]

$$h_a = 5.7 + 3.8V_{vent} \quad (4.14)$$

G est le rayonnement solaire, T_v température du vitrage, T_{amb} température ambiante, ε_v émissivité du vitrage, T_{ciel} température du ciel et v_{vent} vitesse du vent.

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

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h_a(T_v - T_{amb}) \quad (4.15)$$

- Les quatre extrémités latérales du capteur thermique (partie MCP) sont supposées adiabatiques.

$$\frac{dT}{dn} = 0 \quad (4.16)$$

- Les évolutions du rayonnement solaire, de la température ambiante et de la température de ciel sont présentées dans la Fig. 4. 2. et approximé par les équations 4. 17, 4. 18 et 4. 19, respectivement. Ces modèles mathématiques ont été proposés par **W. Chen [80]**.

$$G = 1000 \sin\left(\pi \frac{t/3600}{12}\right) \quad (4.17)$$

$$T_{amb} = 298 + 5 \cos\left(0.2616 \left(\frac{t}{3600} - 7\right)\right) \quad (4.18)$$

$$T_{ciel} = 0.0552 \left[25 + 5 \cos\left(\frac{\pi}{12} \left(\frac{t}{3600} - 7\right)\right)\right]^{1.5} + 273 \quad (4.19)$$

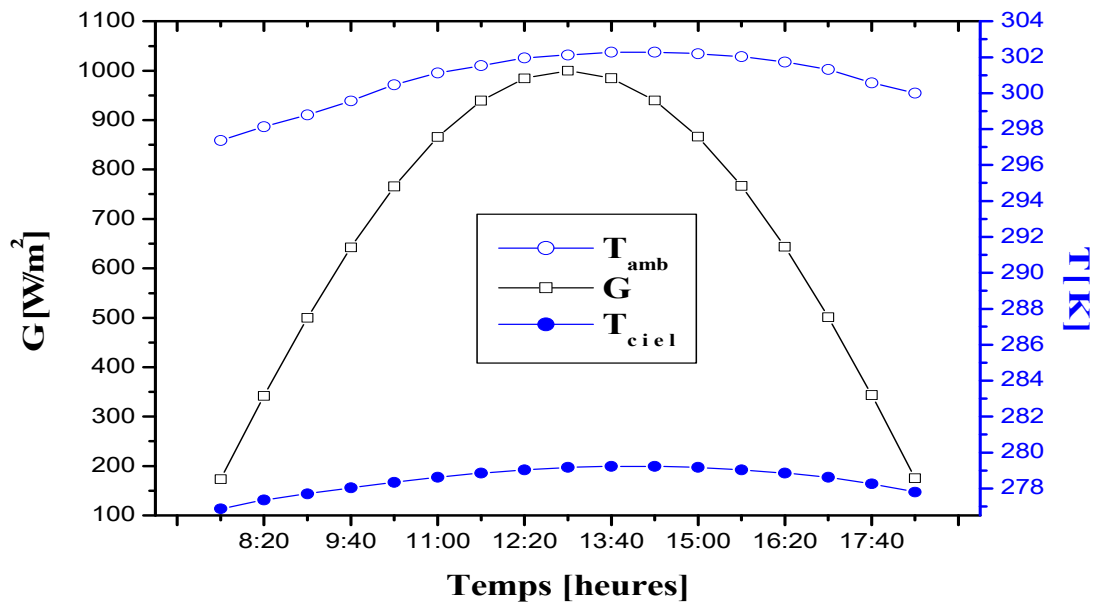


Fig. 4.2. Evolution du rayonnement solaire, la température ambiante et la température de ciel pendant la journée.

4.1.4. Procédure numérique :

Le code commercial ANSYS-FLUENT est utilisé pour résoudre numériquement le système d'équations mathématiques régissant le comportement physique du système PV-MCP étudié. La méthode enthalpique de porosité (*Porosity enthalpic method*) est adoptée pour la modélisation du processus de changement de phase. Cependant, le schéma décentré amont du second ordre (*second-order upwind*) a été utilisé pour résoudre les équations de mouvement et de l'énergie, tandis que le schéma (PRESTO) a été adopté pour l'équation de correction de pression. Les facteurs de sous-relaxation du calcul itératif pour les composantes de la vitesse, pression, température et fraction liquide sont fixés à 0.7, 0.3, 0.95 et 0.9, respectivement. Les critères de convergence (erreurs relatives) sont fixés à 10^{-6} pour l'équation de continuité et de mouvement, et à 10^{-9} pour l'équation d'énergie thermique.

4.1.5. Test de maillage

Quatre tailles de maillage ont été testées pour les différentes configurations étudiées (avec MCP seul et avec MCP et ailettes) en utilisant des éléments hexaédriques. L'évolution instationnaire de la température du silicium est prise comme outil pour valider le test d'indépendance de la taille de maillage finalement choisis, figure 4.3. Les maillages adoptés sont dressés dans le tableau 4.2.

Le pas de temps utilisé dans le processus itératif a été testé aussi en utilisant l'évolution instationnaire de la température de la cellule, figure 4.4. Le pas de temps adopté est de 0,5 seconde dans les différentes configurations.

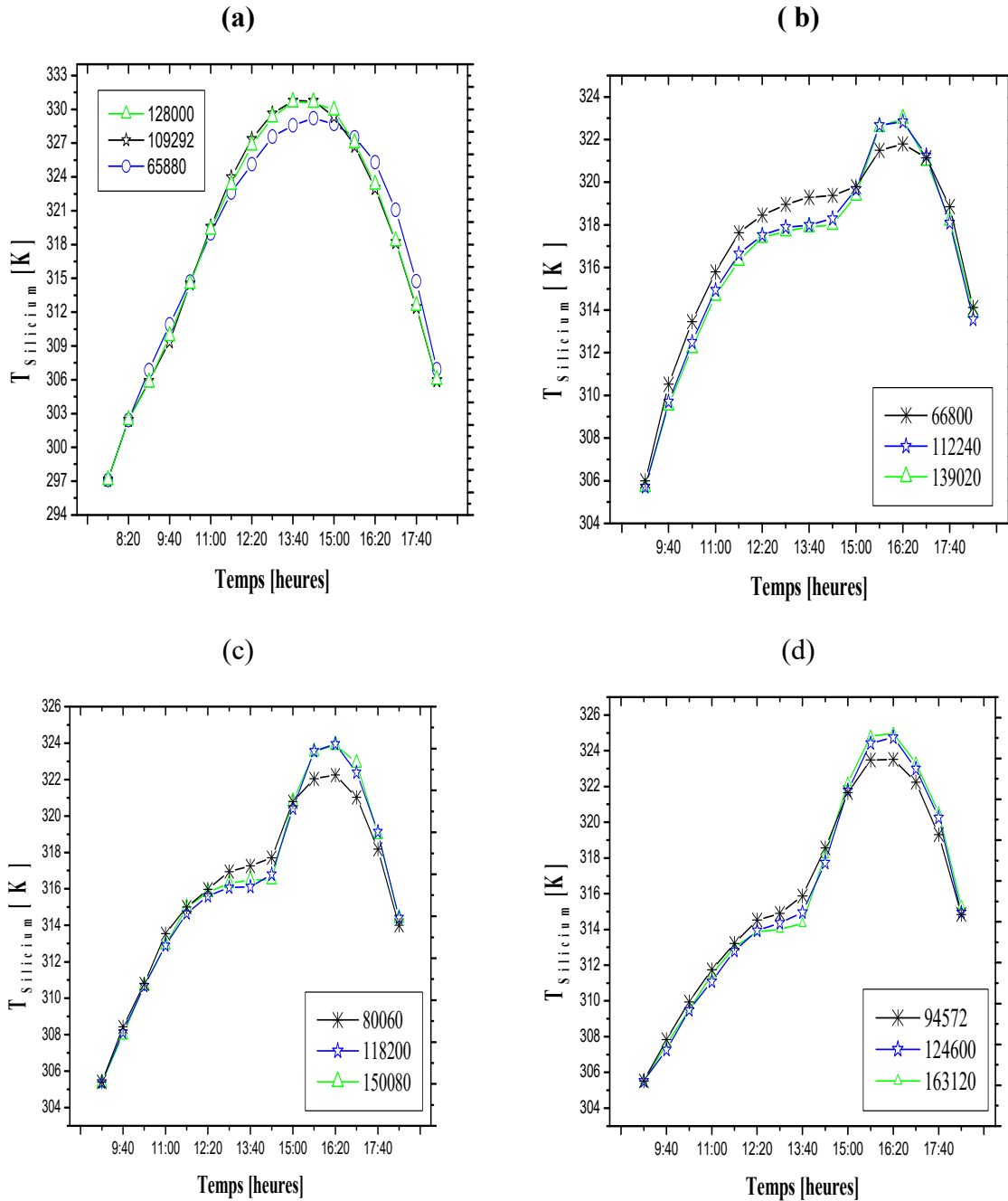


Fig. 4.3. Evolution instationnaire de la température de silicium (a) avec MCP seul, (b) avec MCP et 7 ailettes, (c) avec MCP et 11 ailettes, (d) avec MCP et 14 ailettes.

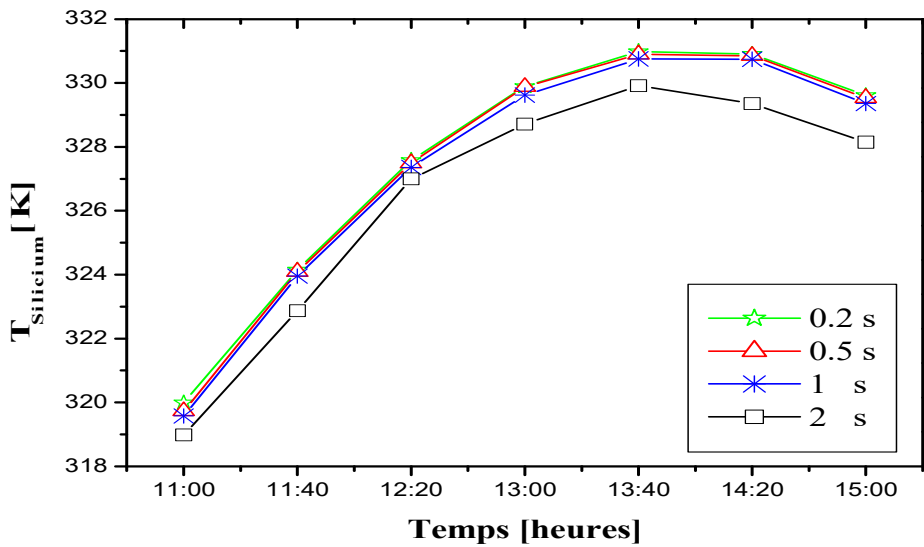


Fig. 4.4. L'indépendance de pas du temps basé sur l'évolution de la température de la cellule solaire pendant la journée.

Tableau 4.2. Maillages adoptés.

Maillage adopté	Configuration
109292 cellules	avec MCP seul
112240 cellules	avec MCP et 7 ailettes
118200 cellules	avec MCP et 11 ailettes
124600 cellules	avec MCP et 14 ailettes

4.1.6. Validation du phénomène de changement de phase

La validation de notre simulation a été effectuée en comparant les résultats avec le travail expérimental et numérique de Pascal Henry Biwole [81]. Il s'agit d'une cavité ($167 \times 30 \text{ mm}^2$) en plexiglas remplie d'un MCP dont les propriétés thermo-physiques sont données dans le tableau 4.3. Une température fixe a été imposée à un côté du réservoir en utilisant des plaques chauffantes. Des températures fixes de 40 et 20 °C ont été imposées respectivement sur les côtés gauche et droite de la cavité. L'évolution instationnaire du front de fusion a été obtenue numériquement et expérimentalement.

Tableau 4.3. Propriétés thermo-physiques du MCP utilisées pour la validation [79].

Paramètres	MCP de validation
$\rho_{liquide} = \rho_{solide}$	890 kg/m ³
$Cp_{liquide} = Cp_{solide}$	2110 J/kg K
L_f	181 kJ/kg
μ	1.1 10 ⁻⁵ m ² /s
β	3.09 10 ⁻³ 1/K
λ	0.182 W/m.K
g	9.81 m/s ²
T_f	298.15 K

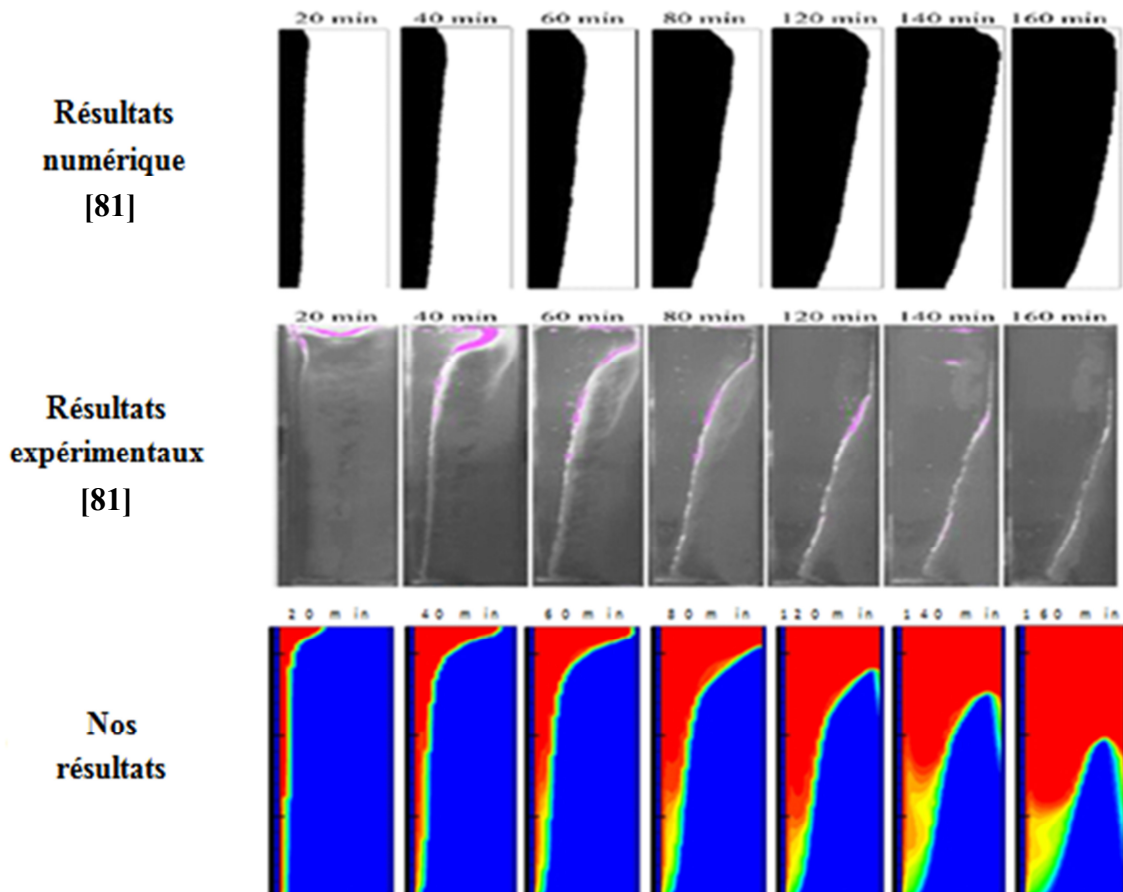


Fig. 4.5. Comparaison transitoire de la fraction liquide.

La fig.4.5 illustre la comparaison entre les évolutions instationnaires de la fraction liquide obtenues par notre simulation et ceux tirées de la littérature [81]. La comparaison montre clairement le bon accord des résultats obtenus. Le modèle numérique adopté dans la

présente simulation introduit de manière très satisfaisante l'effet de la convection naturelle développée durant la croissance de la phase liquide du MCP.

4.2. Résultats et discussions

4.2.1. L'influence du MCP

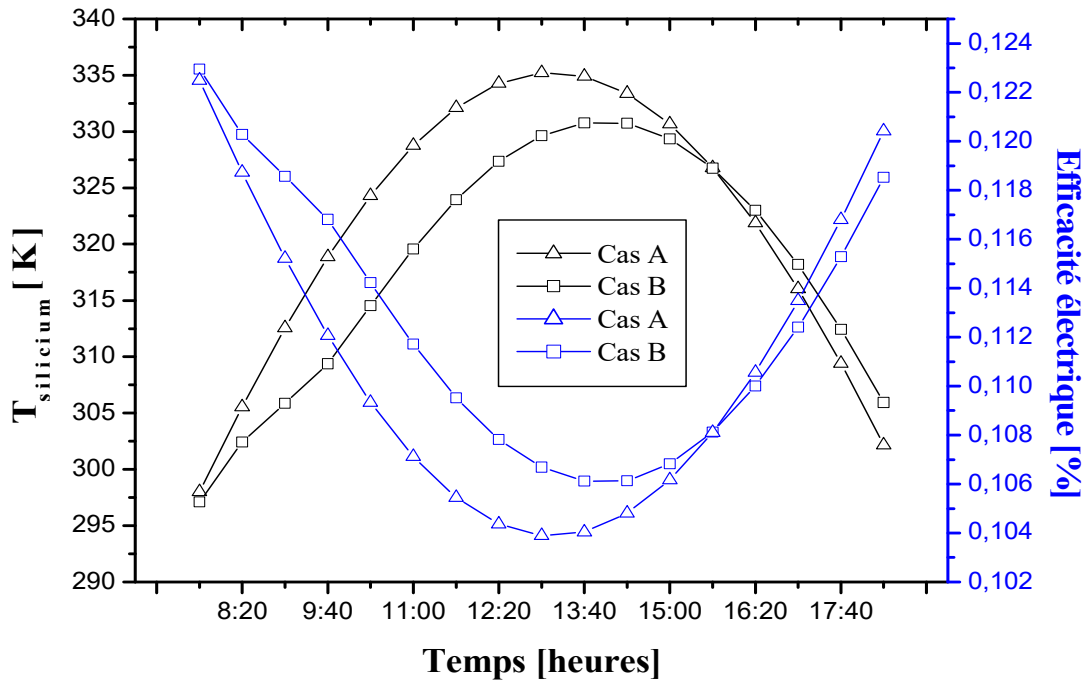


Fig. 4.6. La variation de la température de silicium et l'efficacité électrique pour le cas A et B pendant la journée.

La figure 4.6 montre l'évolution instationnaire de la température de la cellule au niveau de la couche en silicium et celle de l'efficacité électrique durant la journée pour le cas A (sans MCP) et B (avec MCP). Il est remarqué que les températures augmentent avec l'augmentation du rayonnement jusqu'à atteindre les valeurs maximales de 335.2 et 329.6 K autour de 13h et 13h40 dans le cas A et B, respectivement. Ensuite, les températures diminuent progressivement avec la diminution du rayonnement jusqu'à la fin de journée. Cependant, la température de silicium dans le cas B est inférieure à celle dans le cas A jusqu'au moment de 15h40. Cette baisse de température est justifiée par le stockage thermique au niveau du MCP. Après 15h40, la température de silicium dans le cas B dépasse celle dans le cas A grâce à la libération de la chaleur stockée par le MCP.

La figure 4.6 montre aussi que les efficacités électriques diminuent avec l'augmentation des températures des cellules PV jusqu'à 0,1038 et 0.1062 % autour de 13h40 et 13h dans le cas A et B, respectivement. Ainsi, la présence du MCP au début jusqu'à 15h conduit à une réduction de la température d'environ 6°C et une augmentation de l'efficacité électrique d'environ 0.25 %. Ensuite, les efficacités électriques augmentent progressivement avec la diminution du rayonnement jusqu'à la fin de journée. Après 15h40, l'efficacité électrique de silicium dans le cas A dépasse celle dans le cas B grâce à la diminution rapide de sa température.

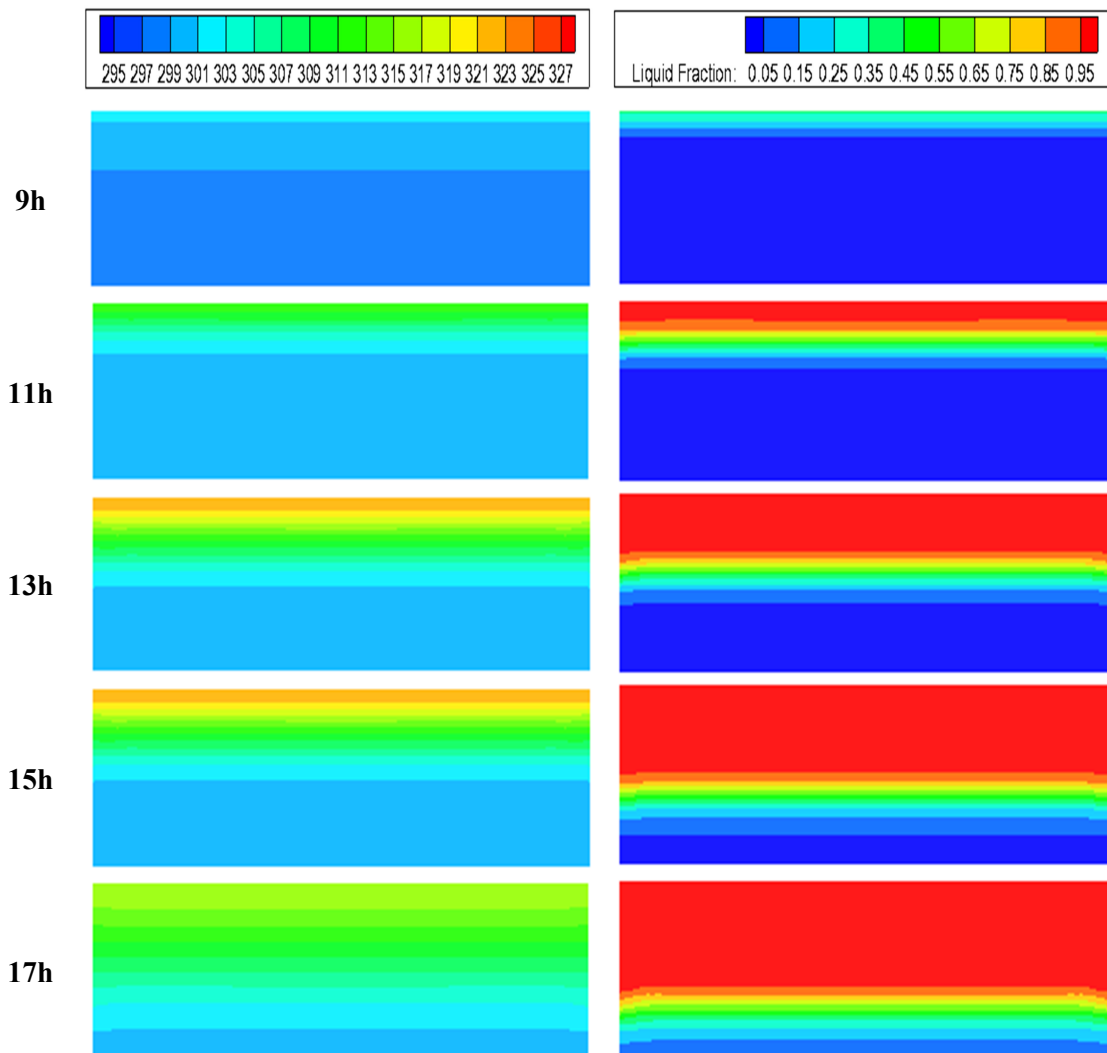


Fig. 4.7. L'évolution des isothermes et la fraction liquide (plan axial du capteur $z = 0.6$ m) du MCP pendant la journée.

La figure 4.7 représente les évolutions des isothermes et de la fraction liquide pendant la journée pour le cas B. Pour la fraction liquide, le fond bleu indique la région solide ($f_l = 0$), le fond rouge la région liquide ($f_l = 1$) et les différentes couleurs la région pâteuse ($0 < f_l < 1$). A 9h, il est remarqué que la température du MCP au voisinage du module PV atteint 303 K. Cette température qui se situe dans la plage de changement de phase [300-304] justifie l'apparition d'un film liquide dans la partie supérieure du MCP. A 11h, la température du MCP dans la partie supérieure augmente et atteint entre 307 et 317 K, la fusion du MCP atteint 23 %. A 13h, le MCP atteint une température maximale autour de 323 K avec une fraction liquide de 45 %. A 15h on remarque que l'évolution de la température est similaire à la période précédente et la fraction liquide atteint 64 %. A 17h, la température du MCP dans la partie supérieure a déjà diminué avec la diminution de rayonnement pour atteindre 317 K avec une fraction liquide de 76 %.

En outre, l'évolution des isothermes de manière stratifiée montre que le transfert de chaleur est toujours dominé par la conduction. Ce comportement est causé par la faible épaisseur du MCP. Les résultats montrent aussi que le MCP n'atteint pas la fusion totale. Cela, nous encourage à coller des ailettes sous les cellules PV et les intégrer dans le MCP.

4.2.2. Effet des ailettes

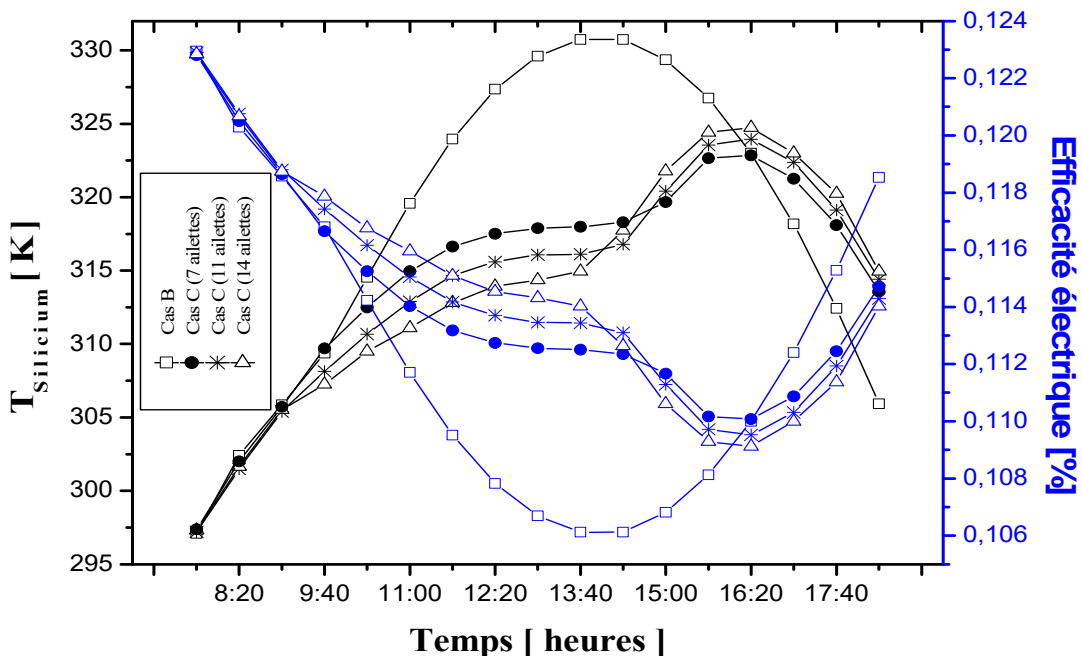


Fig. 4.8. Evolution de la température de silicium et l'efficacité électrique pour le cas B sans et avec différents nombres d'ailettes pendant la journée.

Afin d'accélérer la fusion du MCP, nous proposons de coller des ailettes sous la cellule PV et de les immerger dans le MCP, cas C. Dans cette partie, nous étudions l'effet du nombre des ailettes utilisées (7, 11 et 14) sur le refroidissement de ces cellules. La figure 4.8 montre la variation de la température du silicium et de l'efficacité électrique pendant la journée dans les cas B et C. La présence des ailettes provoque une augmentation moins rapide de la température des cellules entraînant une baisse moins importante de l'efficacité électrique avec l'augmentation de rayonnement. En effet, l'utilisation des ailettes accélère l'échauffement et la fusion du MCP provoquant un échauffement moins rapide des cellules PV. Ensuite, une augmentation rapide de la température des cellules PV est enregistrée à 15h, 14h20 et 13h40 respectivement dans le cas de 7, 11 et 14 ailettes indiquant probablement le moment de la fusion de la majorité du MCP. A 16h20, la température du silicium commence à diminuer avec la diminution de rayonnement dans le cas de MCP avec ailettes. En outre, la température de la cellule dans le cas avec ailettes est assez inférieure par rapport à celle sans ailettes jusqu'à 15h40 qui conduit à des efficacités supérieures. Ainsi, la présence des ailettes au 11h jusqu'à 15h (la période de fort ensoleillement) provoque une réduction de la température d'environ 15°C et une augmentation de l'efficacité électrique d'environ 0.6 %. Après 16h20, la température de la cellule PV avec ailettes devient supérieure à celle sans ailette grâce à l'amélioration de la chaleur stockée par le MCP avec ailettes. Et en remarque aussi que le nombre des ailettes améliore encore plus ce refroidissement avant la fusion totale du MCP.

La figure 4.9 et 4.10 montrent respectivement les contours de la température et de la fraction liquide pendant la journée. Le fond bleu indique la région solide ($f_l = 0$), le fond rouge la région liquide ($f_l = 1$) et les différentes couleurs la région pâteuse ($0 < f_l < 1$). A 9h, la température du MCP atteint entre 301 et 303 K dans la partie supérieure (au voisinage du module PV) dans le cas de MCP avec 7 ailettes. Elle est dans la plage de température de changement de phase indiquant le début de fusion. La température maximale atteint 301 K dans le MCP avec 11 ailettes, un faible début de fusion est observé. La température maximale atteint 299 K dans le MCP avec 14 ailettes, le MCP reste totalement solide. Ce phénomène est dû à l'augmentation de la masse d'aluminium qui véhicule la chaleur au MCP avec l'augmentation du nombre des ailettes.

A 11h, la température du MCP avec 7 ailettes augmente dans la partie supérieure autour de 304 K et la fraction liquide atteint 14 %. Par contre, la température augmente autour de 304 K dans la totalité du MCP dans les deux cas (11 et 14 ailettes) grâce à l'augmentation de la surface d'échange et la fraction liquide atteint respectivement 19 et 25 %. Entre 13h et

17h, la température du MCP augmente avec l'augmentation de nombre des ailettes jusqu'à atteindre des valeurs maximales autour de 318, 319 et 320 K dans les cas 7, 11 et 14 ailettes, respectivement. A 15h, la fraction liquide dans le MCP montre qu'il est totalement fondu dans le cas avec 14 ailettes. Cependant, la fusion atteint respectivement 97 et 76 % pour les cas avec 11 et 7 ailettes. A 17h, le MCP avec 11 ailettes atteint la fusion totale alors qu'avec 7 ailettes la fusion atteint 98.5 %.

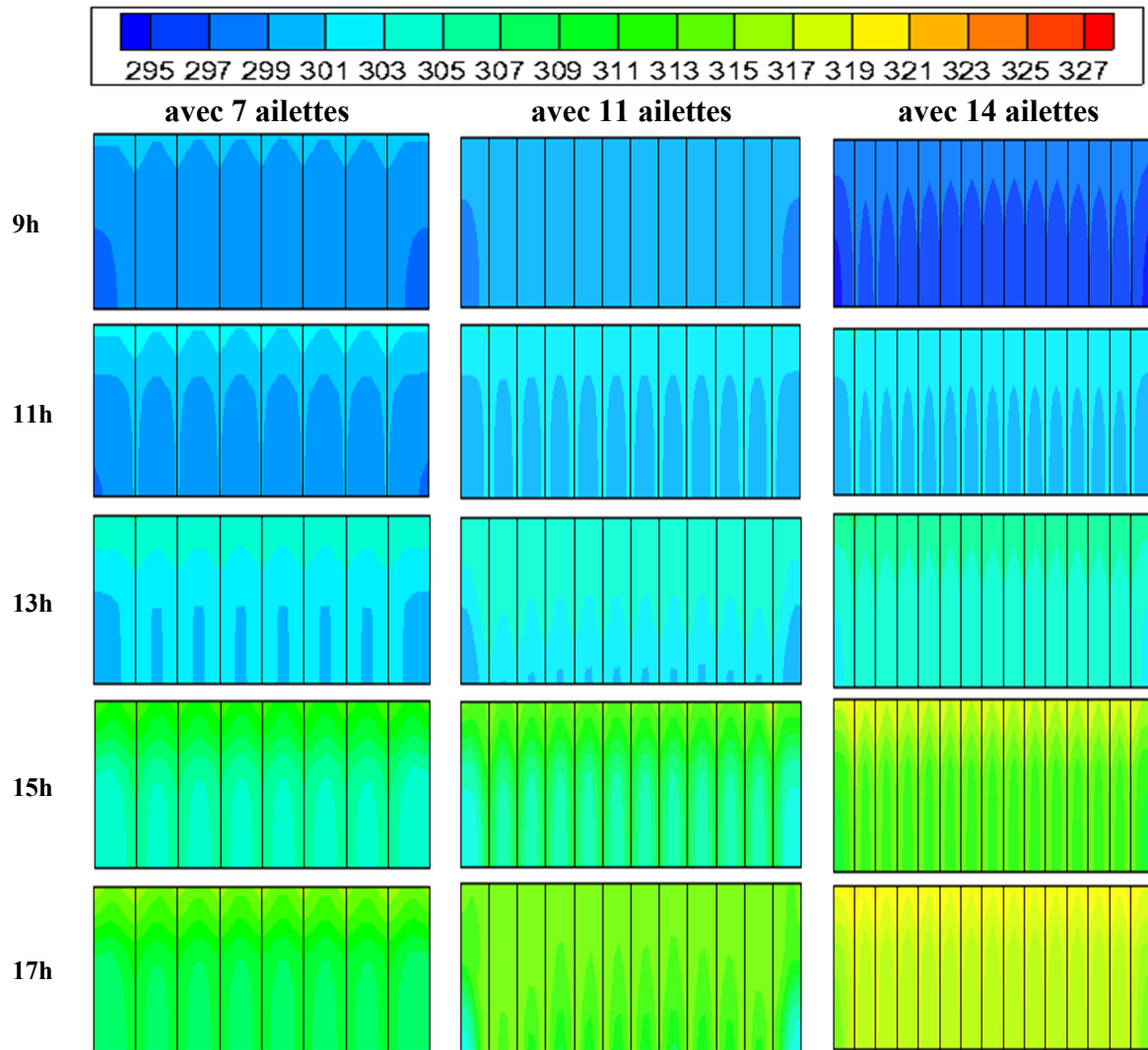


Fig. 4.9. L'évolution instationnaire des isothermes du MCP pour différents nombres d'ailettes.

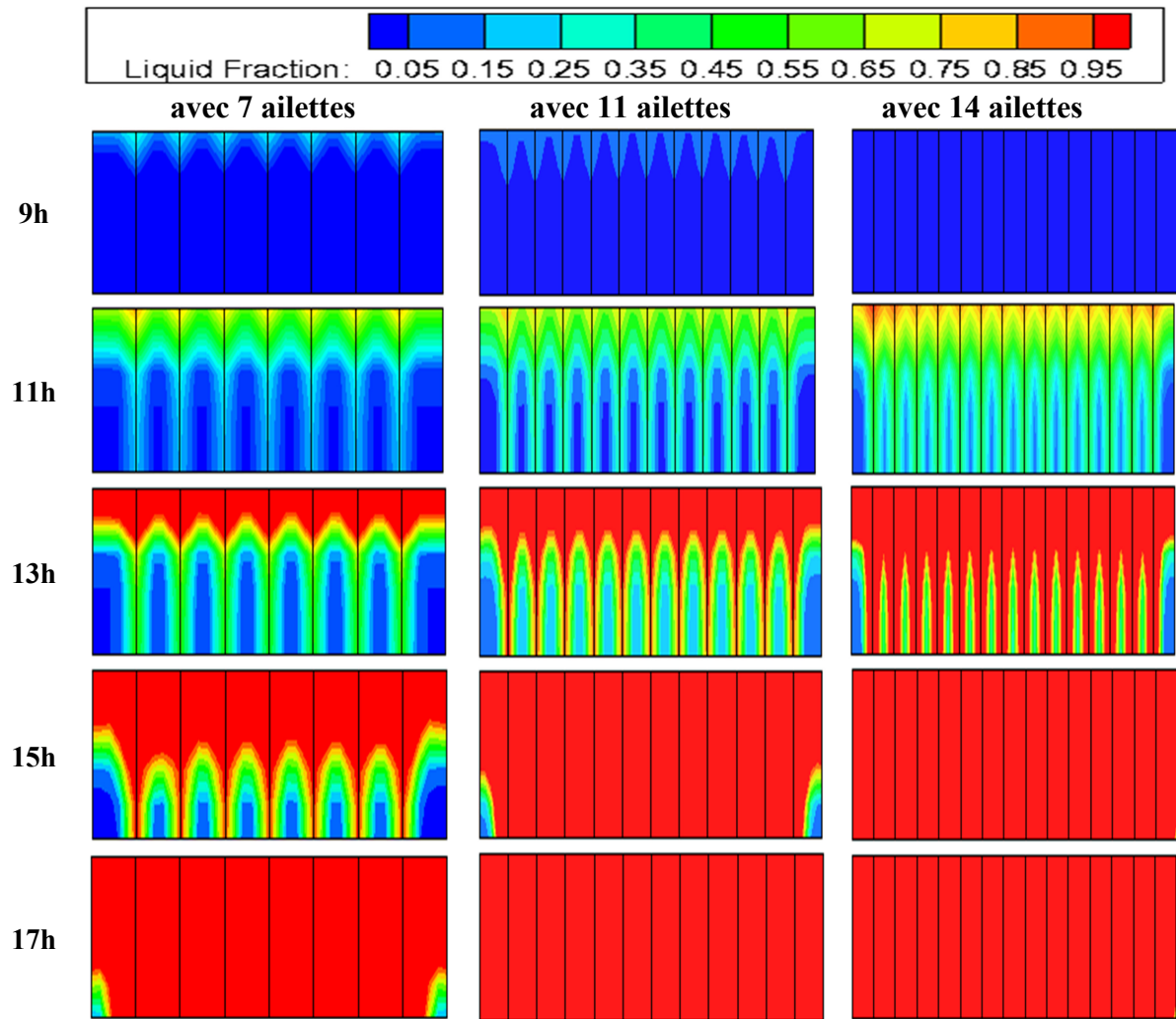


Fig. 4.10. L'évolution instationnaire de la fraction liquide dans le MCP pour différents nombres d'ailettes.

La figure 4.11 représente l'efficacité électrique moyenne pour les différents cas étudiés. Dans le cas B, il est remarqué que la présence de MCP provoque une augmentation de l'efficacité électrique avec une moyenne de 0.17 % par rapport aux cas A. L'introduction des ailettes augmente aussi l'efficacité avec une moyenne de 0.17 % par rapport aux cas B et 0.34 % par rapport aux cas A. Dans le cas avec ailettes, l'augmentation du nombre des ailettes améliore davantage le refroidissement des cellules PV et augmente de l'efficacité électrique.

La figure montre que l'efficacité électrique est améliorée avec chacune des techniques de refroidissement utilisées. Le meilleur résultat est obtenu avec le cas C (avec MCP et 14 ailettes).

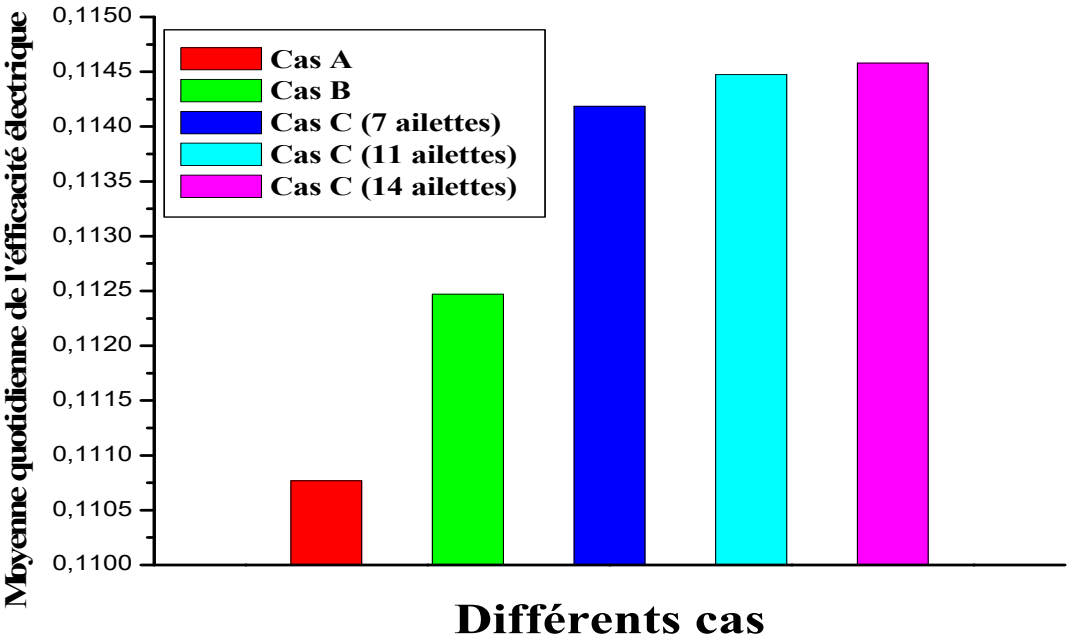


Fig.4.11. Moyenne quotidienne de l'efficacité électrique pour les trois différents cas A, B, C.

Chapitre 05

Etude numérique de l'amélioration des performances du capteur PVT avec MCP et ailettes

Dans ce chapitre, nous proposons l'étude tridimensionnelle d'un capteur solaire hybride PVT-MCP à air. Trois configurations sont proposées :

- capteur hybride avec canal d'air au-dessous de la cellule PV,
- capteur hybride avec canal d'air muni d'ailettes
- et, capteur hybride avec canal d'air muni de MCP et ailettes.

Plusieurs paramètres ont été étudiés, à savoir, la température de la cellule, l'efficacité électrique, le nombre de Nusselt moyen et la température de l'air à la sortie du capteur.

5.1. Positionnement de problème :

5.1.1. Model physique

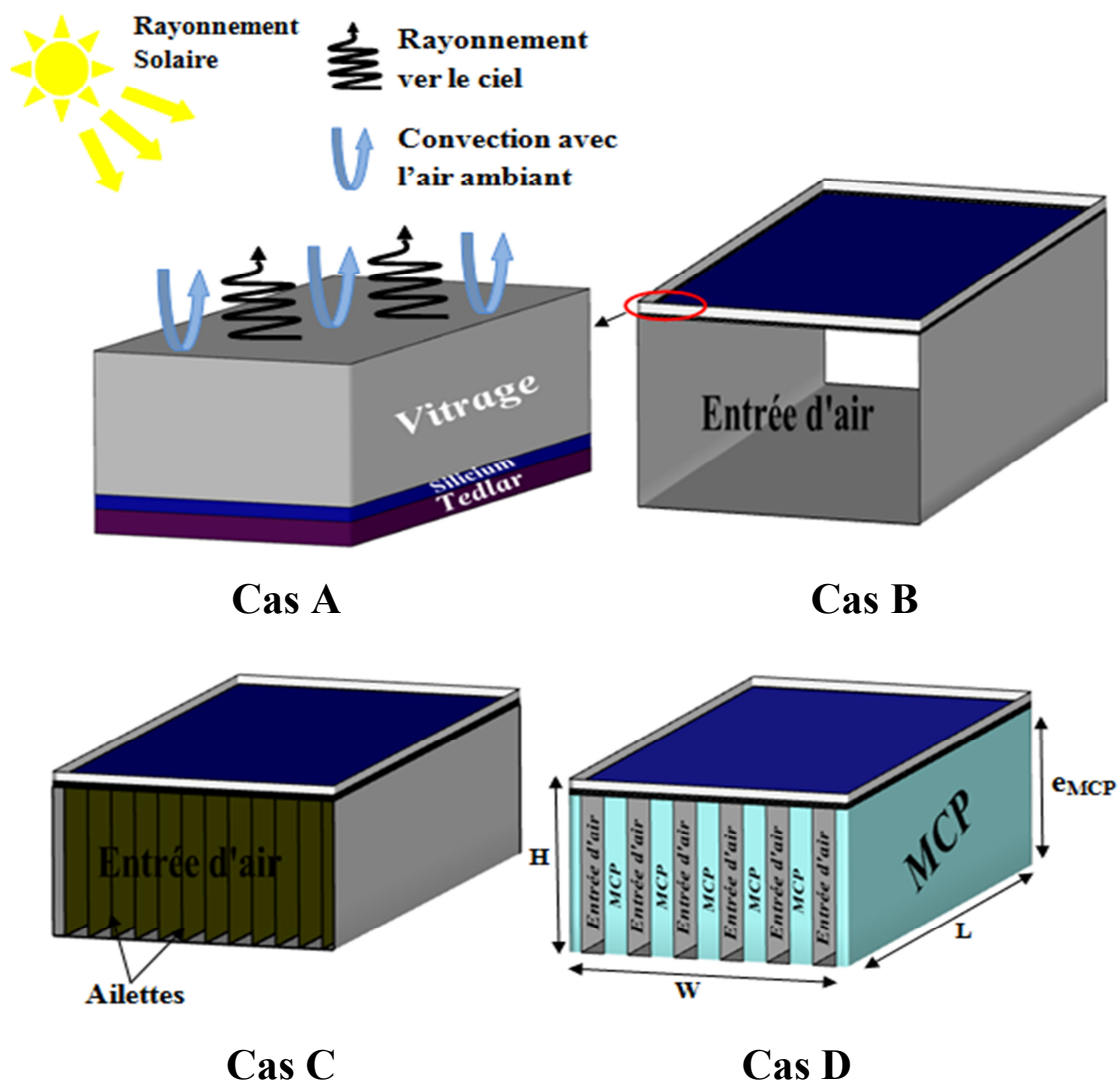


Fig.5.1. Les différentes configurations étudiées.

La figure 5.1 indique les quatre différents cas étudiés dans cette partie :

- Cas A : capteur PV sans refroidissement,
- Cas B : capteur hybride avec canal d'air au-dessous de la cellule PV,
- Cas C : des ailettes sont placées dans le canal d'air et collées sous le module PV,
- Cas D : Un MCP est placée périodiquement entre deux canaux d'air séparé par ailettes du cas C.

Le capteur solaire photovoltaïque étudié (longueur $L = 1.2$ m et largeur $W = 0.6$ m) se compose d'un vitrage, d'une plaque en silicium poly-cristallin collée sur une couche mince en tedlar. Les ailettes rectangulaires utilisées sont en aluminium et le MCP est de type RT31. Les propriétés thermo-physiques des matériaux utilisés sont présentées dans le tableau 5.1.

Tableau.5.1. Propriétés thermo-physiques des matériaux utilisés.

Paramètres	MCP (RT 31)	Cellule PV [26]			Aluminium
		Vitrage	silicium	Tedlar	
ρ (Kg/m ³)	820	2530	2300	1550	2719
λ (W/mK)	0.2	1	0.036	0.033	202.4
c_p (KJ/Kg.K)	2000	720	650	1760	871
μ (Kg/ms)	0.234	/	/	/	/
L (J/Kg)	170000	/	/	/	/
T_s (K)	300	/	/	/	/
T_i (K)	304	/	/	/	/
e (m)	0.05	0.003	0.0003	0.0005	0.001

5.1.2. Modèle mathématique :

Pour étudier et analyser le système PVT-MCP, nous adoptons le même modèle mathématique du chapitre précédent (4) avec les mêmes hypothèses simplificatrices. Les équations ajoutées sont ceux qui gouvernent l'écoulement d'air, c'est-à-dire les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie.

Continuité :

$$\frac{\partial u_a}{\partial x} + \frac{\partial v_a}{\partial y} + \frac{\partial w_a}{\partial z} = 0 \quad (5.1)$$

Où u , v et w sont les composantes de la vitesse de l'air dans les directions x , y et z respectivement.

- Equation de mouvement suivant la direction x :

$$\rho_a \left(\frac{\partial u_a}{\partial t} + u_a \frac{\partial u_a}{\partial x} + v_a \frac{\partial u_a}{\partial y} + w_a \frac{\partial u_a}{\partial z} \right) = \mu_a \left(\frac{\partial^2 u_a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_a}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_a}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (5.2)$$

- Equation du mouvement suivant la direction y :

$$\rho_a \left(\frac{\partial v_a}{\partial t} + u_a \frac{\partial v_a}{\partial x} + v_a \frac{\partial v_a}{\partial y} + w_a \frac{\partial v_a}{\partial z} \right) = \mu_p \left(\frac{\partial^2 v_a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_a}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_a}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} \quad (5.3)$$

- Equation du mouvement suivant la direction z :

$$\rho_a \left(\frac{\partial w_a}{\partial t} + u_a \frac{\partial w_a}{\partial x} + v_a \frac{\partial w_a}{\partial y} + w_a \frac{\partial w_a}{\partial z} \right) = \mu_a \left(\frac{\partial^2 w_a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_a}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_a}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (5.4)$$

- Equation d'énergie :

$$\rho_a C_{p_a} \left(\frac{\partial T_a}{\partial t} + u_a \frac{\partial T_a}{\partial x} + v_a \frac{\partial T_a}{\partial y} + w_a \frac{\partial T_a}{\partial z} \right) = \lambda_{air} \left(\frac{\partial^2 T_a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_a}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_a}{\partial z^2} \right) \quad (5.5)$$

- L'efficacité électrique est calculée selon l'équation suivante [78] :

$$\eta_c = 0.125 (1 - 0.004(T_{cell} - 293)) \quad (5.7)$$

- Le nombre de Reynolds de l'écoulement défini comme :

$$Re = \rho V D_h / \mu \quad (5.8)$$

Le régime d'écoulement dans cette étude est laminaire causé par les faibles valeurs de nombre de Reynolds qui est inférieur à 2100 dans tous les cas.

5.1.3. Conditions initiales et aux limites :

- Au début à ($t = 0$), l'ensemble du domaine est maintenu à la température ambiante (294 K). Le MCP est en phase solide (les composantes de la vitesse suivant x , y et z sont nulles).
- A l'entrée, l'air entre avec une vitesse constante de 0,2 m/s et avec une température de 294 K.
- À la sortie, un écoulement pleinement développé est supposé en imposant un gradient zéro pour tous les variables :

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (5.9)$$

- La face supérieure : $0 \leq x \leq L, y = H$ et $0 \leq z \leq W$

Elle est exposée à un rayonnement solaire avec des pertes thermiques convectif avec l'ambiance et radiatif avec le ciel.

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = G - h_a(T_v - T_{amb}) - \sigma \varepsilon_v(T_v^4 - T_{ciel}^4) \quad (5.10)$$

Le coefficient de convection avec l'extérieur est calculé selon Mac Adams par la corrélation (4.12) [79]

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

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h_a(T_v - T_{amb}) \quad (5.11)$$

- Les quatre extrémités latérales du capteur thermique (partie MCP) sont supposées adiabatiques

$$\frac{dT}{dn} = 0 \quad (5.12)$$

- La condition de non glissement (no-slip) est appliquée sur les parois du canal avec une condition de continuité de flux thermique.

$$u = v = w = 0 \quad (5.13)$$

- Les évolutions de la température ambiante, de la température de ciel et du rayonnement solaire sont présentées dans la Fig. 5. 2. et approximé par les équations 5. 14, 5. 15 et 5. 16, respectivement. Ces modèles mathématiques ont été proposés par **W. Chen [80]**.

$$G = 750 \sin\left(\pi \frac{t/3600}{12}\right) \quad (5.14)$$

$$T_{amb} = 295 + 5 \cos\left(0.2616 \left(\frac{t}{3600} - 7\right)\right) \quad (5.15)$$

$$T_{ciel} = 0.0552 \left[22 + 5 \cos\left(\frac{\pi}{12} \left(\frac{t}{3600} - 7\right)\right)\right]^{1.5} + 273 \quad (5.16)$$

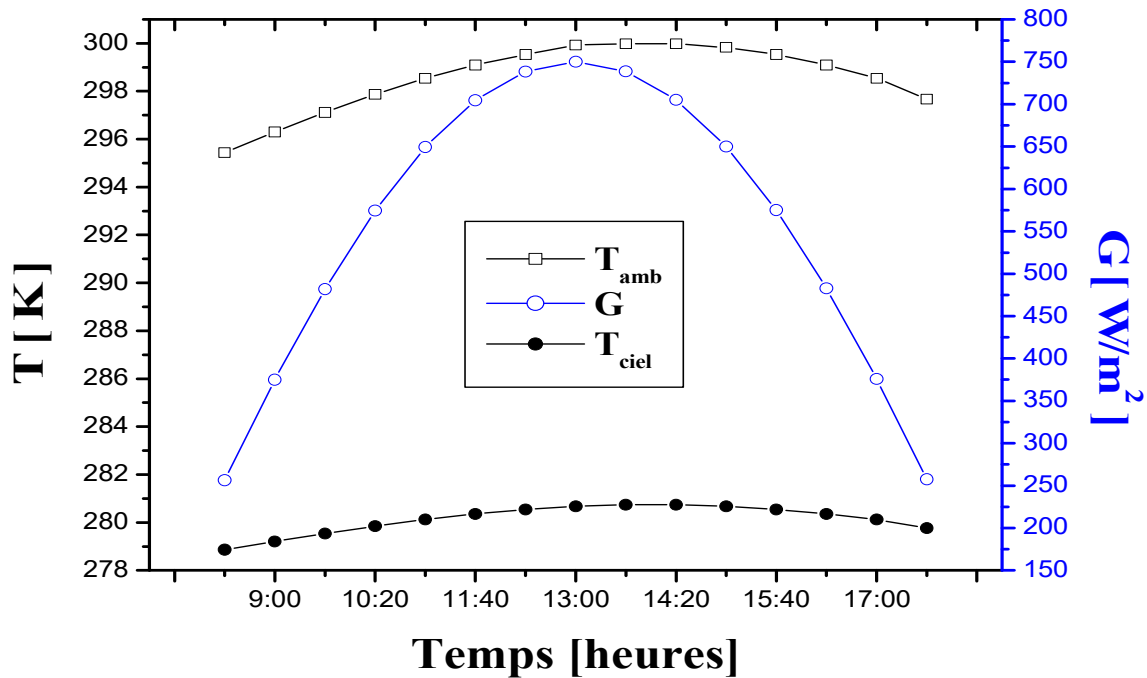


Fig. 5.2. Evolution du rayonnement solaire, la température ambiante et la température de ciel pendant la journée.

5.2. Résultats et discussion :

Le code commercial ANSYS-FLUENT est utilisé de nouveau pour résoudre numériquement le système d'équations mathématiques régissant le comportement physique du capteur hybride PVT-MCP étudié. Le calcul numérique utilise l'algorithme SIMPLE avec le schéma Upwind second-order pour la résolution des équations gouvernantes. La méthode enthalpie-porosité a été utilisée pour décrire le processus de fusion.

Les facteurs de sous-relaxation pour les composantes de la vitesse, la correction de pression, l'énergie thermique et la fraction liquide sont fixés 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 10^{-10} pour l'équation d'énergie.

5.2.1. Validation du model :

La validation de notre simulation a été assurée avec le travail expérimental de Joshi et al [82] sur un capteur solaire hybride (PVT) à air. Un canal d'air rectangulaire est placé au-dessous d'un module PV. La longueur du capteur est 1.2 m, sa largeur 0.45 m et la profondeur du canal

0.5 m. La Fig. 5.3 illustre la comparaison entre les évolutions instationnaires des températures de silicium et de l'air à la sortie obtenues par notre simulation et ceux tirées expérimentalement [82]. La comparaison montre clairement le bon accord des résultats obtenus.

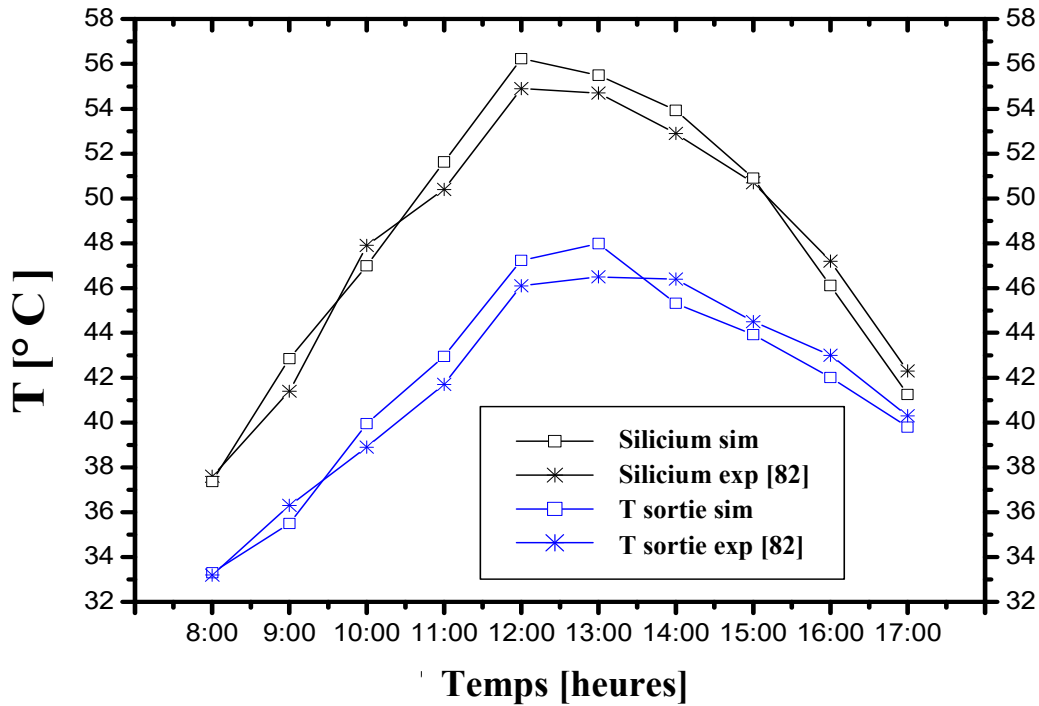


Fig. 5.3. Variation de la température de silicium et la température de l'air à la sortie pendant la journée.

5.2.2. Test de maillage

Quatre tailles de maillage ont été testées pour les trois cas (B), (C) et (D) en utilisant des éléments hexaédriques. La température de la cellule PV et celle de l'air à la sortie (à 13:00) est considérée pour valider le test d'indépendance de la taille de maillage finalement choisis, tableau 5.2. Les maillages adoptés sont : 109 292 cellules pour le cas (B) et 121 093 cellules pour les cas (C et D).

Le pas de temps utilisé dans le processus itératif a été testé aussi en utilisant l'évolution instationnaire de la température de la cellule, figure 5.4. Le pas de temps adopté est de 0,5 seconde dans les différentes configurations.

Tableau 5.2. Optimisation du maillage.

Cas	Nombre de cellule	T _{PV} [K]		T _{sortie} [K]	
		Cas C	Cas D	Cas C	Cas D
(C et D)	65880	319.515	311.017	310.111	302.323
	92160	320.995	312.121	311.291	303.21
	121093	322.817	313.19	312.467	304.94
	159885	322.645	313.375	312.406	305.198
(B)	65880	328.19		305.314	
	109292	330.228		307.291	
	128000	330.25		307.28	
	167000	330.091		306.908	

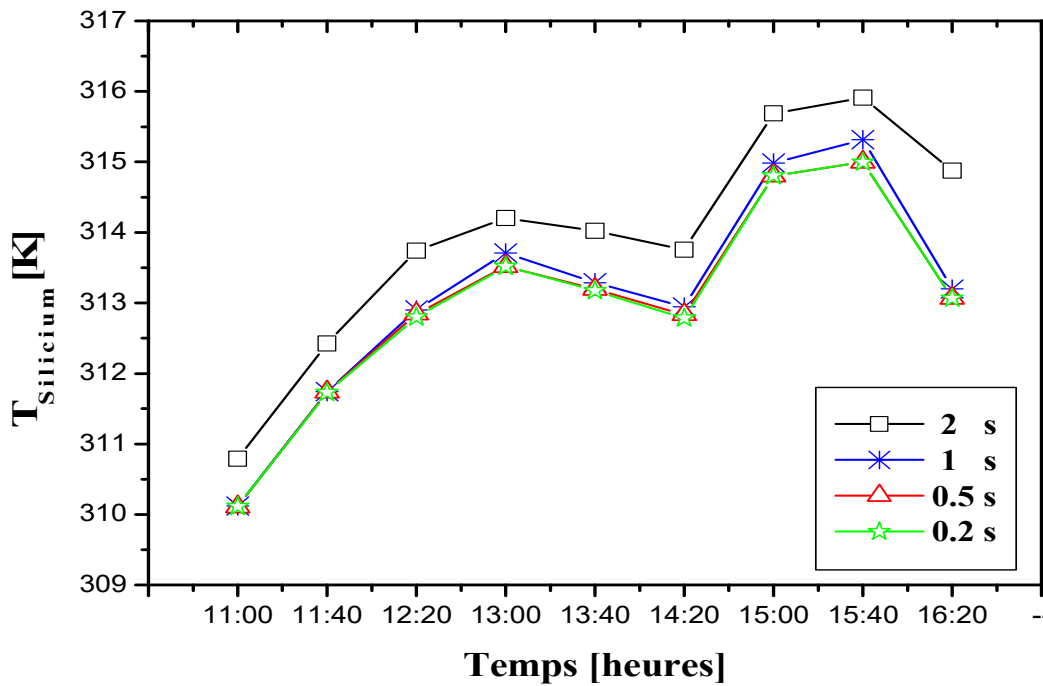


Fig. 5.4. L'indépendance de pas du temps basé sur l'évolution de la température De silicium en fonction du temps.

5.2.3. Influence des ailettes :

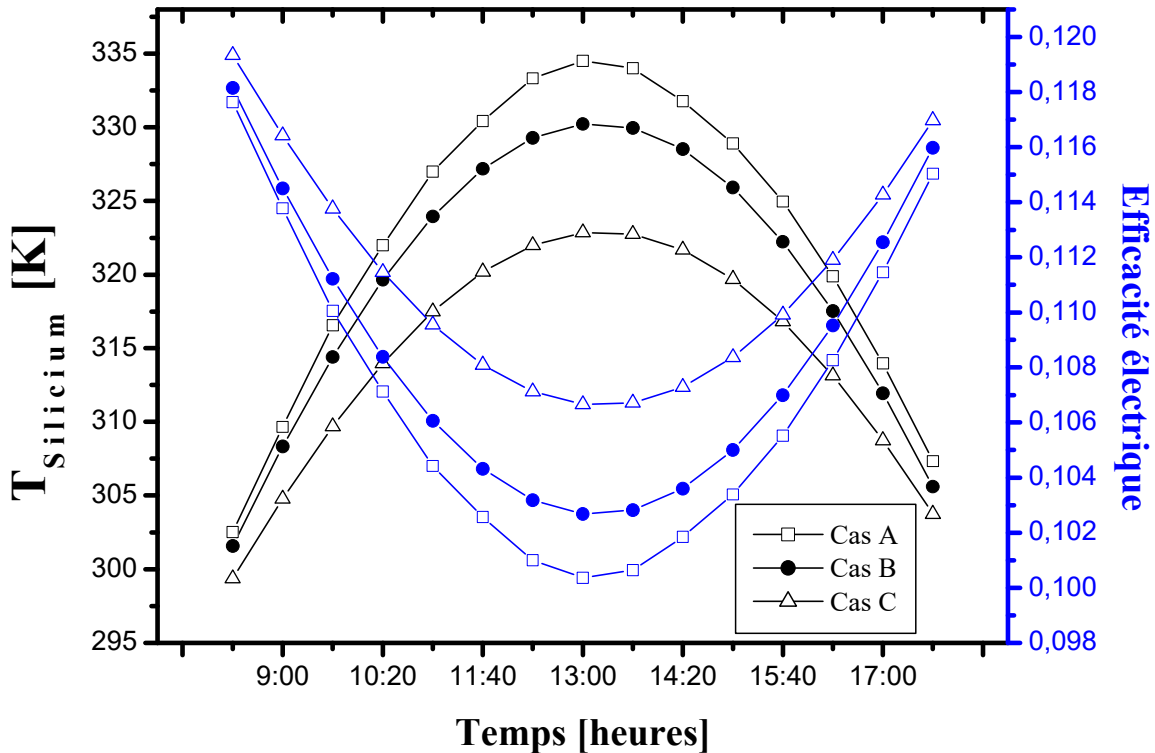


Fig.5.5. Variation de la température de silicium et l'efficacité électrique pendant la journée.

La figure 5.5 illustre la variation de la température du silicium et de l'efficacité électrique pendant la journée pour trois configurations (A), (B) et (C). Il est bien remarqué que la température du silicium ainsi que l'efficacité électrique sont assez proches, pour les trois cas (A, B et C), au début et après 17h à cause du faible ensoleillement. En outre, la température de silicium augmente jusqu'à atteindre des valeurs maximales (autour de 13h) égales à 334.51, 330.22 et 322.85 K pour les trois cas (A), (B) et (C), respectivement. Il diminue ensuite parallèlement avec la diminution de rayonnement solaire. Cependant, ce comportement provoque un effet inverse sur l'efficacité électrique qui diminue avec l'augmentation de la température de silicium et augmente avec sa diminution. Il est observé aussi que l'absence de refroidissement du silicium (cas A) provoque des températures élevées entraînant des efficacités électriques faibles. Utilisation le refroidissement par air (cas B) diminue la température de silicium et améliore l'efficacité électrique (avec un écart moyen de 0.146 % par rapport au cas A). L'intégration des ailettes (cas C) apporte un meilleur

refroidissement par rapport au cas (B), et conduit à l'amélioration de l'efficacité électrique avec un écart moyen de 0.286 et 0.432 % par rapport au cas (B et A), respectivement.

La figure 5.6 montre la variation de la température de l'air à la sortie du canal pendant la journée pour les deux cas (B et C). Il est remarqué que la température de l'air augmente avec l'augmentation de l'intensité du rayonnement solaire jusqu'à atteindre des valeurs maximales (à 13h) autour de 307 et 313 K pour les deux cas (B et C), respectivement. Elle diminue ensuite avec la diminution d'ensoleillement pour les deux cas en question. En outre, la température de l'air à la sortie, dans le cas avec présence des ailettes (cas C), est toujours supérieure à celle du cas (B) grâce à l'amélioration du refroidissement avec l'augmentation de la surface d'échange.

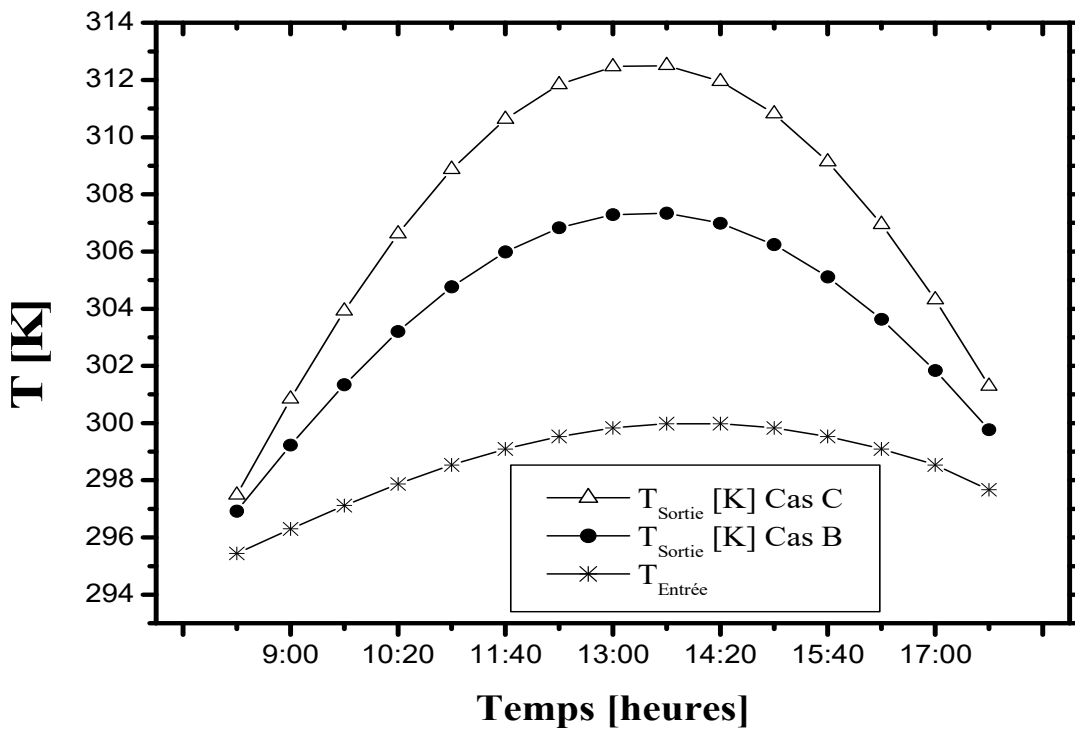


Fig. 5.6. Variation de la température de l'air à la sortie pendant la journée.

La figure 5.7 et 5.8 présente la variation de la température du silicium, de l'efficacité électrique et du nombre de Nusselt moyen pour différentes vitesses pendant la journée. Les résultats montrent que l'augmentation de la vitesse d'air provoque une intensification du taux d'échange convectif (le taux de refroidissement) justifié par l'augmentation de Nusselt moyen. Cela provoque une diminution de la température de silicium entraînant une augmentation de l'efficacité électrique. Autour de 13h, la température du silicium atteint des valeurs maximales de 326.9, 322.85 et

320.32 K, correspondants aux valeurs minimales de l'efficacité électrique de 0.104, 0.107 et 0.108, pour les vitesses d'air de 0.05, 0.2 et 0.6 m/s, respectivement.

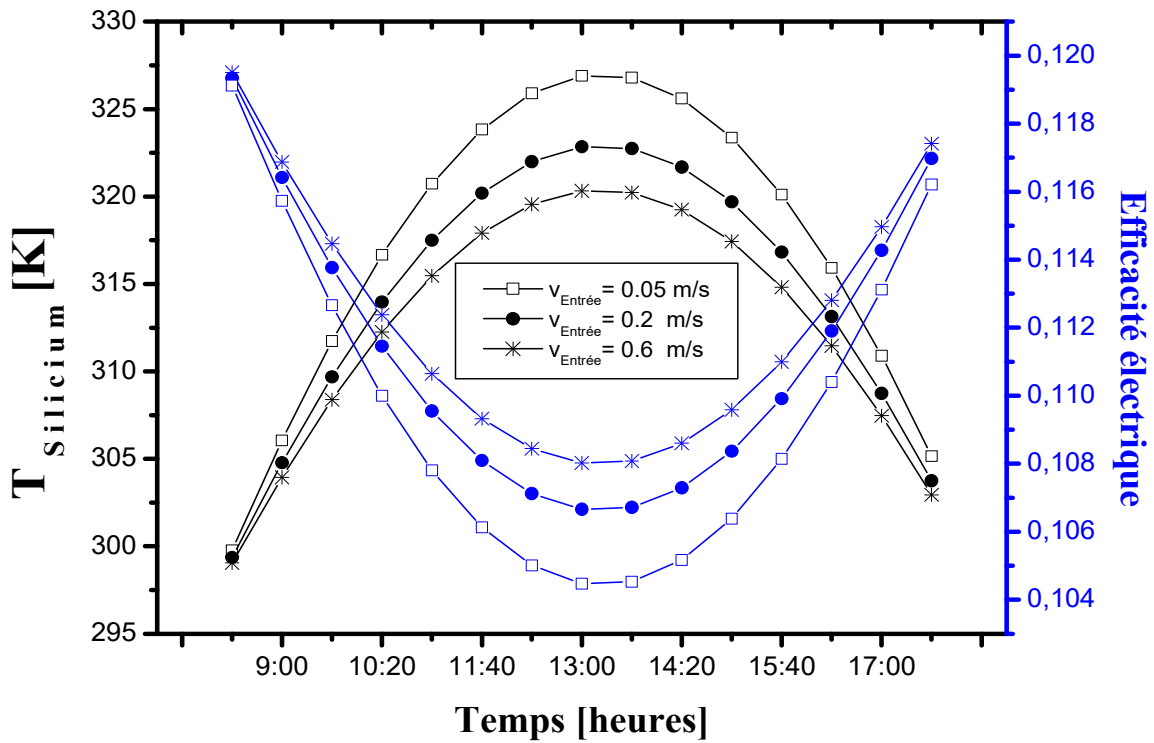


Fig.5.7. Variation de température du silicium et de l'efficacité électrique pour différentes vitesses pendant la journée.

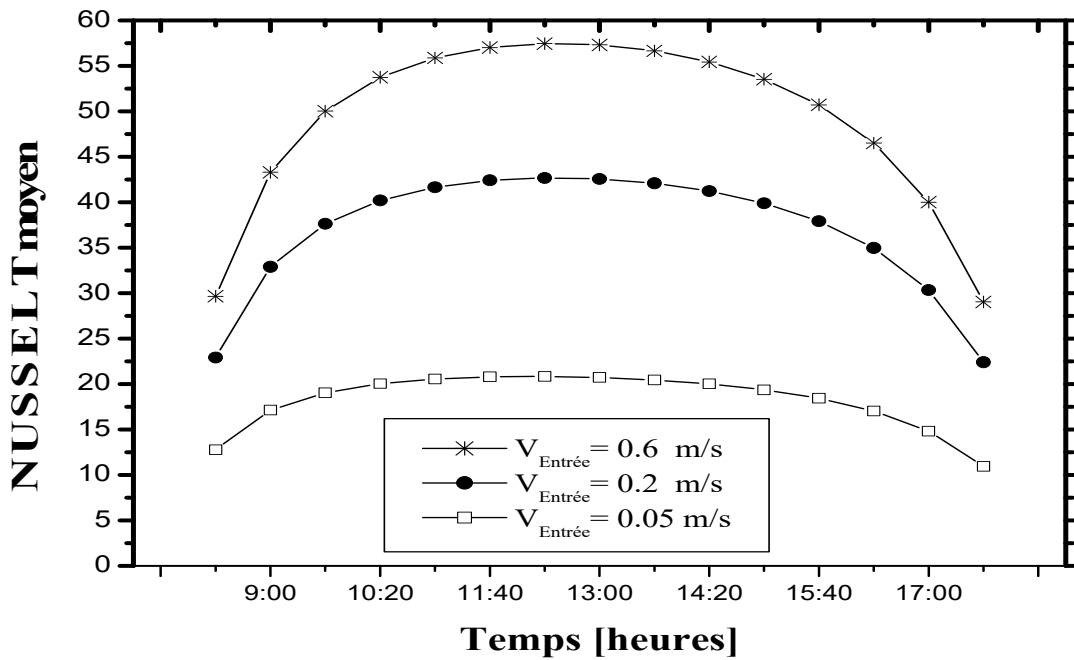


Fig.5.8. Variation du Nusselt moyen au canal d'air pour différentes vitesses pendant la journée.

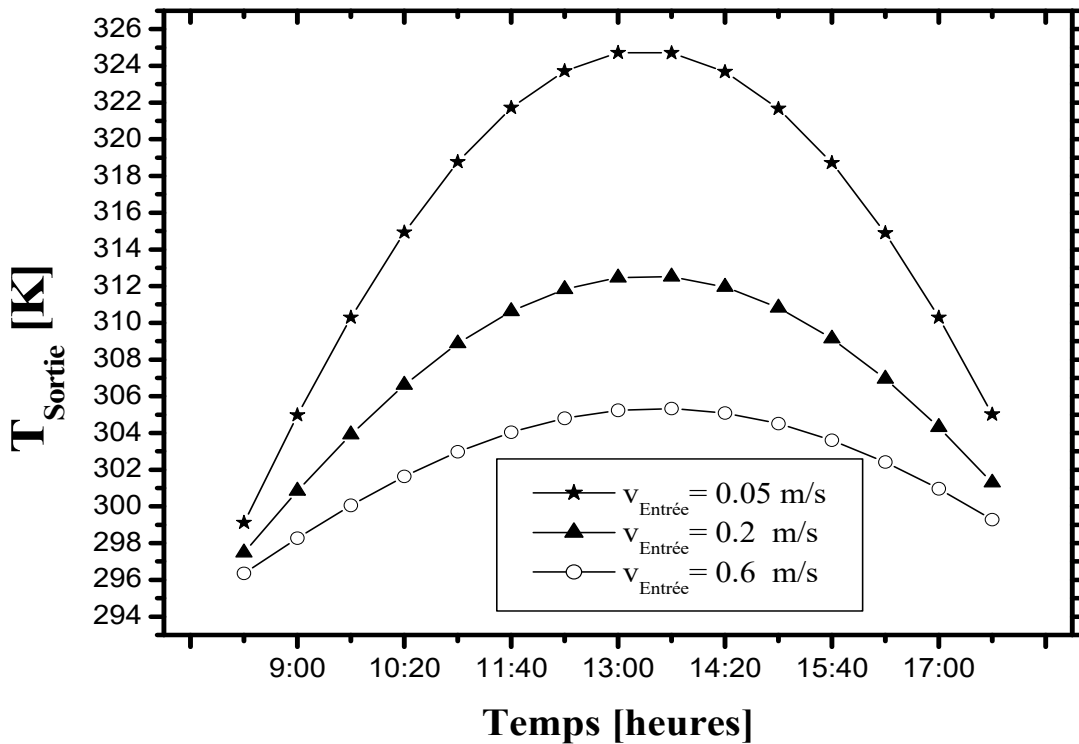


Fig.5.9. Variation de la température de l'air à la sortie pour différentes vitesses pendant la journée.

La figure 5.9 présente la variation de la température de l'air à la sortie du canal pour trois différentes vitesses pendant la journée. Il est bien remarqué que la température de l'air à la sortie augmente avec l'augmentation de rayonnement jusqu'à atteindre des valeurs maximales autour de 13h pour diminuer ensuite avec sa diminution. Les résultats montrent aussi que la température de l'air à la sortie diminue avec l'augmentation de la vitesse qui réduit le temps de séjour du fluide à l'intérieure du canal.

5.2.4. Utilisation des MCP :

La figure 5.10 illustre la variation de la température du silicium et de l'efficacité électrique pendant la journée pour les deux configurations (C) et (D). Durant les périodes de fort ensoleillement (autour de 13h), la température du silicium augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale de 323 K, correspond à la valeur minimale de l'efficacité électrique de 0.106, pour le cas C. Par contre, le cas D entraine une augmentation de la température du silicium jusqu'à 313 K autour de 13h correspond une valeur de 0.111 % de l'efficacité électrique ; après ce moment, la température de la cellule diminue légèrement jusqu'à 14 :20. La température augmente de nouveau

jusqu'à une valeur maximale de 315 K causée par la fusion totale du MCP, figure 5.12. Ainsi, la température du silicium diminue avec l'utilisation du MCP avec un écart moyen de 9°C entrainant l'augmentation de l'efficacité électrique par 0.5 % entre 11 :40 et 14:20, période de la fusion du MCP avec absorption de la chaleur latente. Après 15h40, la température du silicium diminue avec la diminution de rayonnement jusqu'à la fin de la journée.

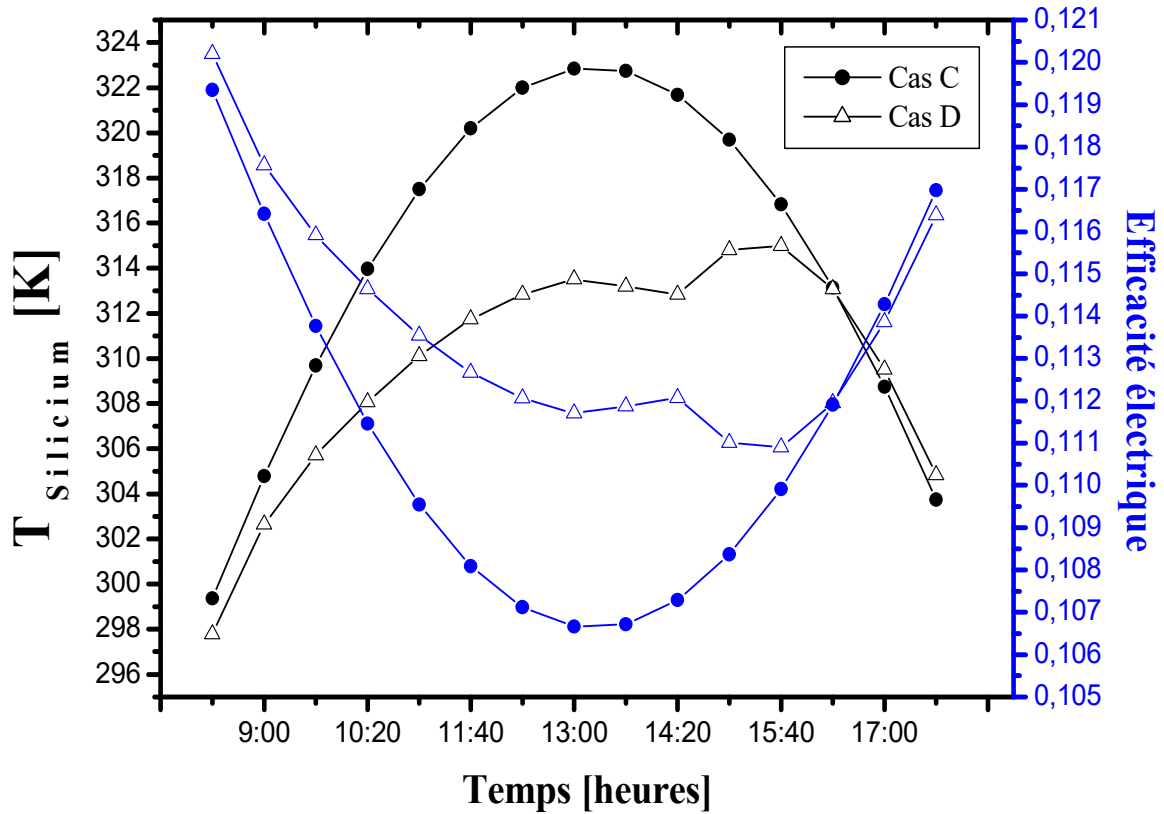


Fig.5.10. Variation de la température du silicium et de l'efficacité électrique pendant la journée pour le cas C et D.

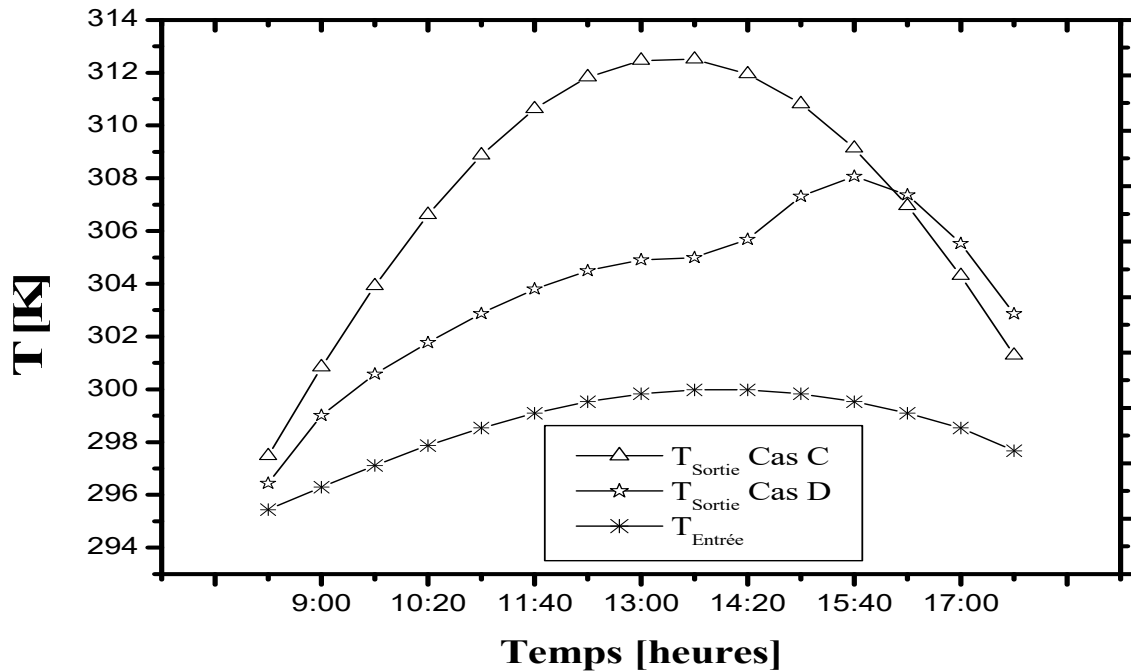


Fig.5.11. Variation de la température de l'air à la sortie du canal pour les deux cas C et D pendant la journée

La figure 5.11 montre la variation de la température de l'air à la sortie du canal pour les deux cas C et D pendant la journée. Pour le cas C, la température de l'air à la sortie augmente durant la matinée avec l'augmentation de rayonnement jusqu'à atteindre la valeur maximale autour de 312 K à 13h et, diminue après avec la diminution de rayonnement. Pour le cas D, la température de l'air à la sortie augmente de manière nettement moins importante jusqu'aux alentours de 14h20. Cela est provoqué par la fusion du MCP entraînant l'absorption de la chaleur latente. Ensuite, la température à la sortie augmente de nouveau après la fusion totale du MCP et atteint la valeur maximale de 308 K à 15:40. Après, la température diminue avec la diminution de rayonnement. Globalement, la température de l'air à la sortie du canal dans le cas C est toujours supérieure à celle dans le cas D jusqu'à 15:40. Après, la température à la sortie dans le cas D devient supérieure à celle dans le cas C, ce phénomène causé par la libération de la chaleur latente par le MCP.

La figure 5.12 illustre l'évolution de la fraction liquide et des isothermes à 11h40 et 14h20, suivant l'axe Z. Cette figure montre que la fusion du MCP commence à 11:40 justifiée par l'apparition d'un film liquide du MCP au voisinage de la plaque absorbante. Ce film liquide augmente légèrement avec la position suivant l'axe Z à cause de l'augmentation de la température

de l'air à la sortie. Il est remarqué aussi que la température de MCP dans la partie supérieure est dans la plage de la température de la fusion. A 14:20, le MCP est totalement fondu et la température de MCP devient supérieure à la température de l'air.

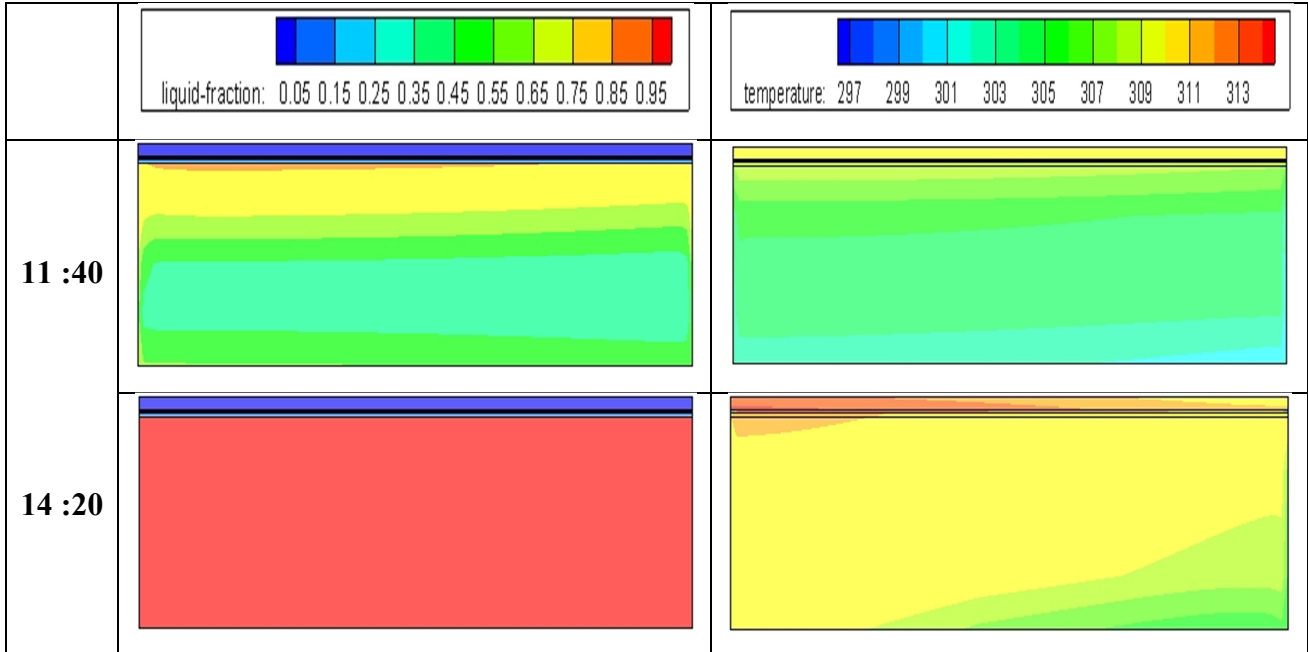


Fig.5.12. Evolution de la fraction liquide et les isothermes à 11h40 et 14h20 pour le cas D.

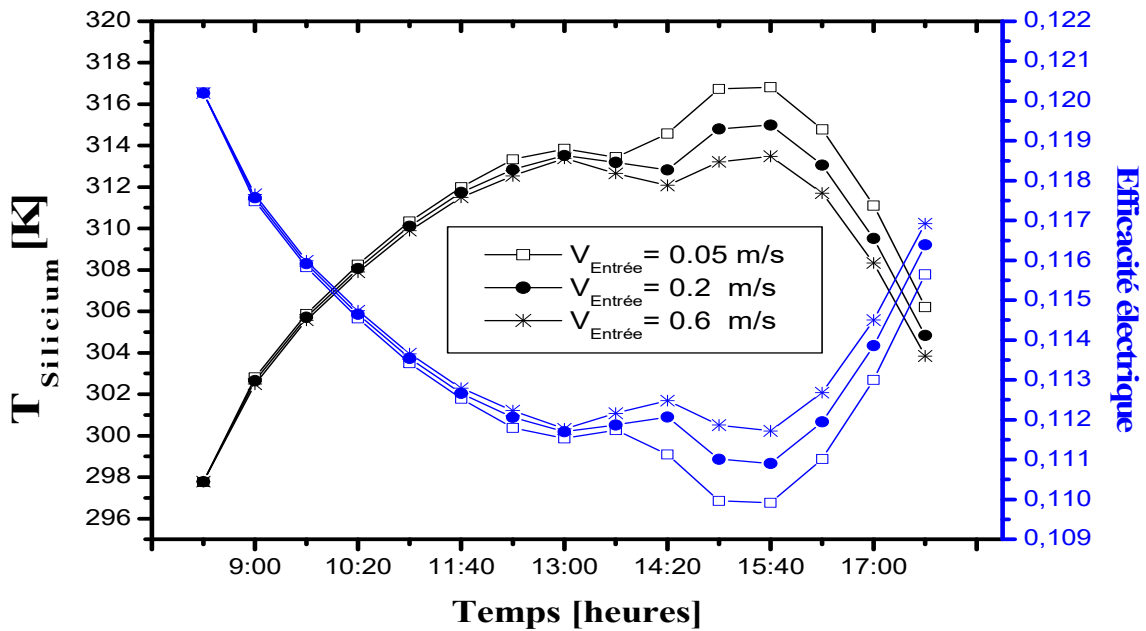


Fig.5.13. Variation de la température du silicium, de l'efficacité électrique pour différentes vitesses d'air pendant la journée.

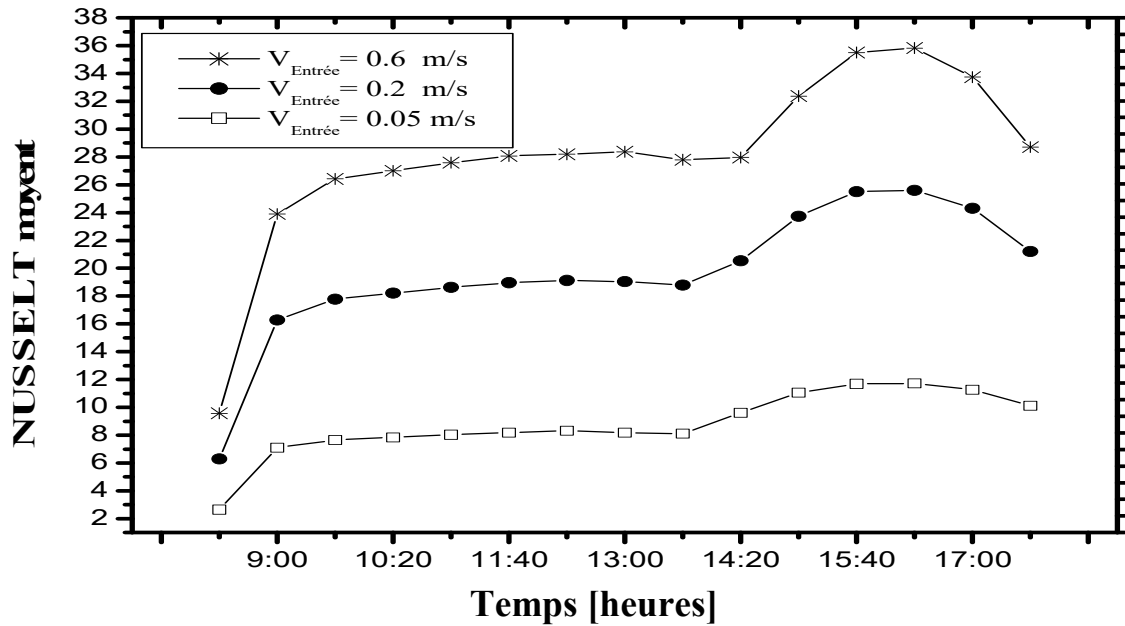


Fig.5.14. Variation du Nusselt moyen au canal d'air pour différentes vitesses d'air pendant la journée.

La figure 5.13 et 5.14 montre la variation de la température du silicium, de l'efficacité électrique et du nombre de Nusselt moyen pendant la journée pour différentes vitesses dans le cas D. Il est clair que l'efficacité électrique diminue avec l'augmentation de la température du silicium causée par l'augmentation du rayonnement solaire jusqu'à 13h. Durant cette période, l'augmentation de la vitesse d'air n'influe que faiblement sur la diminution de l'efficacité électrique de la cellule PV. A 13h, la température diminue légèrement avec la diminution du rayonnement en raison de la présence de changement de phase (à une température constante). Après 13h40, la température du silicium augmente à nouveau grâce à la fusion totale du MCP. La température maximale de 317 K (correspondant à l'efficacité électrique minimale de 0.109 %) sont atteintes autour de 15h40 pour une vitesse de 0.05 m/s. Pour une vitesse de 0.2 et 0.6 m/s, la fusion totale est atteinte 40 min après celle d'une vitesse de 0.05 m/s, indiquée par la deuxième augmentation de la température à 14h20. Autour de 15h40, la température maximale atteint 315 et 313.5 K (correspond à des efficacités minimales de 0.110 et 0.111%) respectivement pour les vitesses de 0.2 et 0.6 m/s. En outre, le nombre de Nusselt moyen augmente avec l'augmentation de la vitesse d'air et influe positivement sur le refroidissement du silicium après le changement de phase qui conduit à une augmentation de l'efficacité électrique.

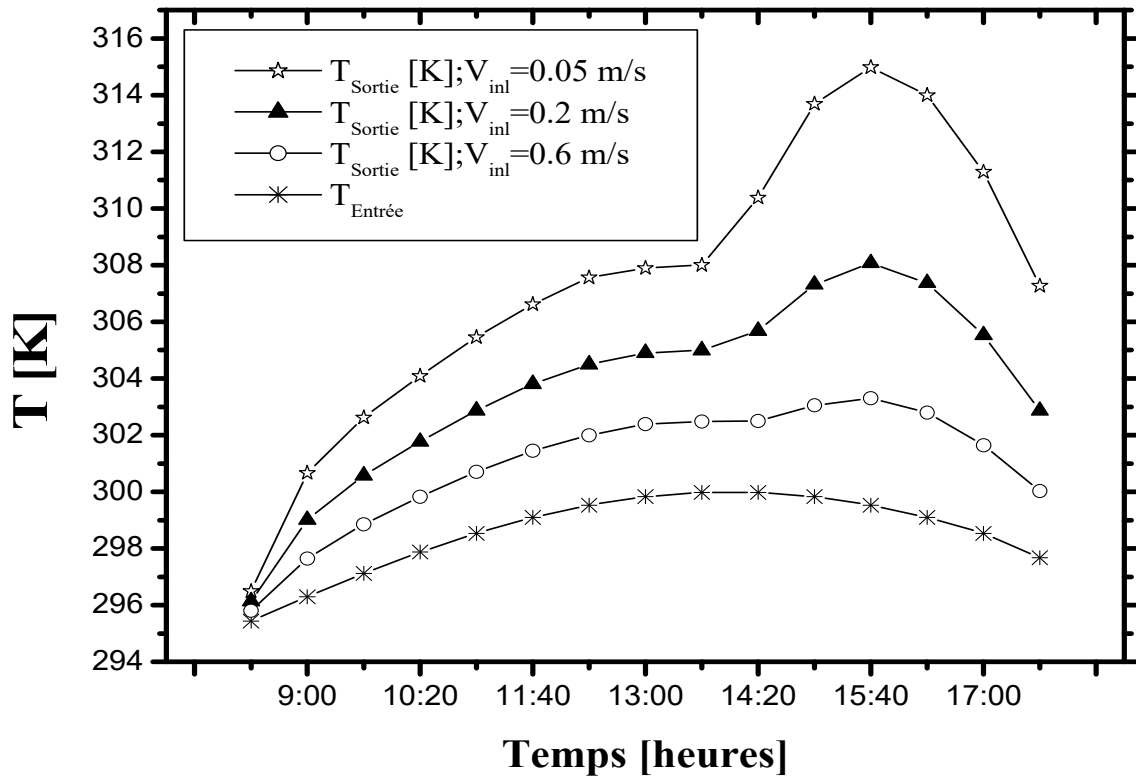


Fig.5.15. Variation de la température de l'air à la sortie pour trois différentes vitesses pendant la journée.

La figure 5.15 montre la variation de la température de l'air à la sortie du canal pour différentes vitesses pendant la journée (Cas D). Il est observé que la température de l'air augmente progressivement jusqu'à 13h40 pour une vitesse de 0.05 et 0.2 m/s et 14h20 pour une vitesse de 0.6 m/s. Après la fusion totale du MCP, la température augmente plus rapidement jusqu'à 15h40 pour atteindre approximativement 315, 308 et 303.3 K pour des vitesses de 0.05, 0.2 et 0.6 m/s, respectivement. Ainsi, la température de l'air à la sortie du canal diminue avec l'augmentation de la vitesse justifiée par la diminution du temps de séjour du fluide à l'intérieure du canal. Cependant, cette diminution devient plus remarquable après la fusion totale du MCP.

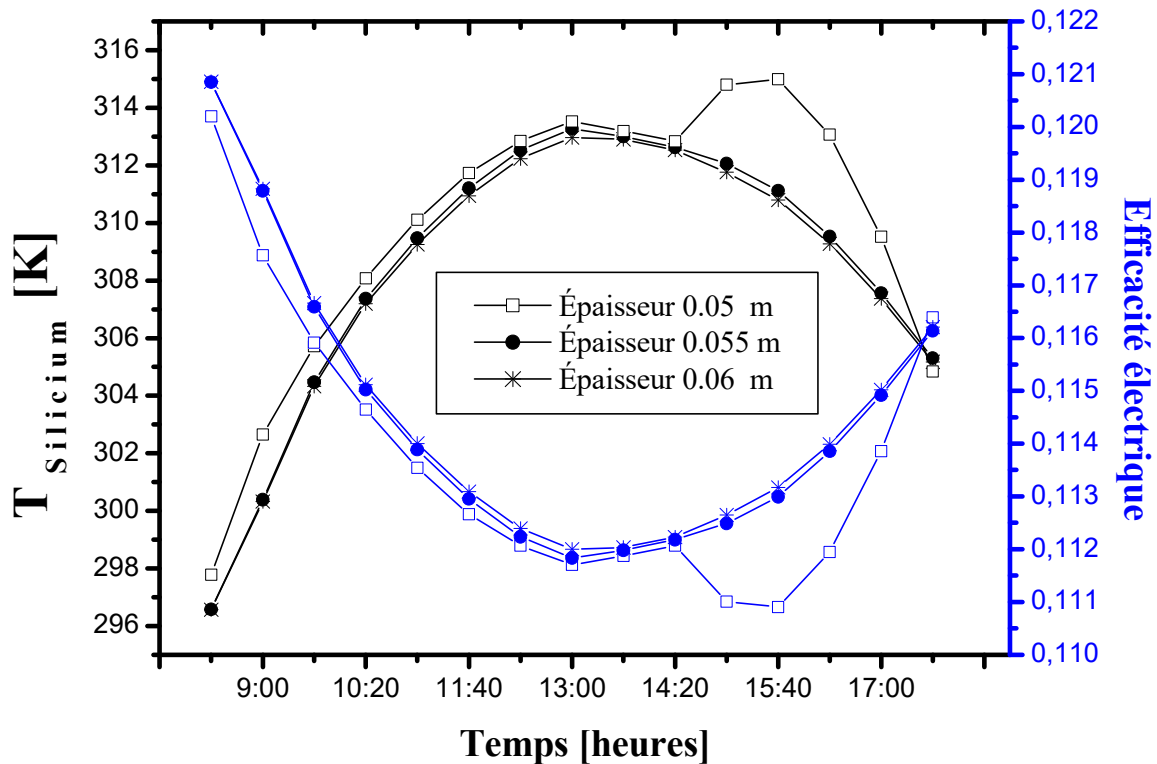


Fig.5.16. Variation de la température de silicium et l'efficacité électrique pendant la journée pour différentes épaisseurs du MCP, cas (D).

La figure 5.16 présente la variation de la température du silicium et de l'efficacité électrique pour différentes épaisseurs du MCP (0.05, 0.055 et 0.06m), cas (D). La figure montre que l'évolution de la température et celle de l'efficacité électrique sont très voisines pour les trois épaisseurs choisis jusqu'à 14h20. A cet instant, le MCP est totalement fondu pour une épaisseur de 0.05 m et la température augmente à nouveau jusqu'à atteindre la valeur maximale de 315 K à 15h40. Cependant, le MCP n'est toujours que partiellement fondu pour les épaisseurs de 0.055 et 0.06 m. La température diminue encore est atteint 311.12 et 310.89 K pour les épaisseurs de 0.055 et 0.06 m, respectivement. Donc, l'augmentation de l'épaisseur du MCP améliore le refroidissement des cellules PV. Une fois la fusion totale est assurée, il est inutile d'augmenter d'avantage son épaisseur.

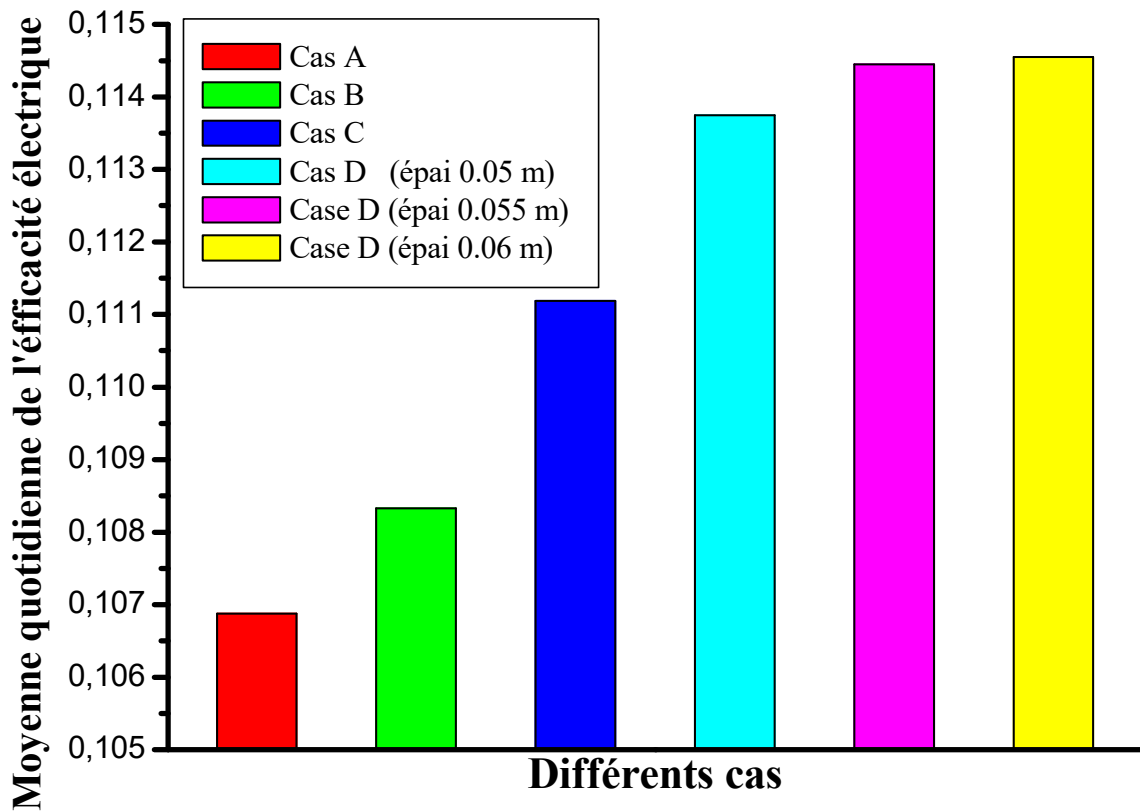


Fig.5.17. Moyenne quotidienne de l'efficacité électrique pour quatre cas différents A, B, C et D.

La figure 5.17 représente l'efficacité électrique moyenne pour les différents cas étudiés. La figure montre que l'efficacité électrique est améliorée avec chacune des techniques de refroidissement utilisées. Les meilleurs résultats sont obtenus avec le cas D (MCP avec une épaisseur entre 0.055 et 0.06 m).

Conclusion Générale

Conclusion Générale

La présente thèse porte sur l'étude des phénomènes de transfert thermo-convectif (forcé et naturel) avec changement de phase solide/liquide intervenant lors du fonctionnement journalier des différents capteurs solaires photovoltaïques : PV-MCP, PVT et PVT-MCP. La visualisation du comportement thermique de ces capteurs permet d'analyser l'effet d'introduction des ailettes et de MCP sur le refroidissement des cellules PV.

La convection forcée, les ailettes et les MCP représentent trois techniques majeures utilisées pour le refroidissement des panneaux photovoltaïques. La combinaison de ces trois techniques dans la même conception fait l'objet principal de cette étude. Pour optimiser la conception du capteur PV et améliorer le refroidissement des cellules, six (06) configurations ont été analysées : module PV classique (sans refroidissement), module PV avec MCP (PV-MCP), module PV-MCP avec ailettes, module PV avec convection forcée (PVT), panneau PVT avec ailettes et panneau PV-MCP alterné avec circulation d'air forcé séparés par des ailettes (PVT-MCP).

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). Deux validations du modèle numérique utilisé ont été effectuées avec les résultats de la littérature. La première validation concerne le phénomène de fusion du MCP sans présence de panneau. La deuxième concerne un panneau PVT à air forcé. Les résultats de simulation montrent une bonne concordance avec les résultats expérimentaux.

Les résultats numériques obtenus montrent que l'utilisation des MCP comme moyen de refroidissement réduit la température de la cellule PV par environ 5-6 °C, dans la période de fort ensoleillement. Cela conduit à une augmentation de l'efficacité électrique par 0.2 %. Aussi, l'intégration des ailettes dans le MCP accélère le changement de phase et provoque une amélioration importante du refroidissement des cellules par environ 13-14 °C par rapport au cas sans ailettes.

Dans les capteurs PVT à air, le refroidissement par convection forcée améliore l'efficacité électrique par environ 0.15 % par rapport à un panneau PV conventionnel. L'introduction des ailettes dans le canal d'air améliore davantage le refroidissement et l'efficacité électrique augmente par environ 0.29 %. La présence des ailettes augmente aussi

Conclusion Générale

la température de l'air à la sortie du canal par environ 7 °C. L'augmentation de la vitesse d'air améliore le refroidissement des cellules PV mais réduit la température de l'air à la sortie.

L'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) dans les systèmes hybrides PVT améliore le refroidissement des cellules PV en diminuant leur température par environ 9°C, durant la période de fort ensoleillement. Par conséquent, l'efficacité électrique augmente par environ 0.5 %.

L'efficacité électrique est améliorée avec chacune des techniques de refroidissement proposées. La première partie de cette étude montre le refroidissement des cellules PV avec un MCP peut s'améliorer considérablement avec l'ajout des ailettes. Un meilleur résultat est obtenu avec l'utilisation de 14 ailettes. Dans la deuxième partie, l'utilisation des MCP dans les capteurs PVT s'avère très pratique. Le meilleur refroidissement est obtenu avec un MCP d'épaisseur entre 0.055 et 0.06 m.

En perspective, les études suivantes peuvent être réalisées :

- Etude la limite supérieur du nombre d'ailettes utilisées dans les capteurs PV-MCP et PVT-MCP.
- Choisir le MCP le mieux adapté aux zones de l'Algérie.
- Couplage de panneau PVT à air muni des ailettes et de MCP avec un concentrateur parabolique composé (CPC).
- Optimisation d'arrangement ailettes/MCP pour favoriser une meilleur stabilité de température de cellule.
- Influence de type de MCP et ses propriétés sur les performances de module PV.

Références bibliographiques

Bibliographie

- [1] **Villalva M. G. & al**, 2009. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *Journal of power electronics*, 24 (5) 1198-1208.
- [2] **Zondag, HA, Bakker M, Helden WGJ**, 2005. PVT Roadmap-a European guide for the development and market introduction of PV-Thermal technology. Report EU-Project PV-Catapult /www. pvtforum. orgS.
- [3] **Radziemska E, Klugniann E**, 2002. Thermally affected parameters of the current- voltage characteristics of silicon photocell. *Energy Conversion Mgmt*, 43 (14) 1889-1900.
- [4] **Radziemska E**, 2003. The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells. *Renewable Energy*, 28 (1) 1-12.
- [5] **Nolay P**, 1987. Developpement d'une methode generale d'analyse des systemes photovoltaiques". MS Thesis, Ecole des Mines, Sophia-Antipolis, France.
- [6] **Myers D R, Emery K, Gueymard C**, 2002. Revising and validating spectral irradiance reference standards for photovoltaic performance. In: ASES/ASME solar, conference proceeding, Reno, Nevada, 15-20.
- [7] **Del J A CUETO**, 2002. comparison of energy production and performance from flat-plate photovoltaic module technologies deployed at fixed tilt. National renewable energy laboratory (nrel), 1617 cole boulevard, golden, co 80401.
- [8] **Bergene T & O. M. Lovvik**, 1995. Model calculation on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells, *Solar Energy*, 55 (6) 453-462.
- [9] **Kalogirou S. A & TRIPANAGNOSTOPOULOS Y**, 2007. Industrial application of PV/T solar energy systems. *Applied Thermal Engineering*, 27 (8-9) 1259-1270.
- [10] **Ibrahim A**, 2009. Hybrid photovoltaic thermal (PV/T) air and water based solar collectors suitable for building integrated applications. *American Journal of Environmental Sciences* 5 618–624.
- [11] **Hegazy AA**, 2000. Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collectors. *Energy Conversion Management*, 41 861-881.
- [12] **Kostic Lj T**, 2010. Optimal design of orientation of PV/T collector with reflectors. *Applied Energy*, 87 3023–9.
- [13] **Abhat A**, 1983. Low Temperature Latent Heat Thermal Storage: Heat Storage Materials. *Solar Energy* 30 (4) 313-332.
- [14] **Hasnain S. M**, 1998. Review on Sustainable Thermal Energy Storage Technologies, Part I: Heat Storage Materials and Techniques. *Energy Conversion & Management* 39 1127-38.

Bibliographie

- [15] **Korti** A. N, 2016. Numerical heat flow simulations on double-pass solar collector with MCP spheres media. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, 24 (2) 1-13. DOI: 10.1142/S2010132516500103
- [16] **Huang** M.J. Eames P.C, Norton B, 2004. Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials. *Int. J. Heat. Mass Transf.* 47 2715–2733.
- [17] **Ingersoll** J.G, 1986. Simplified calculation of solar cell temperatures in terrestrial photovoltaic arrays, *ASME J. Solar Energy Eng.*
- [18] **S. Krauter** S, Hanitsch R, Wenham S.R, 1994. Simulation of thermal and optical performance of PV modules, Part III, *Renew : Energy* 5.
- [19] **Adams** W. G. and R. E. Day 1877. The action of light on selenium in Royal Society. London 167 313-349.
- [20] **Chapin** D. M, Fuller C. S, Pearson P. L, 1954. A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power. *Journal of Applied Physics*, 25 676.
- [21] **Sayigh** A. A. M, 1991. Photovoltaic and Solar Radiation in Generating Electricity, from the Sun. F. C Treble, and Editor: BPCC Wheatons Ltd.
- [22] **Lalovic** B, 1986. A hybrid amorphous silicon photovoltaic and thermal solar collector. *Solar Cells*, 19 (2) 131-138.
- [23] **Wolf** M, 1976. Performance analyses of combined heating and photovoltaic power systems for residences. *Energy Conversion*, 16 (1-2) 79-90.
- [24] **Kern** JR. E.C & M. C. Russell, 1978. Combined photovoltaic and thermal hybrid collector systems, In Proc. 13th IEEE Photovoltaic Specialists, Washington DC, USA, 1153 - 1157 .
- [25] **Hendrie** S.D, 1979. Evaluation of combined photovoltaic / thermal collectors. In Proc. ISES Int. Congress, Atlanta, USA, 3 1865-1869.
- [26] **Raghuraman** P, 1981. Analytical predictions of liquid and air photovoltaic/thermal, flat-plate collector performance. *Journal Solar Energy Engineering*, 103 (2) 291-298.
- [27] **Cox** C. H & Raghuraman P, 1985. Considerations for flat-plate photovoltaic/thermal collector. *Solar Energy*, 35 (3) 227-241.
- [28] **Bhargava** A. K, 1991. Study of a hybrid solar system-solar air heater combined with solar cells. *Energy Convers. Mgmt* 31 471-479.
- [29] **Sopian** K, 1995. An investigation into the performance of a double pass photovoltaic thermal solar collector, In Proc. ASME Int. Mechanical Engineering Congress and Exhibition, San Francisco, USA, AES, 35 89-94.

Bibliographie

- [30] **Huang** B.J, 2001. Performance evaluation of solar photovoltaic / thermal systems, *Solar Energy*, 70 443 – 448.
- [31] **Zondag** H. A, 2002. The thermal and electrical yield of a PV-Thermal collector, *Solar Energy*, 72 (2) 113-128.
- [32] **Zondag** H. A, 2003. The yield of different combined PV-thermal collector designs, *Solar Energy*, 74 235 269.
- [33] **Zondag** H. A, 2008. Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12 (4) 891-959.
- [34] **Zondag** H. A. & al, 2005. PVT Roadmap-a European guide for the development and market introduction of PV-Thermal technology. Rapport EU-Project PV-Catapult, p 87.
- [35] **Tiwari** A & al, 2006. Performance evaluation of photovoltaic / thermal solar air collector for composite climate of India. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90 (2) 175-189.
- [36] **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.
- [37] **Fujisawa** T & T.Tani, 1997. Annual exergy evaluation on photovoltaic-thermal hybrid collector. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 47 135–48.
- [38] **Tripanagnostopoulos** Y, Nousia TH, Souliotis M, Yianoulis P, 2002. Hybrid PV/thermal solar systems. *Solar Energy*, 72 (3) 217–234.
- [39] **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.
- [40] **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.
- [41] **Kiran** S, U Devadiga, 2014. Performance Analysis of Hybrid Photovoltaic/Thermal Systems. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4 80-86.
- [42] **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.
- [43] **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.

Bibliographie

- [44] **Joshi** A.S., Tiwari A, 2007. Energy and exergy efficiencies of a hybrid photovoltaic thermal (PVT) air collector. *Renewable Energy*, 32 (13) 2223-2241.
- [45] **Aste** N, M. Beccali and G. Chiesa, 2002. Experimental evaluation of the performance of a prototype hybrid solar photovoltaic-thermal (PVT) air collector for the integration in sloped roof.
- [46] **Tonui** J. K, Y. Tripanagnostopoulos, 2008. Performance improvement of PVT solar collectors with natural air flow operation, *Solar Energy*, 82 1–12.
- [47] **Basant** Agrawal, G.N. Tiwari, 2010. Life cycle cost assessment of building integrated photovoltaic thermal (BIPVT) systems. *Energy and Buildings*, 42 1472–1481.
- [48] **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.
- [49] **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.
- [50] **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.
- [51] **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.
- [52] **Othman** M.Y, S.A. Hamid, M.A.S. Tabook, K. Sopian, M.H. Roslan, Z. Ibarahim, 2016. Performance analysis of PVT Combined with water and air heating system: An experimental study. *Renewable Energy*, 86 716-722.
- [53] **Di Su**, Yuting Jia, Xiang Huang, Guruprasad Alva, Yaojie Tang, Guiyin Fang, 2016. Dynamic performance analysis of photovoltaic–thermal solar collector with dual channels for different fluids, *Energy Conversion and Management*, 120 13–24.
- [54] **Hasila** Jarimi, Mohd Nazari Abu Bakar, Mahmud Othman, Mahadzir Hj Din, 2016. Bi-fluid photovoltaic/thermal (PVT) solar collector: Experimental validation of a 2D theoretical model. *Renewable Energy*, 85 1052-1067.
- [55] **Kostic** Lj T & al, 2010. Optimal design of orientation of PVT collector with reflectors. *Applied Energy*, 87 3023–9.
- [56] **Coventry** JS, 2005. Performance of a concentrating photovoltaic/thermal solar collector. *Solar Energy*, 78 211–22.

Bibliographie

- [57] **Monia** Chaabane, Wael Charfi, Hatem Mhiri, Philippe Bournot, 2013. Performance evaluation of concentrating solar photovoltaic and photovoltaic/thermal systems. *Solar Energy*, 98 315–321.
- [58] **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.
- [59] **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.
- [60] **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.
- [61] **Kazanci** OB, Skrupskelis M, Sevela P, Pavlov GK, Olesen BW, 2014. Sustainable heating, cooling and ventilation of a plus-energy house via PV/thermal panels. *Energy and Building*, 83 122–129.
- [62] **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.
- [63] **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.
- [64] **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.
- [65] **Al-Saadi** S.N, Z. Zhai, 2013. Modeling phase change materials embedded in building enclosure: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 21 659-73.
- [66] **Muhieddine** M, E. Canot, R. March, 2009. Various Approaches for Solving Problems in Heat Conduction with Phase Change materials. *International Journal of Finite Volumes*, 19.
- [67] **Dutil** Y, D.R. Rousse, N.B. Salah, S. Lassue, L. Zalewski, 2011. A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 112-30.

Bibliographie

- [68] **Tenchev** R.T, J.A. Mackenzie, T.J. Scanlon, M.T. Stickland, 2005. Finite element moving mesh analysis of phase change problems with natural convection. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 26 597-612.
- [69] **Eyres** N.R, D.R. Hartree, J. Ingham, R. Jackson, R.J. Sarjant, J.B. Wagstaff, 1946. The Calculation of Variable Heat Flow in Solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 240 1-57.
- [70] **Nedjar** B, 2002. An enthalpy-based finite element method for nonlinear heat problems insolving phase change materials. *Computers & Structures*, 80 9-21.
- [71] **Bonacina** C, G. Comini, A. Fasano, M. Primicerio, 1973. Numerical solution of phase-change materials problems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 16 1825-32.
- [72] **Kurnia** J.C, A.P. Sasmito, S.V. Jangam, A.S. Mujumdar, 2013. Improved design for heat transfer performance of a novel phase change material (PCM) thermal energy storage (TES). *Applied Thermal Engineering*, 50 896-907.
- [73] **Patankar** S.V, 1980. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere/McGraw-Hill, New York 1980.
- [74] **Versteeg** H.K and W.MalalasekerA, 1995. *An introduction to computational fluid dynamics, the finite volume method*. Longman Scientific & technical.
- [75] **Versteeg** H. K. & W. Malalasekera, 2007. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Harlow: Pearson Education Limited.
- [76] **Sarhaddi** F, S. Farahat, H. Ajam, A. Behzadmehr, M. Mahdavi Adeli, 2010. An improved thermal and electrical model for a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector, *Applied Energy*, 87 2328–2339.
- [77] **Mahajan** L, 1998. *Transport phenomena in high porosity metal foams* University of Colorado.
- [78] **Bergene** T and Lovvik OM, 1995. Model calculation on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells. *Solar Energy*, 55 (6) 453-62.
- [79] **McAdams** W.H, 1954. *Heat Transmission*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York.
- [81] **Pascal** Henry Biwole, Pierre Eclache and Frederic Kuznik, 2013. Phase-change materials to improve solar panel's performance, *Energy and Buildings*, 62 59–67.
- [82] **Joshi** A. S, A. Tiwari, G.N. Tiwari and I. Dincer, B.V. Reddy, 2009. Performance evaluation of a hybrid photovoltaic thermal (PV/T) (glass-to-glass) system, *International Journal of Thermal Sciences*, 48 154–164.