

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie
Département de Génie Mécanique



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en : Génie Mécanique
Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Energétique
Thème :

Refroidissement d'un panneau photovoltaïque en utilisant un matériau à changement de phase

Présenté Par :

- 1) M. AMAMRA Mohammed Amine
- 2) M. SEKMECHE Mohammed Aissam

Devant le jury composé de :

Dr. Remlaoui Ahmed	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr. Harchouche Zine El Abidine	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
Dr. Nehari Taieb	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
Melle. Zehouani Zahra Assala	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Co-Encadrante

Année Universitaire 2023/2024

Remerciement

En premier nous exprimons notre grande reconnaissance au DIEU le tout puissant et miséricordieux, d'avoir nous donner la force, la volonté, la patience et le courage durant toutes ces années d'études, d'avoir nous guider et aider pour achever ce travail après tant d'efforts déployés durant ces années.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance et nos sincères remerciements à notre encadreur : Dr. NEHARI Taieb, pour sa patience, ses encouragements ainsi que pour sa rigueur intransigeante qui nous a beaucoup appris. Nous remercions en lui l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer et sans qui cette mémoire n'aurait jamais vu le jour. Merci beaucoup Monsieur NEHARI.

Nous souhaitons adresser nos remerciements aux membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Nous tenons également à exprimer notre profonde gratitude à nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Enfin nous n'oublions pas d'adresser un remerciement chaleureux à tous ceux et celles de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce travail, nous dis merci.

Dédicaces

*Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie, nous
dédions ce travail :*

*À nos très chers, respectueux et magnifiques parents, pour qui nous
n'oublierons jamais leur grande affection, nos pères et mères qui nous
ont soutenus tout au long de notre vie par leur patience, leur amour et
leur encouragement tout au long de nos études.*

*À nos frères et sœurs, en témoignage de la fraternité, avec nos
souhaits de bonheur, de santé et de succès.*

À tous les membres de notre famille.

*En témoignage de notre sincère amitié, nous dédions ce mémoire à :
À tous nos très chers amis et collègues de la filière génie mécanique
énergétique.*

À tous nos professeurs qui nous ont enseignés.

À tous ceux qui nous sont chers et qui sont aujourd'hui absents.

Issam et Amine

Sommaire

Résumé

La demande mondiale croissante de solutions énergétiques durables a accru l'intérêt pour la technologie photovoltaïque (PV). Cependant, l'efficacité des panneaux photovoltaïques diminue considérablement avec la hausse des températures, ce qui pose un défi critique dans l'optimisation de leurs performances. Ce mémoire étudie une stratégie de refroidissement innovante pour les panneaux photovoltaïques utilisant les matériaux à changement de phase (MCP). L'étude se concentre sur la performance d'un seul MCP qui est le RT-25, en évaluant son efficacité dans le maintien des températures optimales des panneaux photovoltaïques. En outre, l'impact des ailettes sur l'efficacité de la régulation thermique est exploré en intégrant des ailettes dans le système de refroidissement à base de MCP. Cette recherche contribue au domaine des énergies renouvelables en fournissant une solution viable pour améliorer la performance et la durabilité des systèmes photovoltaïques, favorisant ainsi l'adoption de pratiques énergétiques plus efficaces et durables.

Mots clé : L'énergie solaire, panneaux photovoltaïque, convection naturelle, ANSYS Fluent.

Abstract

The growing global demand for sustainable energy solutions has increased interest in photovoltaic (PV) technology. However, the efficiency of photovoltaic panels decreases significantly with rising temperatures, posing a critical challenge in optimizing their performance. This thesis studies an innovative cooling strategy for photovoltaic panels using phase change materials (MCP). The study focuses on the performance of a single MCP which is the RT-25, evaluating its effectiveness in maintaining optimal temperatures of photovoltaic panels. In addition, the impact of fins on thermal regulation efficiency is explored by integrating fins into the MCP-based cooling system. This research contributes to the field of renewable energy by providing a viable solution to improve the performance and sustainability of photovoltaic systems, thus promoting the adoption of more efficient and sustainable energy practices.

Keywords: Solar energy, photovoltaic panels, natural convection, ANSYS Fluent.

ملخص

أدى الطلب العالمي المتزايد على حلول الطاقة المستدامة إلى زيادة الاهتمام بالتكنولوجيا الكهروضوئية. ومع ذلك، فإن كفاءة الألواح الكهروضوئية تنخفض بشكل كبير مع ارتفاع درجات الحرارة، مما يشكل تحديًا خطيرًا في تحسين أدائها. تدرس هذه الأطروحة استراتيجية تبريد مبتكرة للألواح الكهروضوئية باستخدام مواد تغيير الطور وتقييم فعاليتها في الحفاظ على درجات الحرارة المثلى للألواح الكهروضوئية. بالإضافة إلى ذلك، يتم استكشاف تأثير الزعانف على كفاءة التنظيم الحراري من خلال دمج الزعانف بأطوال في نظام التبريد القائم على مواد تغيير الطور. ويسهم هذا البحث في مجال الطاقة المتجددة من خلال توفير حل عملي لتحسين أداء واستدامة النظم الكهروضوئية، مما يعزز اعتماد ممارسات طاقة أكثر كفاءة واستدامة.

ANSYS Fluent

الكلمات المفتاحية: الطاقة الشمسية، الألواح الضوئية، الحمل الحراري الطبيعي،

Sommaire

Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
Introduction générale	

CHAPITRE I : Généralité sur les panneaux photovoltaïques

I. Introduction.....	22
II. L’Energie solaire.....	22
III. La conversion photoélectrique	23
IV. Les différents types de cellules photovoltaïque	25
Silicium polycristallin.....	25
Silicium monocristallin	26
Silicium amorphe en couche mince.....	26
Silicium amorphe en couche multi-jonctions	27
Les cellules non- silicium.....	28
V. Propriétés d’un panneau photovoltaïque.....	28
VI. L’influence de la température sur la conversion photoélectrique	31
VII. Thermo-fluidique des panneaux photovoltaïques	32
Stockage sous forme de chaleur sensible	32
Stockage par réaction thermochimique.....	33
VIII. Système de refroidissement des panneaux photovoltaïques.....	34
Techniques passives	34
Technique actives	35
Matériaux à changement de phase	36
IX. Conclusion	37

CHAPITRE II : Les matériaux à changement de phase

I. Introduction.....	39
II. La théorie de changement de phase	39
III. Le stockage de chaleur latente.....	40

Sommaire

IV. Les matériaux à changement de phase	41
V. Compositions des matériaux à changement de phase	41
Solide-solide.....	42
Solide-gaz et liquide-gaz.....	42
Solide-liquide	42
VI. Classification des matériaux a changement de phase	43
VII. Utilisation des matériaux à changement de phase dans les panneaux photovoltaïques.....	45
VIII. Refroidissement des panneaux photovoltaïques en utilisant les matériaux à changement de phase	46
VIII.1 En utilisant seulement les matériaux à changement de phase.....	46
Matériaux à changement de phase pure	46
Matériaux à changement de phase avec PV/T	47
VIII.2 Matériaux à changement de phase avec additifs.....	48
Matériaux à changement de phase avec ailettes.....	48
Matériaux à changement de phase avec nanoparticules.....	49
Matériaux à changement de phase métal poreux	50
IX. Critères de choix d'un matériau à changement de phase.....	50
X. Principaux défis liés à l'utilisation du PCM comme solution de refroidissement photovoltaïque.....	51
XI. Conclusion.....	52

CHAPITRE III : Modélisation numérique

I. Introduction.....	54
II. Qu'est-ce que la CFD.....	54
III. Définition de la méthode de résolution	54
IV. Les équations de NAVIER-STOKS.....	56
V. Présentation du logiciel de simulation « ANSYS Fluent »	57
V.1 Les différentes étapes à suivre pour la modélisation numérique.....	57
V.2 Création de la géométrie.....	58
V.3 Maillage.....	58
V.4 Le solveur Fluent.....	59
VI. Conclusion	62

CHAPITRE IV : Résultats et discussion

I. Introduction.....	64
----------------------	----

Sommaire

II. Procédure de la solution numérique	64
III. Etude du cas simple sans ailettes.....	65
IV. Etude du cas du système PV-PCM avec ailettes.....	69
Conclusion générale	
Bibliographie	

Liste des figures

CHAPITRE I :

Figure I.1 : L'énergie solaire.

Figure I.2 : Différentes parties d'un panneau photovoltaïque.

Figure I.3 : Classification des cellules photovoltaïques.

Figure I.4 : Panneau solaire en silicium polycristallin

Figure I.5 : Une image comparant une cellule en silicium polycristallin (à gauche) et une cellule en silicium monocristallin (à droite).

Figure I.6 : Cellule photovoltaïque amorphe.

Figure I.7 : Schéma représentant le fonctionnement d'une cellule multi-jonctions.

Figure I.8 : caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.

Figure I.9 : Tension de circuit ouvert.

Figures I.10 : Influence de la température sur la caractéristique I (V)

Figure I.11 : Stockage thermique par chaleur sensible.

Figures I.12: Stockage thermochimique couplé à un système solaire thermique.

Figure I.13 : Refroidissement passif de panneau photovoltaïque.

Figures I.14 : Capteur solaire thermique à eau

Figures I.15 : Quelques matériaux à changement de phase : pochettes, sphères, tubes, plaquettes.

CHAPITRE II :

Figure II.1 : Transformation représentée dans le diagramme des phases.

Figure II.2 : Profil de changement de phase pour le stockage par chaleur latente (Solide/liquide).

Figure II.3 : Matériau à changement de phase.

Figure II.4 : Matériau à changement de phase solide-solide.

Liste des figures

Figure II.5 : Classification des matériaux a changement de phase.

Figure II.6 : Exemple d'un matériau à changement de phase organique.

Figure II.7 : Schéma du principe de fonctionnement du système PV-PCM.

Figure II.8 : Schéma du système PVT-PCM.

Figure II.9 : Schéma du PV/PCM avec plaque d'aluminium.

Figure II.10 : Schéma du système avec tuyau d'écoulement PCM et nano-fluide.

CHAPITRE III :

Figure III.1 : Volume de contrôle bidimensionnel.

Figure III.2 : Vue générale sur ansys fluent.

Figure III.3 : Géométrie du problème par logiciel ANSYS FLUENT.

Figure III.4 : Maillage du panneau solaire dans ANSYS meshing.

Figure III.5 : Nomination des surfaces.

Figure III.6 : Fenêtre de lancement FLUENT.

Figure III.7. Etablir équation d'énergie.

Figure III.8 : Définition des caractéristique thermo-physique des fluides.

Figure III.9 : Conditions aux limites.

Figure III.10 : Initialisation du calcul sur Ansys fluent.

CHAPITRE IV :

Figure IV.1 : Schéma du système PV/PCM sans ailettes : a) Géométrie et conditions aux limites ; b) Maillage utilisé.

Figure IV.2 : Comparaison entre les températures prédites par le présent modèle numérique et les données de Huang, 2004 au front du Panneau pour le cas sans ailettes

Figure IV.3 : Effet de l'inclinaison sur les isothermes pour le cas sans ailettes

Figure IV.4 : Effet de l'inclinaison sur la température du Front pour le cas simple sans ailettes du système PV-PCM.

Liste des figures

Figure IV.5 Schéma du système PV/PCM avec des ailettes internes : a) transfert de chaleur et conditions aux limites ; b) Géométrie du système pour le cas $L=30\text{mm}$.

Figure IV. 6 : Maillage utilisé pour le système PV/PCM : (a) avec ailettes avant et (b) avec ailettes avant-arrière

Figure IV.7: Comparaison entre les contours de température prédit numériquement et ceux mesurée par « Huang et Al » au cours de la 50^e minute

Figure IV.9: Isothermes et distribution de la fraction liquides dans le système PV-PCM à la minute 50^{eme} pour le cas sans ailettes ($L=0\text{mm}$).

Figure IV.10 : Les isothermes pour différentes configurations du système PV/PCM avec ailettes à la 50^{eme} minute.

Figure IV.11: L'évolution de la température au cours du temps pour différentes configurations à ailettes à deux endroits : a) le point avant et b) Le point interne.

Liste des tableaux

CHAPITRE I

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients de l'énergie solaire.

Tableau I.2 : Avantages et les inconvénients du système solaire photovoltaïque.

CHAPITRE II

Tableau II.1 : Liste de quelques eutectiques.

CHAPITRE IV

Tableau IV.1 : Propriétés Thermo-physiques de "RT25"

Tableau IV.2 : Effet du maillage sur la température de l'avant.

Tableau IV.3 : Effet du maillage sur la température de l'avant (le point Pf), et à l'intérieur du MCP (le point Pint) pour la configuration $L=30\text{mm}$.

Nomenclature

PV : panneau photovoltaïque.

MCP : matériau à changement de phase.

BV : bande de valence.

BC : bande de conduction.

SI : silicium.

GE : le germanium.

SE : le sélénium.

CdTe : le tellure de cadmium.

GaAs : l'arséniure de gallium.

EPH : les photons d'énergie.

P : Dopage type P

I : Courant de la cellule A.

I_0 : Courant de la saturation A.

P_{max} : Point de puissance maximale

V_{max} : Tension qui correspond à la puissance maximale (V).

I_{max} : Courant qui correspond à la puissance maximale (A).

FF : Le facteur de forme.

I_{sc} : Le courant de court-circuit (A).

η : Le Rendement énergétique.

C_c : constante.

I_{cc} : Courant de court-circuit.

I_{ph} : Courant photo-généré par le générateur solaire sous éclairement.

L_b : Courant de saturation.

V_{oc} : La tension en circuit ouvert (V).

R_s : la résistance série.

R_p : la résistance parallèle.

Nomenclature

M : la masse du matériau [kg].

$R_s(\lambda)$: est la réponse spectrale, exprimée en A/W.

$(\lambda) P$: l'éclairement monochromatique global, exprimé en W/m².

$J_{se}(\lambda)$: Est le courant de court-circuit, exprimé en A/cm².

$R(\lambda)$: est le coefficient de réflexion du silicium.

ρ : Densité (kg/m³).

β : Coefficient de dilatation thermique (k⁻¹).

μ : Viscosité dynamique (kg/m .s).

$\rho g \beta(T)$: le terme de l'approximation de Boussinesq.

m : Masse.

T : est la température de l'objet.

K : est une constante positive.

T_a : est la température de l'environnement.

γ : est la chaleur latente en kJ/kg.

h_i : l'enthalpie massique initiale [j/kg].

h_f : l'enthalpie massique finale [k/kg].

T_i : la température initiale [°k].

T_f : la température finale [°k].

C_p : la chaleur spécifique à pression constante du matériau [j/°k].

L_f : la chaleur latente de changement de phase pour un changement de phase Liquide/Solide.

L_v : la chaleur latente de changement de phase pour un changement de phase Liquide/vapeur.

ρ : La masse volumique du fluide.

ν : Viscosité cinématique m² /s.

$\frac{\partial u}{\partial t}$: Le changement de la vitesse dans le temps.

Nomenclature

$(\bar{U}\nabla) \bar{U}$: La vitesse et la direction de déplacement du fluide.

$u\Delta\bar{U}$: La viscosité du fluide.

∇p : Le gradient de la pression interne.

ρg : La force de volume.

Introduction

générale

Introduction générale

Dans la poursuite de solutions énergétiques durables, les panneaux photovoltaïques (PV) sont devenus une technologie essentielle pour exploiter l'énergie solaire et réduire la dépendance aux combustibles fossiles traditionnels. Cependant, l'efficacité et la performance des panneaux photovoltaïques sont intrinsèquement liées à leurs températures de fonctionnement, qui peuvent fluctuer considérablement en raison des conditions environnementales et de l'intensité du rayonnement solaire. Les températures élevées diminuent non seulement l'efficacité de conversion énergétique des cellules photovoltaïques, mais accélèrent également la dégradation, entraînant une diminution de la durée de vie et de la fiabilité des panneaux.

En réponse à ces défis, l'intégration de matériaux à changement de phase (PCM) à des fins de refroidissement est devenue une stratégie prometteuse pour améliorer la gestion thermique des systèmes photovoltaïques. Les matériaux à changement de phase possèdent la capacité unique de stocker et de libérer de la chaleur latente pendant le processus de transition de phase, régulant efficacement les fluctuations de température et maintenant des conditions de fonctionnement optimales pour les panneaux photovoltaïques. En utilisant les PCM comme moyen de stockage d'énergie thermique, il est possible d'atténuer les pics de température et d'améliorer l'efficacité globale de la conversion énergétique, maximisant ainsi les performances et la longévité des installations photovoltaïques.

Ce mémoire vise à explorer le potentiel des systèmes de refroidissement des matériaux à changement de phase pour améliorer l'efficacité et la fiabilité des panneaux photovoltaïques, ainsi que l'impact d'utilisation des ailettes sur ce dernier. Composée de quatre chapitres, cette étude explore divers aspects liés à l'utilisation des PCM pour le refroidissement des panneaux photovoltaïques, allant des principes fondamentaux aux techniques avancées de modélisation et de simulation. En élucidant les mécanismes sous-jacents et en effectuant des analyses détaillées, cette recherche vise à fournir des informations précieuses sur la conception, l'optimisation et la mise en œuvre de stratégies de refroidissement basées sur PCM pour les applications photovoltaïques.

Grâce à une approche multidisciplinaire combinant les principes de la thermodynamique, de la science des matériaux et de la dynamique des fluides computationnelle, ce mémoire

Introduction générale

s'efforce de contribuer à l'avancement des technologies énergétiques durables et d'ouvrir la voie vers un avenir énergétique plus propre et plus résilient. Il est constitué de quatre chapitres :

Chapitre 1 : Généralités sur les panneaux photovoltaïques
Le premier chapitre fournit une vue d'ensemble des panneaux photovoltaïques, couvrant leurs principes fondamentaux de fonctionnement, les composants et les paramètres de performance clés. En outre, il examine l'impact de la température sur l'efficacité des panneaux photovoltaïques et introduit la nécessité de stratégies de refroidissement efficaces.

Chapitre 2 : Matériaux à changement de phase
Le chapitre 2 se concentre sur les matériaux à changement de phase, en élucidant leurs propriétés, leur classification et leurs applications dans le stockage et la régulation de l'énergie thermique. Une attention particulière est accordée à l'aptitude des PCM pour le refroidissement des panneaux photovoltaïques, soulignant leur capacité à absorber et à libérer de la chaleur latente pendant les transitions de phase.

Chapitre 3 : Modélisation avec ANSYS Fluent
Le chapitre 3 se penche sur l'aspect modélisation en utilisant ANSYS Fluent, un logiciel de dynamique des fluides computationnelle (CFD) réputé pour ses capacités à simuler des phénomènes de transfert de chaleur et d'écoulement de fluide. Ce chapitre traite des caractéristiques d'ANSYS Fluent pertinentes pour les simulations de refroidissement de panneaux photovoltaïques et décrit la méthodologie utilisée dans la modélisation des systèmes de refroidissement basés sur PCM.

Chapitre 4 : Résultats et discussion
Le dernier chapitre présente les résultats des simulations réalisées avec ANSYS Fluent. Il examine la performance thermique des panneaux photovoltaïques refroidis par PCM dans diverses conditions de fonctionnement, avec et sans utilisations des ailettes. En outre, ce chapitre fournit des informations sur l'efficacité des stratégies de refroidissement basées sur PCM et identifie les opportunités d'optimisation supplémentaire.

Essentiellement, ce mémoire s'efforce de contribuer à l'avancement des technologies énergétiques durables en élucidant le potentiel des matériaux à changement de phase pour améliorer l'efficacité et la longévité des panneaux photovoltaïques. Grâce à une analyse et

Introduction générale

une simulation complète, cette étude vise à offrir des informations précieuses sur la conception et le fonctionnement optimaux des systèmes photovoltaïques refroidis par PCM.

Chapitre I :
Généralité sur les
panneaux
photovoltaïques

I. Introduction

La demande croissante d'énergie et l'épuisement des combustibles fossiles dans le monde poussent tous les gouvernements à dépendre des énergies renouvelables. La conversion de l'énergie solaire photovoltaïque est un processus de conversion en une étape qui génère de l'énergie électrique à partir de l'énergie solaire.

La conception de systèmes photovoltaïques efficaces et fiables nécessite de comprendre à la fois l'art et la science du photovoltaïque et d'appliquer les compétences, les stratégies et les techniques nécessaires pour atteindre les objectifs de conception et de conception spécifiques.

Dans ce chapitre, un aperçu sur l'énergie solaire et les systèmes photovoltaïque est présenté. On y explore les différents types des cellules photovoltaïque, leurs propriétés, ainsi que les divers systèmes de refroidissement des panneaux photovoltaïques.

II. L'énergie solaire

L'énergie solaire est la conversion de l'énergie du soleil en électricité, soit directement en utilisant le photovoltaïque (PV), soit indirectement en utilisant l'énergie solaire concentrée, ou une combinaison des deux. Les systèmes d'énergie solaire concentrée utilisent des lentilles ou des miroirs et des systèmes de suivi pour concentrer une grande zone de lumière solaire en un petit faisceau. Les cellules photovoltaïques convertissent la lumière en courant électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Les matériaux photovoltaïques comprennent le silicium (le plus important), les composés semi-conducteurs (film épais) et une combinaison de ceux-ci de cellules multi-jonctions. [1]



Figure I.1 : L'énergie solaire.

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients de l'énergie solaire. [2]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">➤ Permet de chauffer de l'eau "gratuitement" après retour sur investissement,➤ Ce qui peut se révéler intéressant pour des collectivités qui voudraient➤ Maîtriser leurs dépenses telles que les piscines très énergivores;➤ Source d'énergie inépuisable ;➤ Gros potentiel de développement➤ Rendement élevé (jusqu'à 80%)	<ul style="list-style-type: none">➤ Généralement limité au chauffage de l'eau chaude sanitaire ;➤ L'énergie solaire thermique reste une énergie coûteuse par rapport au➤ Chauffage par énergie fossile à cause d'investissements assez lourds.➤ Retour sur investissement assez long (en moyenne 10 à 15 ans).➤ Durée de vie des panneaux généralement limitée à 20 ans.➤ Certains panneaux sont très sensibles et peuvent être endommagés par certaines conditions météorologiques (grêle, gel...)

III. La Conversion Photovoltaïque

La production d'énergie photovoltaïque est une technologie utilisant l'effet photovoltaïque de l'interface d'un semi-conducteur et transformant l'énergie lumineuse directement en énergie électrique. Les cellules solaires constituent l'élément clé le plus important de cette technologie. Après une série de cellules solaires encapsulées, il pourrait former un module de cellules solaires de grande surface, couplé au contrôleur de puissance et à d'autres composants pour former un dispositif de système photovoltaïque.

Une cellule solaire est un dispositif dont la fonction principale est de transformer l'énergie lumineuse directement en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Ses caractéristiques électriques, qui incluent le courant, la tension ou la résistance, diffèrent selon l'exposition à l'énergie lumineuse provenant de n'importe quelle source, naturelle ou artificielle. Les cellules solaires forment des modules photovoltaïques. Ils ont un certain nombre d'applications. Ils sont utilisés dans l'industrie solaire photovoltaïque comme éléments constitutifs des modules solaires ; comme photodétecteurs pour l'allumage automatique des lampadaires et autres appareils sensibles à la lumière, et comme capteurs de lumière pour la recherche scientifique. [3]

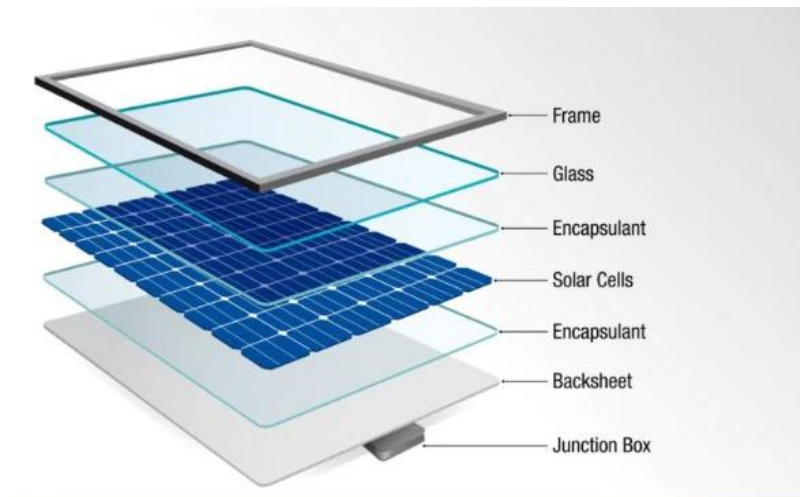


Figure I.2 : Différentes parties d'un panneau photovoltaïque. [1]

Tableau I.2 : Avantages et les inconvénients du système solaire photovoltaïque. [2]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Energie électrique non polluante à l'utilisation et s'inscrit dans le principe de développement durable ➤ Source d'énergie renouvelable car inépuisable à l'échelle humaine ➤ Utilisables soit dans les pays en voie de développement sans réseau électrique important soit dans des sites isolés tels qu'en montagne où il n'est pas possible de se raccorder au réseau électrique national 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Coût dépendant de la puissance de crête ; ➤ Le rendement actuel des cellules photovoltaïques reste assez faible et donc ne délivre qu'une faible puissance ; ➤ Marché très limité mais en développement ; ➤ Production d'électricité ne se fait que le jour alors que la plus forte demande chez les particuliers se fait la nuit ; ➤ Le stockage de l'électricité est quelque chose de très difficile avec les technologies actuelles (coût écologique des batteries très élevé) ➤ Pollution à la fabrication : certaines études prétendent que l'énergie utilisée pour la fabrication des cellules n'est jamais rentabilisée durant les 20 années de production ; Même en fin de vie, le recyclage des cellules pose des problèmes environnementaux.

IV. Les différents types de cellules photovoltaïques

Il existe plusieurs familles de cellules photovoltaïques, les plus répandues sont à base de silicium cristallin, silicium monocristallin, silicium polycristallin et silicium en couches minces. Les cellules à base de silicium cristallin représentent 90 % du marché mondial. Les rendements des cellules renseignés ici sont obtenus en prenant en compte le rayonnement direct et le rayonnement diffus à une altitude de 0 m et avec un angle de pénétration des rayons lumineux de 48° sous une température fixe de 25 °C. Le flux solaire reçu moyen pendant les tests est de 1000 W/m². [2]

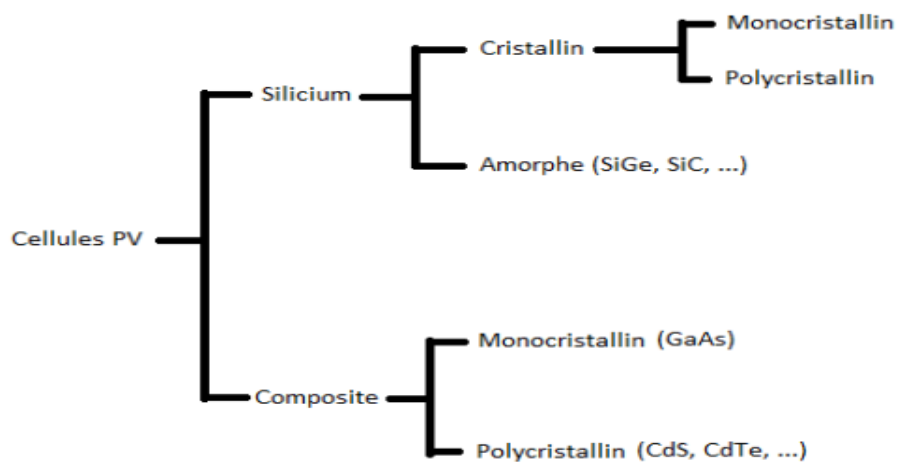


Figure I.3 : Classification des cellules photovoltaïques. [2]

IV.1 Silicium polycristallin

La structure de silicium polycristallin se situe entre celle du silicium monocristallin et celle du silicium amorphe. Elle est constituée de grains dont la taille varie de quelques centaines de nanomètres à quelques millimètres suivant les conditions d'élaboration, séparés entre eux par des joints de grains [4]. Alternative moins chère mais moins efficace, les cellules photovoltaïques en silicium polycristallin dominent le marché mondial, représentant environ 70 % de la production photovoltaïque mondiale en 2015.



Figure I.4 : Panneau solaire en silicium polycristallin. [4]

IV.2 Silicium monocristallin

Les premières cellules solaires disponibles dans le commerce étaient fabriquées à partir de silicium monocristallin, une forme de silicium extrêmement pure. Pour les produire, un cristal germe est extrait d'une masse de silicium fondu, créant un lingot cylindrique avec une structure de réseau cristallin unique et continue. Ces cellules sont en général octogonales et d'une couleur uniforme foncée (bleu marine ou gris). [5]

Les cellules en silicium monocristallin sont très efficaces, elles offrent le meilleur rendement parmi les panneaux solaires disponibles dans le commerce : entre 13 à 15%. Il faudra donc moins de cellules pour atteindre la puissance désirée, mais comme le silicium monocristallin est aussi le plus cher, son seul avantage est finalement d'utiliser une surface réduite : il faut environ 7m² pour obtenir 1 kilowatt Crête (kWc) [4].

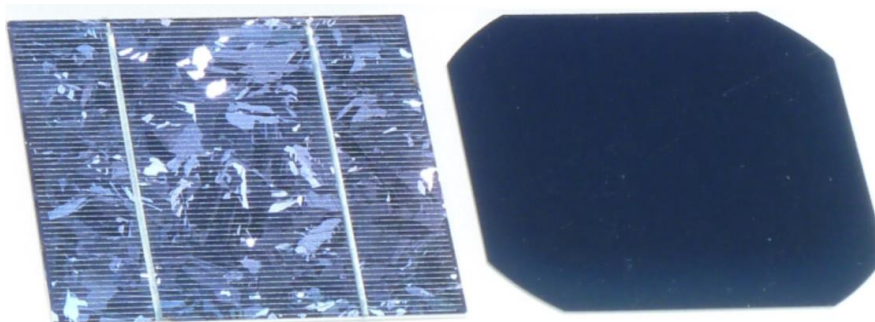


Figure I.5 : Une image comparant une cellule en silicium polycristallin (à gauche) et une cellule en silicium monocristallin (à droite). [4]

IV.3 Silicium amorphe en couche mince

Le silicium amorphe est utilisé pour fabriquer des cellules photovoltaïques en silicium à couche mince. Le silicium est déposé en une fine couche homogène sur une surface comme le

verre ou le caoutchouc pour constituer les cellules de silicium amorphe. Les cellules à couches minces ne sont pas très efficaces et le rendement varie en moyenne autour de 6 %. De plus, la puissance diminue très rapidement au cours des premiers mois d'utilisation. Cependant, le silicium amorphe peut être déposé sur une large gamme de surfaces et le rend idéal pour les surfaces courbes, comme le montre la figure, et pour une intégration directe sur les matériaux de toiture. Il est également largement utilisé dans l'électronique grand public et les applications nécessitant de faibles besoins en énergie.[6]

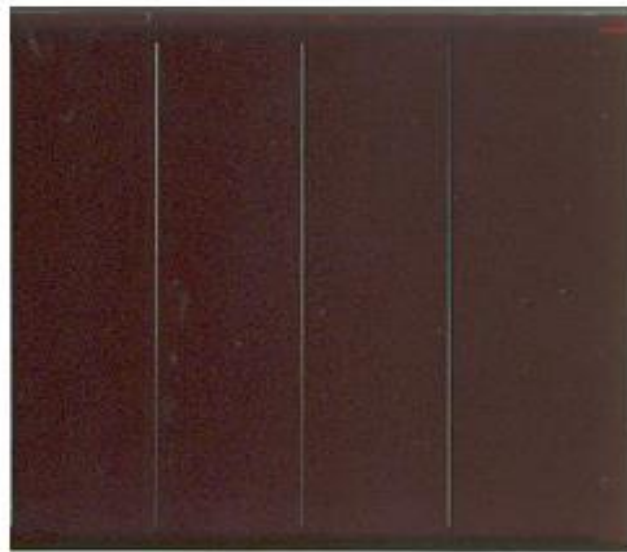


Figure I.6 : Cellule photovoltaïque amorphe. [7]

IV.4 Les cellules multi-jonctions

La figure ci-dessous représente un schéma de l'énergie du « gap » des matériaux semi-conducteurs bleu, vert et rouge. Une cellule multi-jonctions permet d'exploiter l'énergie d'un plus grand nombre de photons et de conserver une grande tension aux bornes de la cellule. Les photons doivent traverser en premier le matériau avec le plus grand « gap » puis des matériaux avec des « gaps » de plus en plus faibles. Ainsi, une plus grande partie du spectre solaire peut être exploitée et les rendements sont significativement supérieurs aux cellules à une seule jonction. Des rendements de plus de 40 % ont déjà été observés et une cellule à triple jonction peut atteindre des rendements de plus de 30 %. 19 Le frein au développement de ces cellules est pour l'instant leur coût très supérieur aux cellules à une seule jonction à base de silicium. [8]

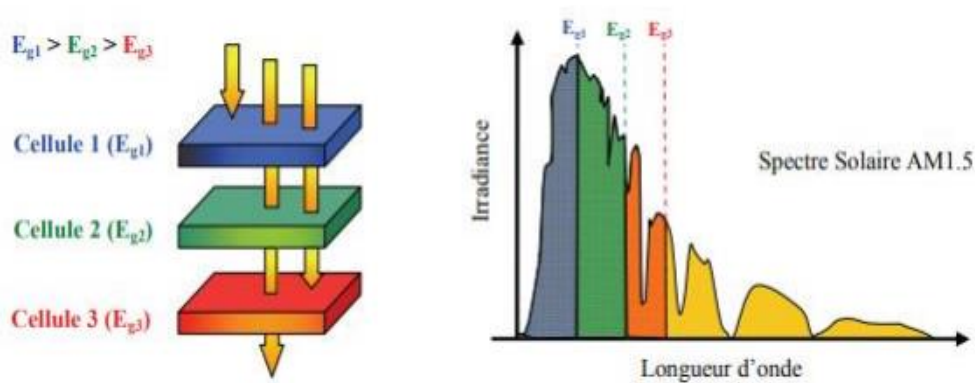


Figure I.7 : Schéma représentant le fonctionnement d'une cellule multi-jonctions. [8]

IV.5 Les cellules non-silicium

Le tellure de cadmium et les alliages cuivre-indium / gallium-sélénium sont les matériaux semi-conducteurs les plus répandus après le silicium. Ils sont mieux adaptés que le silicium à l'application en couches minces et ils permettent d'obtenir des rendements de 19,9 % en laboratoire et de 12 % pour les modules commerciaux.

Pour conclure, les différentes cellules photovoltaïques vues précédemment ont des caractéristiques différentes et des rendements différents mais elles trouvent toutes leurs applications dans la production d'électricité. Cependant, nous pouvons relever une différence qui nous intéressera par la suite, les cellules photovoltaïques à base de silicium cristallin ont une baisse de rendement de conversion de 0,45 % par augmentation de la température de 1°C (61). Alors que les cellules de silicium amorphe en couches minces ont une augmentation de 0,175 % de leur rendement par augmentation de la température de 1°C. [9]

V. Propriétés d'un panneau photovoltaïque

Les cellules solaires photovoltaïques convertissent la lumière du soleil en électricité, produisant environ 1 watt en plein soleil. Afin de comprendre la technologie photovoltaïque, nous devons comprendre ses principales propriétés au niveau des cellules, telles que l'effet photovoltaïque, la jonction P-N pour simplement^{bd} convertir la lumière en électricité, et comment les performances photovoltaïques sont mesurées en termes de la courbe de courant et de tension (I-V), du facteur de remplissage (FF) et de l'efficacité.[10]

V.1 Caractéristique courant-tension

Chapitre I : Généralité sur les panneaux photovoltaïques

Une cellule solaire reliée à une résistance électrique et qui est soumise à l'éclairement solaire débite un courant qui va se répartir entre la résistance et sa structure interne de la diode. Sa caractéristique $I(V)$ correspond à la soustraction du photo-courant et du courant de la diode à l'obscurité.[7]

$$I(V)=I_{ph}-I(V)=I_{ph} - I_d [\exp(V/Vt) - 1] \dots\dots\dots (I.1)$$

Pour une température de jonction et un éclairement donné, une cellule solaire n'impose ni la tension, ni le courant généré, seule la courbe $I(V)$ est imposée, c'est-à-dire seule la relation liant le courant à la tension est fixée. La caractéristique courant-tension, illustrée dans la figure V.1, décrit le comportement de la cellule photovoltaïque sous l'influence des conditions météorologiques (niveau d'éclairement et température ambiante). [7]

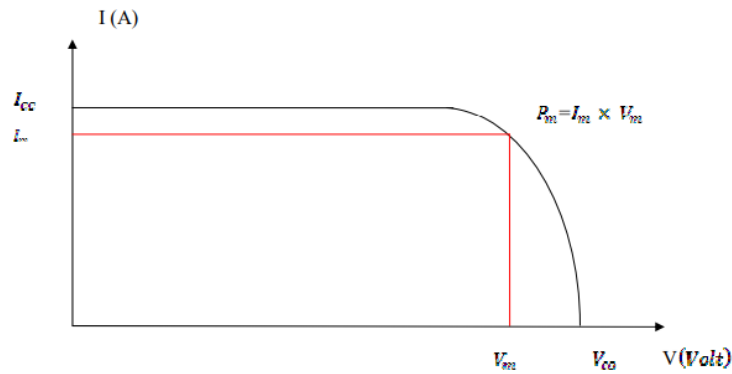


Figure I.8 : Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque. [11]

V.2 Courant de court-circuit (I_{cc})

Le courant maximal fourni par le panneau photovoltaïque lorsque les connecteurs de sortie sont court-circuités ensemble (condition de court-circuit). Cette valeur est beaucoup plus élevée que I_{max} qui se rapporte au courant normal du circuit de fonctionnement. [12]

$$I_{cc} = I_{ff} - I_s \left[\frac{u^{q(v+L_b)}}{kt - 1} \right] - \frac{(V+K.I_s)}{K} \dots\dots\dots (I.2)$$

Où :

I_{ph} : Courant photo-généré par le générateur solaire sous éclairement.

L_b : Courant de saturation.

R_s : : résistance série du générateur solaire.

R_{sh} : résistance shunt du générateur solaire.

Pour un niveau d'éclairement standard (égale à 1 kW/m²), lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, l'effet de la résistance série est négligeable (point I_{cc} de la figure I.6). Dans ce cas, le courant de court-circuit peut être considéré comme étant équivalent au photo-courant I_{ph} , c'est-à-dire proportionnel à l'éclairement :

$$I_{cc} = I_{ph} = C_c \dots \dots \dots (I.3)$$

C_c : constante

V.3 Tension de circuit ouvert

C'est la tension aux bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit ouvert, c'est-à-dire lorsque le pôle + et le pôle - sont isolés électriquement de tout autre circuit électrique (le courant la traversant est alors nul). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule $P = U \times I$ est nulle.[13]

$$V = Kt/q \ln [1 + (I_{ph} / I_s)] \dots \dots \dots (I.4)$$

Elle correspond à la chute de tension aux bornes de la jonction PN, lorsqu'elle est traversée par le photo-courant I_{ph} . [15]

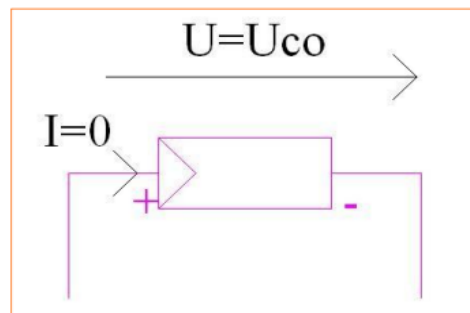


Figure I.9 : Tension de circuit ouvert. [11]

V.4 Puissance maximale

Une cellule PV possède un point pour lequel sa puissance débitée est maximum. Ce point est tangent à une courbe d'iso puissance. On la nomme P_{max} . La puissance entre ces deux points est positive et le point de puissance maximum (PPM) de coordonnées obtenues pour : [12]

$$V=V_{\text{met}} \quad I=I_m \quad \text{telle que } K_m=V_m \cdot I_m \dots\dots\dots (I.5)$$

V.5 La réponse spectrale Une cellule photovoltaïque

La réponse spectrale est la valeur du courant de court-circuit J de la cellule par unité de flux monochromatique incident.

$$R_s(\lambda) = \frac{J_{se}(\lambda)}{Pg(\lambda)} \dots\dots\dots (I.6)$$

Où :

$R_s(\lambda)$ est la réponse spectrale, exprimée en A/W.

(λ) P l'éclairement monochromatique g global, exprimé en W/m².

$J_{se}(\lambda)$ Est le courant de court-circuit, exprimé en A/cm².

La réponse spectrale interne est la valeur du courant de court-circuit de la cellule, par unité de flux monochromatique traversant la surface de la cellule.

$$R_{\text{sint}}(\lambda) = \frac{J_{se}(\lambda)}{Pg(\lambda)(1-R(\lambda))} \dots\dots\dots (I.7)$$

Où

$R(\lambda)$ est le coefficient de réflexion du silicium. La photo courante collecté à chaque longueur d'onde relative au nombre de photons incidents sur la surface à cette même longueur d'onde détermine la réponse spectrale du dispositif. [13]

V.6 Le rendement énergétique (efficacité)

Le rendement d'une photopile est le rapport entre l'énergie électrique qu'elle fournit et l'énergie du rayonnement reçue, c'est-à-dire le rapport :

$$\eta = \frac{E_{\text{électrique}}}{E_{\text{lumineuse}}} \dots\dots\dots (I.8)$$

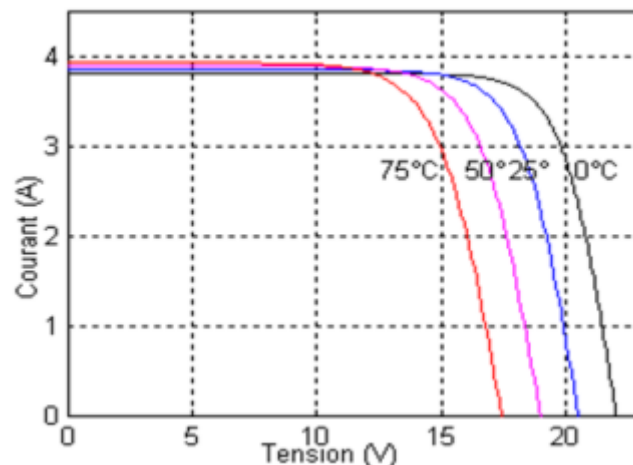
On peut évaluer l'énergie lumineuse par le produit scalaire de l'irradiation (kWh/m²) et de la surface de la cellule (m²). Le rendement de la cellule dépend de plusieurs facteurs qui correspondent à des pertes qui se résument en deux types, certaines sont dites fondamentales, d'autres sont de nature technologique.

VI. L'influence de la température sur la conversion photoélectrique

La température a une influence considérable sur le comportement de la cellule et donc sur son rendement. Cette influence se traduit principalement par une diminution de la tension générée (et une très légère augmentation du courant).[16]

Suivant les modèles, ce comportement induit, par degré, une perte de 0.5 % du rendement par rapport au rendement maximum de la cellule. On comprendra donc tout l'intérêt d'une ventilation correcte à l'arrière des panneaux ![16]

L'influence de la température est très significative, ce qui nous conduit à une considération soigneuse, lors de la mise en marche des systèmes photovoltaïques. Sur la Figure 8, on illustre l'effet de la température sur le comportement des photopiles. Elle montre une diminution considérable de la tension électrique délivrée avec l'augmentation de la température. Tandis que, le courant gagne quant à lui un petit peu de l'intensité. Ceci peut être expliqué par la baisse du gap, ce qui provoque l'accroissement de la concentration des porteurs de charge, puisque la transition entre les niveaux devienne plus probable.[16]



Figures I.10 : Influence de la température sur la caractéristique I (V). [15]

VII. Thermo fluide des panneaux photovoltaïques

Le stockage thermique est une grande composante du stockage d'énergie, Il est utilisé de plusieurs manières différentes, notamment, sensible et latente.

VII.1 Stockage sous forme de chaleur sensible

Le stockage par chaleur sensible permet de fournir, par le biais d'un flux thermique, de l'énergie à un support de stockage dont la température est différente de celle de l'environnement. Il utilise la chaleur sensible du matériau de stockage, ce qui implique que la température du moyen de stockage augmente avec la chaleur transférée. Ce type de stockage non isotherme, accumule une quantité de chaleur dans le matériau qui est proportionnelle à sa masse et à sa capacité calorifique. [17]

La quantité d'énergie thermique pouvant être stockée dépend de la capacité thermique spécifique du matériau de stockage, des dimensions du système de stockage et de la différence de température par rapport à l'environnement. [17]

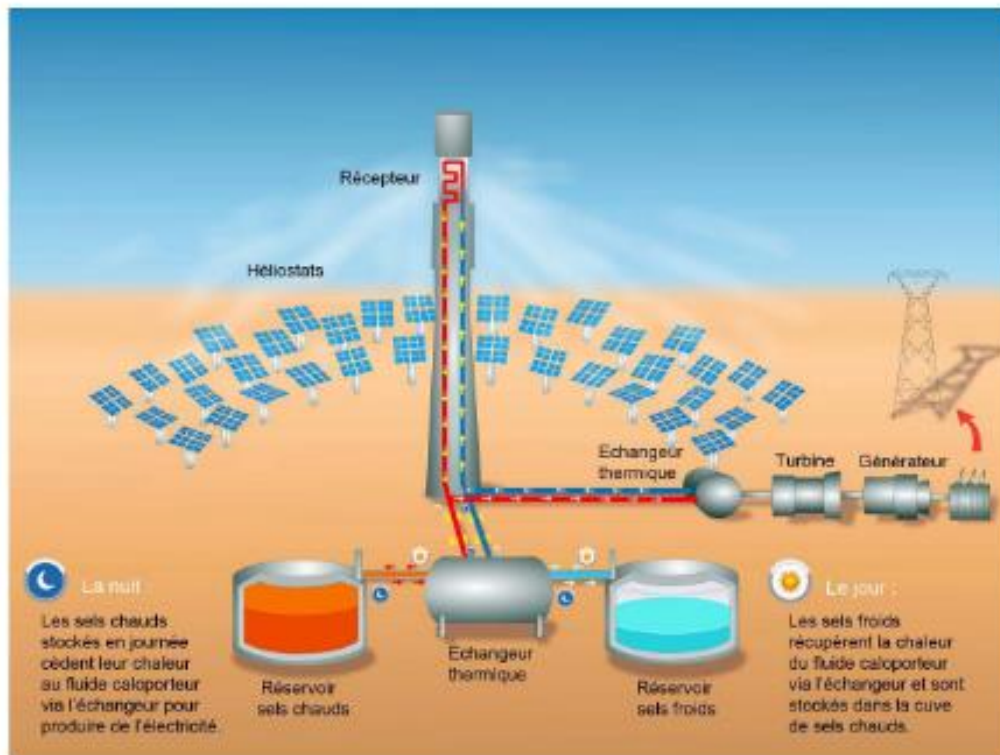
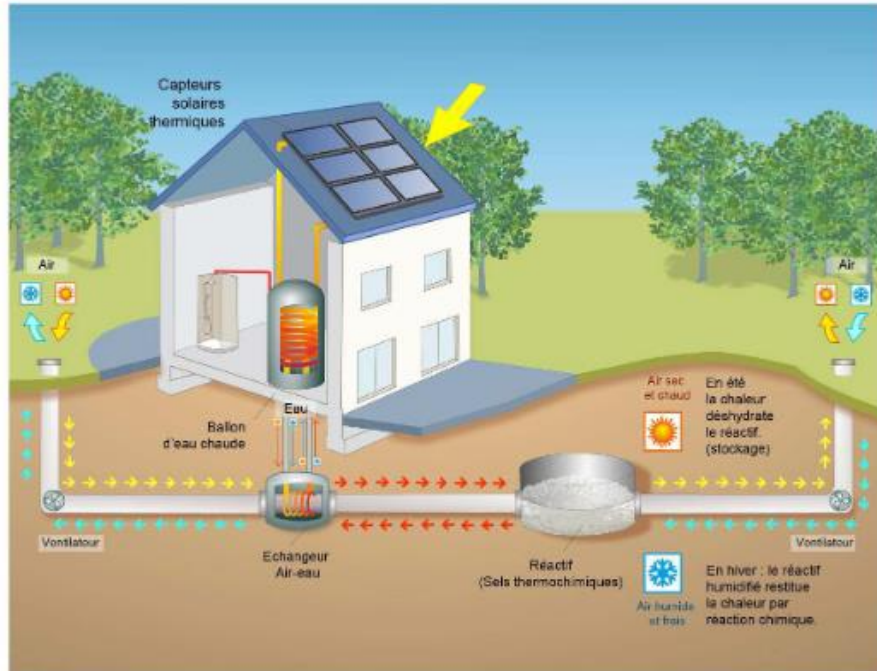


Figure I.11 : Stockage thermique par chaleur sensible. [17]

VII.2 Stockage d'énergie thermique par voie thermochimique

Le terme de stockage thermochimique recouvre deux phénomènes : la sorption et la réaction chimique. Le stockage de chaleur par sorption est intéressant pour le stockage basse température ($T \approx 80 \text{ }^\circ\text{C}$) tandis que pour des applications de type solaire concentré ($T \approx 200$ à $1000 \text{ }^\circ\text{C}$), ce sont les réactions de synthèse chimique qui semblent être les plus adaptées. La Figure I-6 présente la classification des systèmes de stockage par sorption et par réaction chimique.

Les gammes de température de stockage pour une application dans une centrale solaire thermodynamique sont de l'ordre de 300 à 550°C. Ainsi, seuls les phénomènes de stockage thermo-chimique sans sorption seront étudiés.[18]



Figures I.12 : Stockage thermo-chimique couplé à un système solaire thermique. [19]

VIII. Système de refroidissement des panneaux photovoltaïques

Chaque système électrique doit être équipé d'un dispositif de refroidissement. Surtout les panneaux photovoltaïques. Pour éviter les dommages et la détérioration des performances dus aux températures élevées, de nombreux systèmes ont été inventés pour refroidir les panneaux photovoltaïques. Les systèmes présentés sont divisés en deux types : Des systèmes actifs et des systèmes passifs.

VIII.1 Techniques passifs

Ce type de refroidissement permet un transfert thermique en utilisant un fluide caloporteur mis en circulation dans un circuit fermé grâce à une pompe mécanique. Le coefficient de transfert thermique par unité de surface dépend du fluide caloporteur. Il est plus important pour l'eau et peut être jusqu'à 100 fois plus grand que pour l'air en outre, l'eau a une chaleur spécifique qui est quatre fois plus grande que celle de l'air. [20]

Dans les systèmes de refroidissement par air, la chaleur est transférée à l'air ambiant qui est ensuite remplacé par l'air frais. Lors du refroidissement par un liquide, une boucle fermée est

utilisée dans laquelle le fluide de refroidissement doit être refroidi ; ceci est accompli généralement par un échangeur secondaire air-liquide. Dans ce type de circuit de refroidissement, on trouve outre le panneau solaire à refroidir, une pompe, un régulateur de débit, un réservoir de stockage et enfin un échangeur thermique. [20]

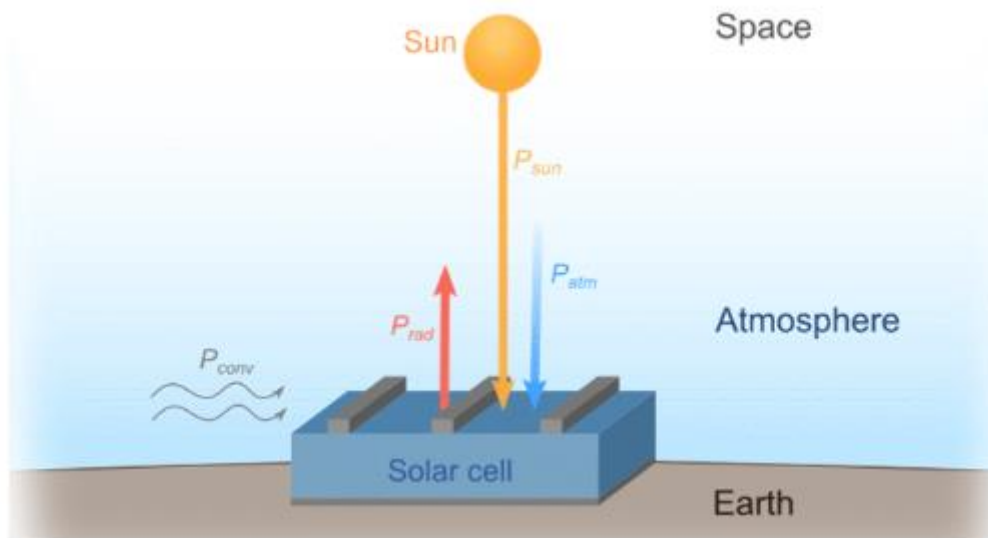


Figure I.13 : Refroidissement passif de panneau photovoltaïque. [20]

VIII.2 Technique actives

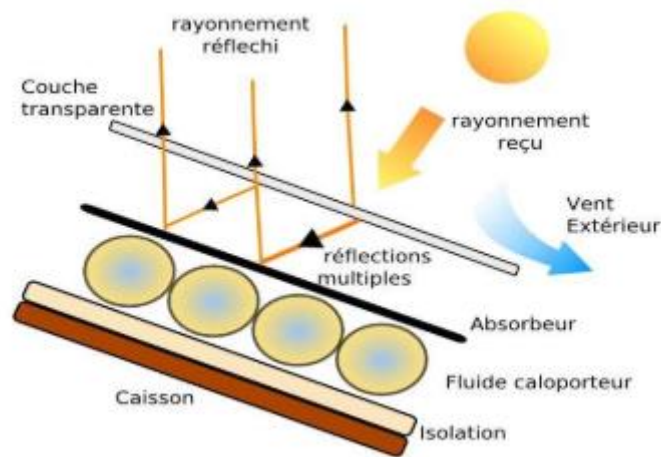
VIII.2.1 Le refroidissement des panneaux PV par un collecteur thermique

Le refroidissement par collecteur thermique est une technique efficace, à double bénéfice. Elle permet d'obtenir une énergie thermique et électrique, mais elle est coûteuse, car chaque panneau doit être doté d'un collecteur thermique en arrière. Le problème du réchauffement des panneaux PV a été posé bien longtemps par des chercheurs qui ont développé des systèmes hybrides solaire thermique. L'installation des systèmes PV/T est considérée même ces jours-là trop chère, pour cette raison on préconise d'améliorer le rendement des panneaux PV par des systèmes de refroidissement bien adaptés aux besoins. [21]

VIII.2.2 Le refroidissement par pulvérisation d'eau de panneau

Cette méthode est aussi à double bénéfice elle assure à la fois le nettoyage et le refroidissement [25]. Dans ce système l'humidification est réalisée à partir de la pulvérisation d'eau sous forme de petites particules au moyen de buses d'atomisation à haute pression (60 à 140 bars), l'eau s'évapore dans l'air, la température d'air diminue et l'humidité spécifique

augmente. L'efficacité des humidificateurs à pulvérisation peut atteindre 100%. La taille de gouttelette d'eau pulvérisée est très fine (environ $10\mu\text{m}$ à $20\mu\text{m}$) donc elle s'évapore facilement dans l'air. [22]

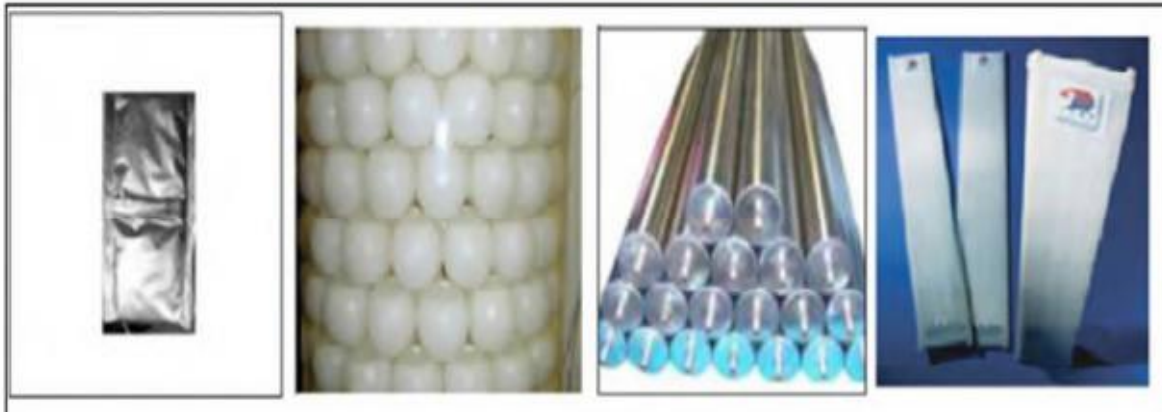


Figures I.14 : Capteur solaire thermique à eau. [23]

VIII.3 Refroidissement en utilisant les matériaux à changement de phase

Les matériaux à changement de phase MCP (Phase Change matériel) ont pour particularité de pouvoir stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente. Ils reposent sur l'application d'un principe physique simple. Au-delà d'une certaine température caractéristique de chaque matériau, ils se liquéfient en absorbant la chaleur de l'atmosphère ambiante et les restituent lorsque la température baisse. Cette propriété du matériau est liée à son importante énergie de fusion par unité de volume, plus celle-ci sera grande plus les propriétés de stockage/restitution de la chaleur seront intéressantes. [24]

L'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) pour le stockage d'énergie thermique a suscité un regain d'intérêt ces dernières années. Cela est due au fait que les MCP ont de fortes densités de stockage (quantité d'énergie stockée par unité de masse). En outre, ces matériaux peuvent être appliqués dans plusieurs domaines. [24]



Figures I.15 : Quelque matériau à changement de phase : pochettes, sphères, tubes, plaquettes. [24]

IX. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté on première lieu des généralités sur les systèmes de production de l'énergie électrique et comment il est utilisé pour générer de l'énergie électrique grâce à l'utilisation de cellules photovoltaïque. Ce potentiel favorise sons utilisation pour l'alimentation électrique, en particulier les sites isolés dans les diverses régions mondiales et nous avons détaillé le principe de la cellule photovoltaïque afin de mieux comprendre l'ensemble du mécanisme de conversion en énergie électrique.

Chapitre II :
Les matériaux à
changement de phase

I. Introduction

Les panneaux photovoltaïques (PV), cruciaux pour l'énergie solaire durable, subissent des pertes d'efficacité dues à la surchauffe. Les matériaux à changement de phase (MCPs) offrent une solution en régulant la température des panneaux. Ils absorbent et libèrent de grandes quantités de chaleur latente pendant les transitions de phase, en maintenant des températures stables.

L'intégration de MCPs avec des panneaux photovoltaïques améliore les performances et la longévité en maintenant des températures de fonctionnement optimales. Ce chapitre explore les types de MCP, leurs propriétés et leur rôle dans l'amélioration du refroidissement des panneaux photovoltaïques, contribuant à des systèmes d'énergie solaire plus efficaces.

II. La théorie de changement de phase

Une phase est une façon sophistiquée de décrire l'état de la matière dans laquelle se trouve quelque chose. Les états ou les phases qui se produisent chaque jour sont solides, liquides et gazeux. Le changement de phase se produit toujours avec un changement de chaleur. Cependant la température ne change pas. Lorsque nous chauffons un solide, l'énergie fournie est utilisée pour augmenter l'énergie cinétique de ses molécules, et donc sa température augmente. L'énergie est nécessaire pour faire fondre un solide, car les forces cohésives entre les molécules doivent être partiellement surmontées pour permettre aux molécules de se déplacer. De même, l'énergie est nécessaire pour vaporiser un liquide, car ce faisant, les molécules sont séparées et les forces d'attraction moléculaires sont surmontées. Mais il n'y a pas de changement de température jusqu'à ce qu'un changement de phase soit complet. c.-à-d. pendant le changement de phase, l'énergie fournie est utilisée uniquement pour séparer les molécules ; aucune partie n'est utilisée pour augmenter l'énergie cinétique des molécules. Ainsi sa température n'augmentera pas, puisque l'énergie cinétique des molécules reste la même.

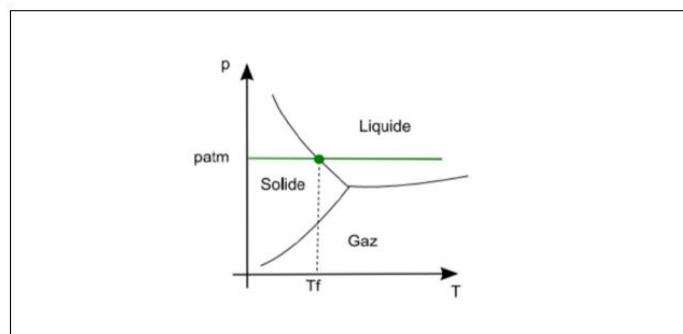


Figure II.1 : Transformation représentée dans le diagramme des phases.

Le processus de transition de phase est régi par la loi de refroidissement de Newton, qui stipule que "le taux de changement de température d'un objet est proportionnel à la différence entre sa propre température et la température de son environnement."

$$\frac{dT}{dt} = -K (T - T_0) \dots\dots\dots (II.1)$$

Où, T est la température de l'objet

K est une constante positive

Ta est la température de l'environnement.

En étudiant le changement de phase d'une substance du solide au liquide, on peut déterminer le point de fusion, la chaleur latente de fusion...etc. de la substance.[25]

III. Le stockage de la chaleur latente

Les systèmes de stockage de chaleur latente utilisent la chaleur latente du changement de phase pour stocker l'énergie. La chaleur latente de fusion est l'énergie nécessaire pour changer l'état de la substance d'un solide à un liquide, et la chaleur latente d'évaporation est l'énergie nécessaire pour changer l'état de la substance d'un liquide à un gaz. [26]

Le stockage de chaleur latente stocke la chaleur dans un milieu de stockage sous forme d'énergie potentielle entre les particules de la substance. La conversion entre la chaleur et l'énergie potentielle dans la substance implique un changement de phase – ainsi, le stockage de chaleur se produit sans changements de température significatifs dans le milieu de stockage. La capacité de stockage de chaleur latente peut être déterminée comme suit :

$$Q = m. \gamma \dots\dots\dots (II.2)$$

Où γ est la chaleur latente en kJ/kg.

La densité de stockage thermique du milieu de stockage peut être exprimée comme suit

$$Q_v = \rho. \Gamma \dots\dots\dots (II.3)$$

Puisque la chaleur latente d'une substance est beaucoup plus grande que la chaleur spécifique de la même substance, le stockage de chaleur latente peut stocker la même quantité de chaleur dans un volume beaucoup plus petit. C'est un avantage significatif des systèmes de stockage de chaleur latente.[27]

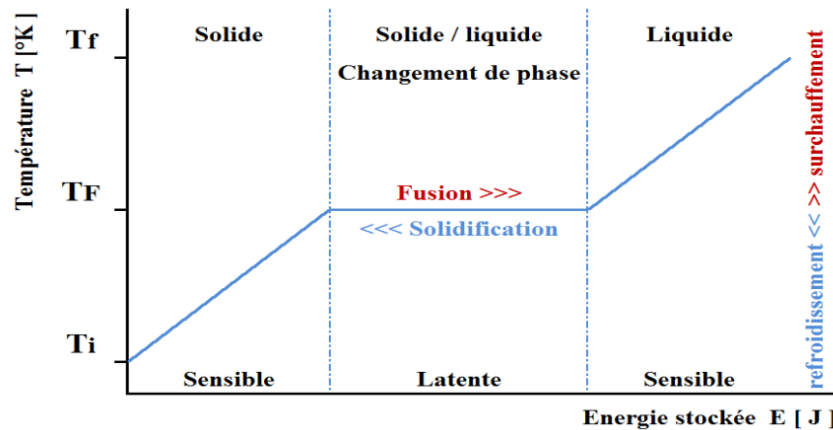


Figure II.2 : Profil de changement de phase pour le stockage par chaleur latente (Solide/liquide). [28]

IV. Les matériaux à changement de phase

Les MCP, appelés matériaux à changement de phase, sont des éléments de stockage de chaleur latente lors du processus de fusion et de sa restitution pendant la solidification en conservant une température constante. Ces matériaux possèdent une densité importante de stockage d'énergie et une capacité à maintenir une température constante tout en absorbant la chaleur pendant la fusion et en la restituant lors de la solidification. Cet intérêt s'est développé dans le domaine de la gestion thermique et des systèmes d'énergie solaire des bâtiments et des serres. Les MCP fondent et se solidifient dans une large plage de températures, ce qui les rend attrayants pour diverses applications. [29]



Figure II.3 : Matériau à changement de phase. [30]

V. Compositions des matériaux à changement de phase

Chapitre II : Les matériaux à changement de phase

Le stockage de chaleur latente peut être réalisé par transformation en phase solide-solide, solide-gaz, liquide-gaz et solide-liquide. Cependant, les MCPs solides-liquides et solides-solides sont les deux seuls d'intérêt pratique. Les caractéristiques et le rendement de ces classifications sont les suivants :

V.1 MCP solide-solide

Dans les substances MCP solides-solides, la chaleur est stockée lorsqu'une substance passe d'une forme cristalline à une autre. Ils apparaissent comme une solution alternative pour surmonter les inconvénients des MCPs solides-liquides les plus utilisés qui nécessitent une encapsulation adéquate pour empêcher le liquide de fuir, cette encapsulation réduit la densité du système et augmente le coût du produit. Les MCP solides peuvent être utilisés sans conteneurs. Un autre côté positif est qu'ils ont une petite expansion volumétrique par rapport aux MCPs solides-liquides, ce qui conduit à un conteneur moins strict, une plus grande flexibilité de conception et un coût plus efficace.[31]



Figure II.4 : Matériau a changement de phase solide-solide. [32]

V.2 Solide-gaz et liquide-gaz PCM

Les PCM gaz-solides et gaz-liquides ont la chaleur latente la plus élevée, mais ils sont utilisés de manière limitée pour le stockage de la chaleur, car de tels systèmes nécessitent des conteneurs de grand volume qui entraînent une complexité et une impraticabilité, et ne sont donc pas largement utilisés pour le stockage de l'énergie thermique. [33]

V.3 PCM solide-liquide

Les MCP solides-liquides ont une chaleur latente relativement plus petite que les MCP solides-gaz et liquides-gaz. Mais leur faible variation de volume (10 % ou moins) rend le système rentable, et ceux-ci sont couramment appliqués pour les systèmes de stockage d'énergie thermique. Les MCPs solides-liquides sont le type le plus examiné et produit commercialement parmi toute la famille de stockage par chaleur latente, et ils peuvent être classés en fonction de leur composition chimique en trois catégories principales : composés organiques, composés inorganiques, et eutectique.[33]

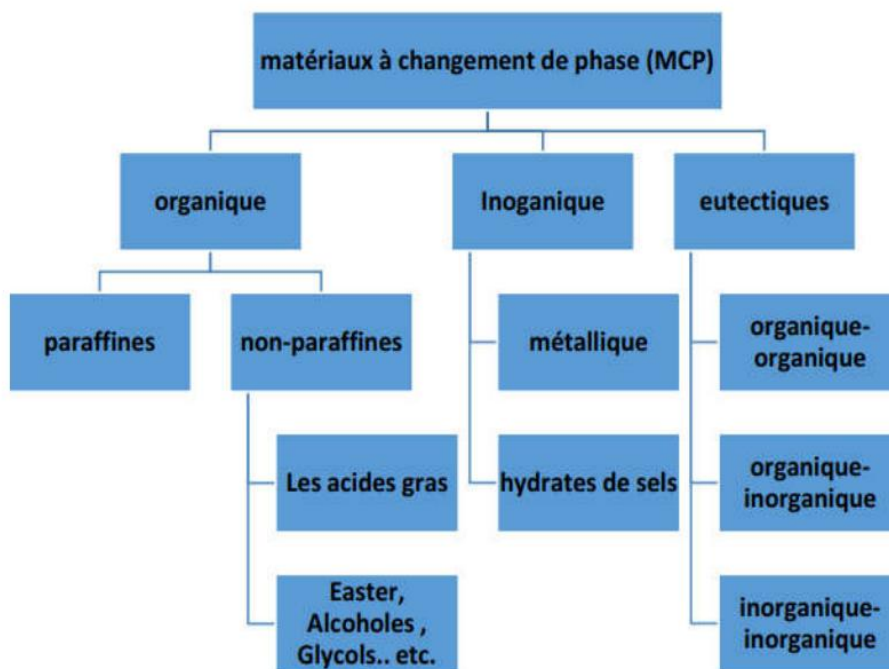


Figure II.5 : Classification des matériaux a changement de phase. [34]

VI. Classification des matériaux à changement de phase

VI.1 Les matériaux à changement de phase organique

En raison de leur chaleur de fusion latente élevée ainsi que de leur nature non toxique et non corrosive, les matériaux à changement de phase organique sont considérés comme des matériaux chimiquement stables. En outre, ces matériaux ne souffrent pas d'effets dus à la surfusion. Il existe deux types de PCM organiques : les paraffines et les non-paraffines.

- Les cires commerciales de paraffine ont une densité de stockage thermique raisonnable de 120 kJ/kg à 210 kJ/kg. La plage de température de fonctionnement des paraffines est d'environ 20 C à 70 C. De plus, ils ont une pression de vapeur moyenne, sont chimiquement inertes et ne subissent pas de séparation de phase.

Chapitre II : Les matériaux à changement de phase

- Les alcools, les acides gras, les esters et les glycols sont parmi les composés organiques non-paraffines appropriés, et tous ont d'excellentes propriétés de congélation et de fusion. En raison de leur faible point de fusion, de l'absence de surfusion pendant la congélation et de la chaleur de fusion latente élevée, les acides palmitoléiques ou les acides gras, ont attiré l'attention. Lors de la transformation par étapes, ils subissent souvent un léger changement de volume.[35]



Figure II.6 : Exemple d'un matériau à changement de phase organique.[36]

VI.2 Les matériaux à changement de phase inorganiques

Les matériaux ou les substances inorganiques ont une plage de température de fusion comprise entre -100°C et $+1000^{\circ}\text{C}$. Les plus utilisés sont : l'eau, les solutions aqueuses de sel, des sels hydratés, des mélanges de sels et des mélanges de métaux.

Les matériaux à changement de phase inorganiques ont plusieurs avantages :

- Ils ont une chaleur latente importante et une haute conductivité thermique. Ils ont une fusion nette (c'est à-dire une plage de fusion étroite).
- Ils ont un cout d'investissement abordable.
- Ils sont en générale facilement disponibles.

Les problèmes majeurs rencontrés lors de leurs utilisations sont en rapport avec la ségrégation, la corrosion et la surfusion nécessitant ainsi l'utilisation d'agent de nucléation afin d'être fiables. [37]

VI.3 Les matériaux à changement de phase eutectiques

La combinaison de deux ou plusieurs composants dont le point de fusion est inférieur à celui de l'un ou l'autre des composants est un eutectique. Chaque composant peut geler et

Chapitre II : Les matériaux à changement de phase

fondre individuellement, et un mélange de composants qui agit comme une seule substance est formé pendant la phase de cristallisation. En tant que composants du gel eutectique, ils produisent un mélange cristallin presque uniforme, qui fond simultanément sans distinction des deux composants. Parmi les MCPs eutectiques on trouve : l'acide laurique et l'acide stéarique, l'acide myristique et l'acide palmitique/acide stéarique, l'acide caprique et l'acide myristique, d'acide caprique et d'acide laurique, et de divers autres eutectiques organiques.

Tableau II.1 : Liste de quelques eutectiques. [38]

Eutectique Inorganique	Point de fusion [°C]	Chaleur latente de fusion [kJ/kg]
49.3%Mg Cl.6H2O+50.7%Mg (NO3).6H2O 58 132.3	58	132.3
61.5%Mg (NO3)6H2O+38.5%NH4NO3	51	131.1
58.3%Mg (NO3)6H2O+41.7%Mg Cl. 6H2O	58	106
CaCl2.6H2O+CaBr2.H2O	14	140
Eutectique organique		
Acide caprique-laurique	18	120
Acide palmitique-laurique	33	145
Acide stéarique-laurique 34 150	34	150

L'un des avantages des mélanges eutectiques est le potentiel plus élevé d'atteindre des propriétés plus recherchées, telles qu'un grand potentiel de conservation de la chaleur par unité de volume ou un point de fusion spécifique. Deux inconvénients majeurs sont qu'il existe peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux et peu utilisées dans les systèmes industriels. [39]

VII. Utilisation des matériaux à changement de phase dans les panneaux photovoltaïques

L'un des principaux facteurs qui dégradent les performances du module PV est la surchauffe. Il est évident que la tension de circuit ouvert et le facteur de remplissage des panneaux diminuent considérablement avec l'augmentation de la température. Des températures plus élevées entraînent à leur tour une diminution substantielle de l'efficacité électrique. Cependant, d'autres paramètres pourraient également affecter le rendement des panneaux photovoltaïques. Dans ce contexte, les efforts de recherche sont axés sur le

refroidissement PV dans le but d'augmenter la production d'énergie. Ils ont discuté de plusieurs méthodes de refroidissement pour les panneaux photovoltaïques, notamment le refroidissement à l'aide de matériaux à changement de phase (MCP).[40]

VIII. Refroidissement des panneaux photovoltaïques en utilisant les matériaux à changement de phase

VIII.1 En utilisant seulement les matériaux à changement de phase

- Matériaux à changement de phase pure

Les panneaux photovoltaïques intégrés au stockage PCM sont une technologie hybride dans laquelle les panneaux photovoltaïques et PCM sont intégrés dans un seul composant pour atteindre une efficacité de conversion électrique plus élevée et une température de surface PV plus basse. Un système PV-PCM typique est illustré à la figure 2. Dans les systèmes PV-PCM, le stockage PCM agit comme un dissipateur de chaleur pour les panneaux photovoltaïques, en particulier pendant les heures d'ensoleillement, lorsque la température de fonctionnement du panneau PV est supérieure au point de fusion du PCM.

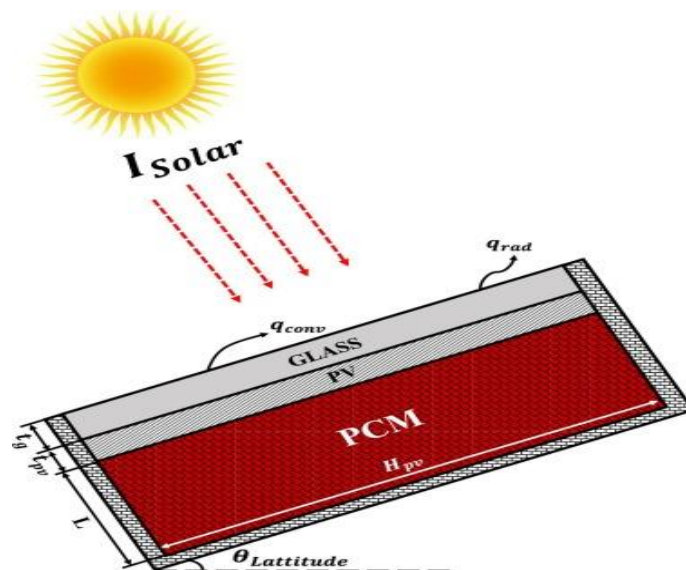


Figure II.7 : Schéma du principe de fonctionnement du système PV-PCM.[41]

Le PCM commence à absorber l'excès de chaleur du panneau photovoltaïque en maintenant la température du panneau photovoltaïque proche de sa température de fusion sans aucune entrée d'énergie externe. L'excès de chaleur absorbé par le PCM change sa phase d'un état solide à l'état liquide à une certaine température connue sous le nom de point de fusion du PCM. PCM continue d'absorber la chaleur PV jusqu'à ce que le PCM soit converti en

phase liquide. Le PCM liquéfié se solidifie à nouveau lorsque la température ambiante et la température de surface du PV tombent en dessous du point de fusion du PCM. La chaleur excédentaire absorbée par le PCM à partir du panneau PV est libérée à l'environnement convertissant le PCM en état solide. Le processus de solidification PCM se produit normalement pendant les heures de brillance non étincelante lorsque le panneau photovoltaïque ne reçoit aucun rayonnement solaire. De cette façon, le panneau photovoltaïque est refroidi passivement et l'efficacité de la conversion d'électricité est améliorée sans utiliser d'énergie parasite du panneau photovoltaïque.[42]

- **Matériaux à changement de phase avec PV/T**

Les systèmes photovoltaïques thermique PVT sont des dispositifs hybrides qui combinent la technologie des panneaux photovoltaïques PV pour produire de l'électricité et des collecteurs thermiques pour capter et utiliser la chaleur générée. Ces systèmes sont spécialement conçus pour maximiser l'utilisation de l'énergie solaire en produisant à la fois de l'électricité et de la chaleur. De plus, ils sont utilisés pour refroidir les panneaux PV, ce qui améliore l'efficacité de conversion électrique des cellules photovoltaïques en maintenant une température plus basse, tout en récupérant la chaleur pour des applications utiles telles que le chauffage de l'eau ou des espaces.[43]

Dans les systèmes PVT, les PCM sont utilisés pour réguler et stocker l'énergie thermique afin d'obtenir la plus haute énergie électrique et thermique possible. Lorsqu'ils sont utilisés dans des configurations PVT, les PCM offrent l'avantage supplémentaire de stocker la chaleur et de réduire les températures des cellules PV par rapport aux systèmes PVT sans PCM. Par rapport aux configurations PVT sans PCM, le PCM utilisé dans le PVT offre un avantage supplémentaire pour stocker la chaleur et abaisser les températures des cellules PV. En outre, le PCM intégré dans le PVT présente des avantages supplémentaires, notamment une grande capacité thermique, aucune énergie requise pour la circulation, des propriétés non corrosives et non toxiques, et l'énergie thermique stockée peut être utilisée la nuit.[44]

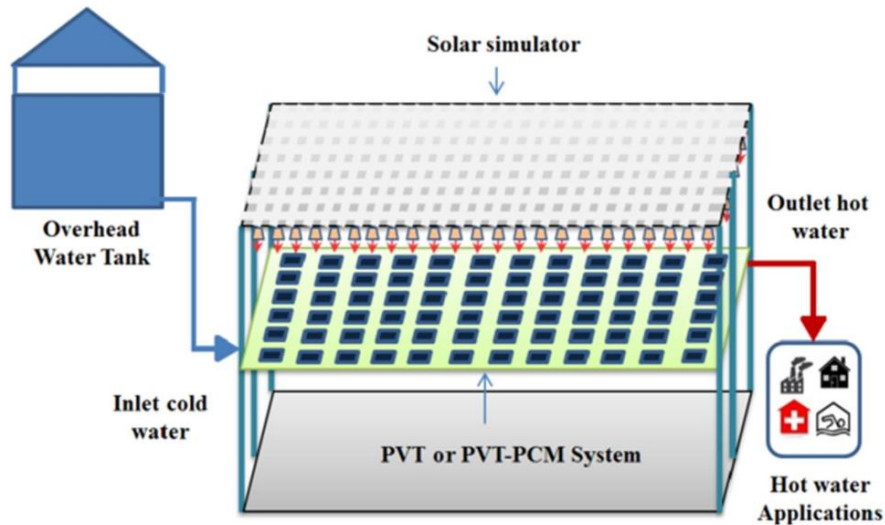


Figure II.8 : Schéma du système PVT-PCM.[45]

VIII.2 Matériaux à changement de phase avec additifs

Malgré les nombreuses caractéristiques prometteuses des PCM en termes de densité de haute énergie avec un faible volume de stockage, leur faible conductivité thermique limite l'efficacité du processus de transfert de chaleur lors des processus d'absorption et de libération. De nombreuses techniques d'amélioration basées sur l'augmentation de la zone de contact entre le PCM et la source de chaleur ont été examinées par de nombreux chercheurs.

- **Matériaux à changement de phase avec ailettes**

Le refroidissement des systèmes solaires via des PCM et des échangeurs de chaleur à ailettes est une alternative très efficace et écologique, où les PCM sont utilisés avec des échangeurs thermiques à ailettes. Habituellement, les PCM fonctionnent comme une batterie thermique qui retient la chaleur excédentaire créée par les cellules solaires pendant les heures d'ensoleillement maximales et la libère en cas de besoin, fournissant un approvisionnement énergétique continu et régulier. L'ajout d'ailettes améliore l'efficacité de la transmission de chaleur car elles augmentent la surface disponible pour l'échange de chaleur et permettent au PCM d'être chargé et déchargé plus rapidement. Cette combinaison augmente les performances totales du système solaire en maintenant des températures de fonctionnement idéales et en réduisant le risque de surchauffe, ce qui peut prolonger la durée de vie utile des panneaux solaires et augmenter leur production d'énergie. [46]

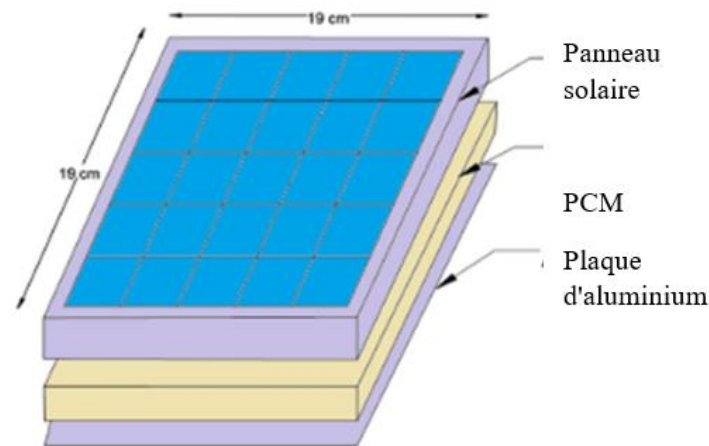


Figure II.9 : Schéma du PV/PCM avec plaque d'aluminium.[45]

- **Matériaux à changement de phase avec nanoparticules**

Les PCM organiques et inorganiques sont des PCM couramment utilisés dans les applications PV. Mais leurs performances thermiques ne sont pas excellentes, en raison de leur plus faible conductivité thermique. Dans le but d'améliorer les performances thermiques du PCM, la dispersion de nanoparticules hautement conductrices thermiques telles que de la mousse métallique et des ailettes pourrait être la solution. Cependant, l'ajout d'une forme et d'ailettes métalliques augmente le poids du PCM et complique la conception du système de stockage d'énergie thermique. Le dopage de la nanoparticule en PCM est appelé matériau à changement de phase nano-amélioré (NEPCM). Les nanoparticules couramment utilisées sont les NTC (SWCNT, MWCNT et FMWCNT), le graphène, le graphite, les métaux (Al, Ag, etc.) et les oxydes métalliques (Al_2O_3 , CuO, TiO_2 , etc.). Les nanoparticules modifient les propriétés thermo-physiques, notamment la capacité thermique latente, la viscosité, la conductivité thermique...etc. [47]

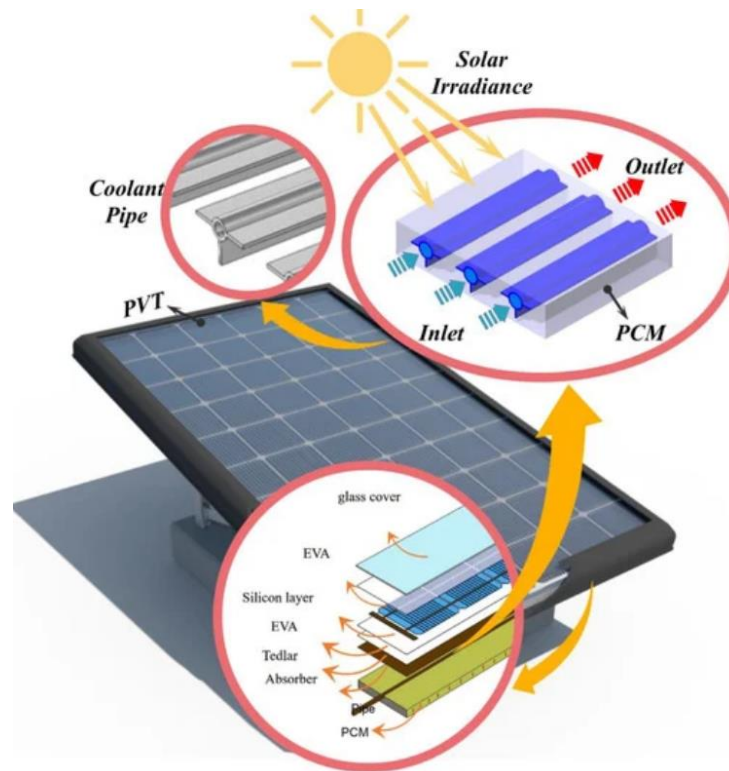


Figure II.10 : Schéma du système avec tuyau d'écoulement PCM et nano-fluide.[48]

- **Matériaux à changement de phase avec métal poreux**

Entre autres, l'incorporation de mousses métalliques poreuses dans des PCM s'est avérée être la technique la plus efficace thermiquement en raison de ses diverses caractéristiques attrayantes telles qu'une grande surface par unité de volume, une légèreté avec une rigidité élevée, une conductivité thermique élevée et une perméabilité élevée aux fluides. Par rapport au PCM pur. L'efficacité des mousses métalliques est régie par différents paramètres tels que le matériau métallique, la porosité et la densité des pores. Les mousses métalliques augmentent le taux de transfert de chaleur en augmentant la zone d'exposition entre la source de chaleur (plaque absorbante) et le fluide de travail (PCM), offrant ainsi une capacité de transfert de chaleur améliorée avec une légère pénalité sur la capacité de stockage thermique.[45]

IX. Critères de choix d'un matériau à changement de phase

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

grande chaleur latente. D'autres critères très importants dans le choix des MCP sont à considérer tels :

- **Le coût** : c'est, bien sûr, un critère déterminant. Le choix ne sera pas le même s'il s'agit de quelques kilogrammes (cas dans des utilisations domestiques) ou de quelques tonnes (utilisations industrielles) ;
- **La densité** : un corps plus dense demandera un volume de stockage plus faible. Il faudra aussi s'intéresser à la variation de densité lors du changement d'état. C'est particulièrement vrai pour les MCP aqueux ;
- **La tension de vapeur** : elle doit être la plus faible possible ;
- **La dangerosité du produit** : il est bien évident que l'utilisation de certains produits est soumise à des réglementations et normalisations qu'il faut respecter ;
- **La stabilité dans le temps ou au cours de cycles fusion-cristallisation** : la fiabilité des matériels de confinement : par exemple, l'utilisation de produits corrosifs doit se faire dans des récipients ou tuyauteries en acier inoxydable ou en matières plastiques ou céramiques. Le coût de ces confinements est aussi à prendre en compte ;
- **La surfusion** devra être de faible importance : des additifs seront nécessaires. Il faudra en faire le bon choix et se préoccuper de leur coût. [49]

X. Principaux défis liés à l'utilisation du PCM comme solution de refroidissement photovoltaïque

L'utilisation des matériaux à changement de phase pour le refroidissement des panneaux photovoltaïques présente plusieurs défis, malgré les avantages potentiels d'améliorer l'efficacité des PV en régulant la température :

- La fixation de matériaux à changement de phase (PCM) à la surface arrière d'un panneau photovoltaïque (PV) est une méthode d'installation recommandée, qui prend en compte l'épaisseur et l'angle d'inclinaison du PCM. Des inspections régulières sont nécessaires pour garantir des performances optimales. Il est essentiel de vérifier régulièrement l'angle d'inclinaison afin de préserver l'efficacité. De plus, si un conteneur PCM est utilisé sur la plaque arrière du panneau PV, il est nécessaire de vérifier régulièrement le système de confinement PCM pour détecter d'éventuelles fuites ou détériorations. Pour maintenir le fonctionnement global du système, des examens de l'intégrité structurelle du conteneur PCM doivent également être effectués régulièrement.

- Des examens périodiques sont cruciaux pour les systèmes de matériaux composites à changement de phase afin d'identifier tout signe de dégradation ou de séparation au sein du matériau composite. Cela garantit que le PCM composite continuera à améliorer la gestion thermique des panneaux photovoltaïques.
- Un programme d'inspection régulier est requis lorsque les systèmes PCM sont intégrés à des ailettes faites de différents matériaux afin de détecter toute corrosion ou dommage dans les ailettes. Des inspections fréquentes aident les ailettes à rester longtemps et à continuer de fonctionner, ce qui est essentiel pour une dissipation efficace de la chaleur.

XI. Conclusion

En conclusion, les matériaux à changement de phase sont une solution efficace pour refroidir les panneaux photovoltaïques (PV) en stockant et en libérant de l'énergie thermique pendant les changements de phase. Le chapitre détaille les types de PCM — organique, inorganique et eutectique — et leurs caractéristiques distinctes. Il a également couvert diverses méthodes de refroidissement, qui aident à réduire les températures et à améliorer l'efficacité et la durée de vie des panneaux photovoltaïques.

Chapitre III :

Modélisation

numérique

I. Introduction

Ce chapitre présente ANSYS Fluent, le logiciel de dynamique des fluides computationnelle (CFD) utilisé pour simuler le refroidissement de panneaux photovoltaïques (PV) avec des matériaux à changement de phase (PCM). Les capacités de modélisation avancées d'ANSYS Fluent permettent une analyse précise des performances thermiques et une optimisation des systèmes de refroidissement basés sur PCM. Le chapitre décrira les caractéristiques du logiciel et son application dans la simulation du transfert de chaleur et de l'écoulement des fluides, fournissant une base pour comprendre son rôle dans cette recherche.

II. Qu'est-ce que la CFD

La CFD, i.e. « Computational Fluid Dynamics » (soit en français : Dynamique des Fluides Numérique) est un ensemble de méthodes numériques permettant d'obtenir une solution approximative d'un problème de dynamique des fluides et/ou de transfert thermique. Les équations qui interviennent sont celles des mécaniques des fluides, résolues par des méthodes numériques. La solution est approximative et non pas exacte pour plusieurs raisons :

D'abord, parce qu'on résout les équations de Navier-Stokes numériquement en les discrétisant. Deuxièmement, et comme on le verra un peu plus loin, pour des raisons de limitation de la puissance de calcul et de mémoire, certains termes des équations à résoudre sont remplacés par des modèles empiriques de turbulence qui ne sont pas exacts. Cependant, grâce au développement des méthodes numériques et à des calculateurs de plus en plus puissants avec une grande capacité de mathématique et simulation numérique, la CFD permet d'avoir des solutions très satisfaisantes. Ceci est encore plus vrai dans l'industrie où très souvent on ne s'intéresse qu'aux valeurs moyennes et aux ordres de grandeur d'un problème donné. [50]

III. Définition de la méthode de résolution

Le passage d'un problème aux dérivées partielles continu à un problème discret, s'appuie sur les méthodes de dérivées partielles. On distingue trois grandes méthodes pour formuler un problème continu sous forme discrète, basées sur la discrétisation des équations différentielles, telles que la méthode des volumes finis, des différences finies et des éléments finis. La méthode utilisée par le code ANSYS-Fluent, est celle des volumes finis. [51]

Chapitre III : Modélisation numérique

ANSYS-Fluent discrétise les systèmes d'équations qui traduisent l'écoulement permanent d'un fluide dans des géométries définies en utilisant une méthode de discrétisation, dont cette opération s'effectue par la transformation des équations différentielles en un système d'équations algébriques suivant des étapes propres au régime permanent. Généralement, on peut distinguer : [51]

- Intégration des équations de transport.
- Discrétisation spatiale.
- Conditions aux limites.
- Couplage pression vitesse.
- Convergence.

III.1 Méthode des volumes finis

Le domaine de calcul est divisé en un nombre fini de sous domaines élémentaires appelés volumes de contrôles, chacun englobe un nœud dit nœud principal. La méthode des volumes finis consiste à intégrer les équations aux dérivées partielles sur chaque volume de contrôle. [52]

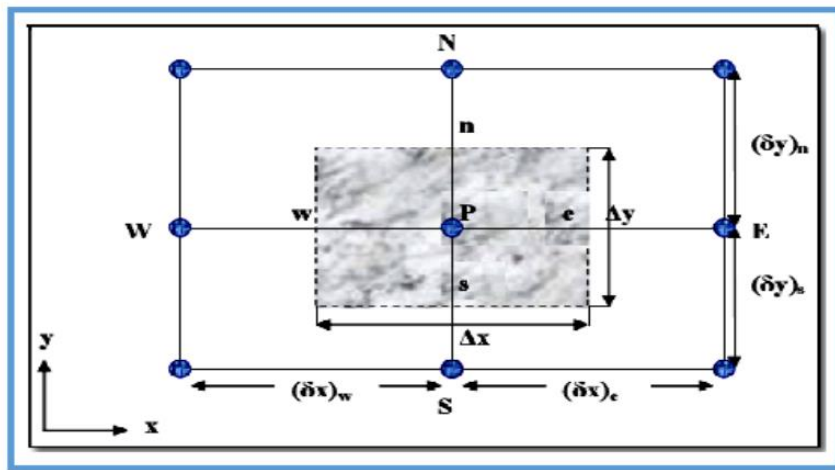


Figure III.1 : Volume de contrôle bidimensionnel. [52]

Pour un nœud principal P les points E et W (E=Est, W= Ouest) sont des voisins dans la direction x, tandis que N et S (N=Nord, S=Sud) sont des voisins dans la direction y. Le volume de contrôle entourant P est montré par les lignes discontinues, les faces du volume de contrôle sont localisées aux points e et w dans la direction x, net s dans la direction y. [52]

IV. Les équations de NAVIER-STOKS

Les équations de Navier-Stokes sont des équations aux dérivées partielles non linéaires qui sont censées décrire le mouvement des fluides « newtoniens » (liquide et gaz visqueux ordinaires) dans l'approximation des milieux continus. La résolution de ces équations modélisant un fluide comme un milieu continu à une seule phase incompressible, si elle est possible, est ardue. La cohérence mathématique de ces équations non linéaires n'est pas démontrée, mais elles permettent souvent par une résolution approchée de proposer une modélisation. [54]

- **L'équation de continuité**

Elle exprime la conservation de la masse liquide et de l'énergie d'une section à l'autre. Leur équation s'écrit sous la forme :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{U}) = 0 \dots \dots \dots \text{(III.1)}$$

- **Conservation de la quantité de mouvement**

Comme l'écoulement est un phénomène physique. La masse est conservée selon le principe de continuité de l'écoulement. La quantité de matière obéit également la deuxième loi de Newton. [54]

$$\sum F = m \cdot a \dots \dots \dots \text{(III.2)}$$

Après l'évaluation de l'équation, on obtient le système suivant :

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + u \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \dots \dots \dots \text{(III.3)}$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + u \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \dots \dots \dots \text{(III.4)}$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + u \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \dots \dots \dots \text{(III.5)}$$

Navier-Stokes (1820-1845) écrivait le système pour un fluide visqueux sous forme :

$$\Delta U = 0 \dots \dots \dots \text{(III.6)}$$

$$\left\{ \rho \left[\frac{\partial U}{\partial t} + (\bar{U} \nabla) \bar{U} \right] = u \Delta \bar{U} - \nabla p + \rho g \right\} \dots \dots \dots \text{(III.7)}$$

Avec :

ρ : La masse volumique du fluide.

$\frac{\partial u}{\partial t}$: Le changement de la vitesse dans le temps.

$(\bar{U}\nabla) \bar{U}$: La vitesse et la direction de déplacement du fluide.

$\mu\Delta\bar{U}$: La viscosité du fluide.

∇p : Le gradient de la pression interne.

ρg : La force de volume.

V. Présentation du logiciel de simulation « ANSYS Fluent »

ANSYS FLUENT est un logiciel de simulation CFD qui permet de modéliser l'écoulement du fluide, le transfert de chaleur, et les réactions chimiques dans des géométries complexes. Ce programme est écrit dans le langage C de programmation et permet d'utiliser pleinement la flexibilité et la puissance offerte par cette langue. ANSYS FLUENT utilise une architecture client- serveur, ce qui lui permet d'exécuter des processus simultanés distinctes sur plusieurs postes de travail client et serveurs de calcul puissants. Cette architecture est essentielle pour une exécution efficace, un contrôle interactif, et une flexibilité totale entre les différents types de machines ou de systèmes d'exploitation. [54]

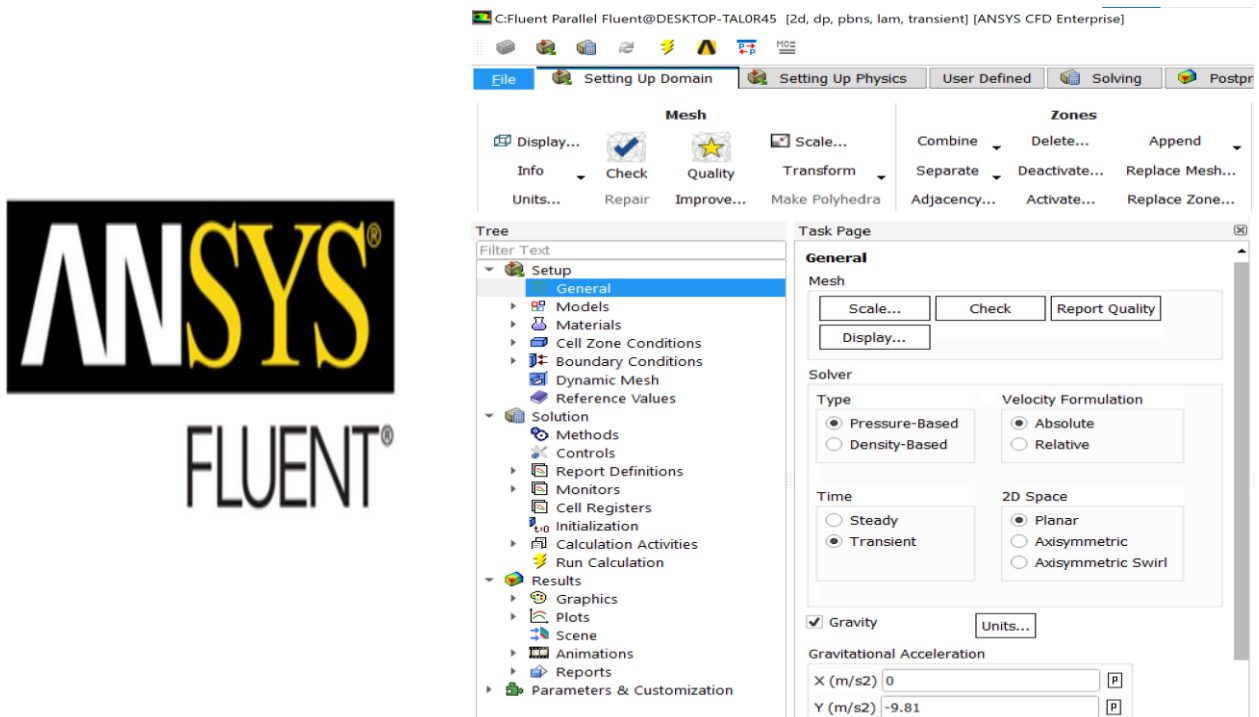


Figure III.2 : Vue générale sur ansys fluent.

V.1 Les différentes étapes à suivre pour la modélisation numérique

Chapitre III : Modélisation numérique

Pour réaliser une modélisation numérique sur ANSYS Fluent, plusieurs étapes doivent être suivies de manière méthodique afin d'assurer la précision et la fiabilité des résultats :

- Création de la géométrie sous le logiciel (Design Modeler).
- Génération de maillage dans Ansys Meshing.
- Définition du problème sous le logiciel ANSYS FLUENT.
- Calcul ANSYS FLUENT pour les différents cas retenus.
- Analyse des résultats obtenus. [56]

V.1.1 Création de la géométrie

Toute simulation CFD commence par la réalisation de la géométrie en 2D ou 3D, soit avec un logiciel intégré au code de calcul CFD soit à l'aide d'un logiciel de CAO. [57]

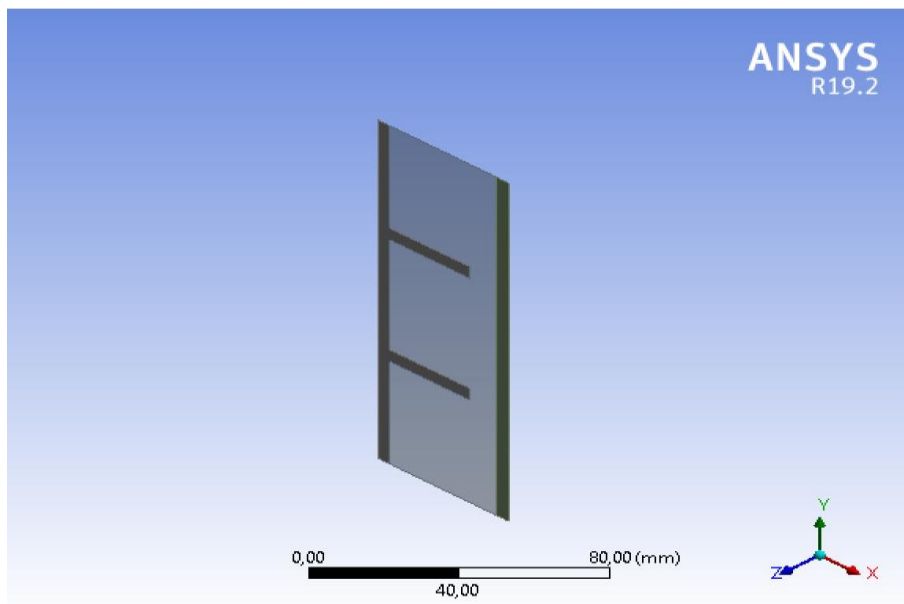


Figure III.3 ; Géométrie du problème par logiciel ANSYS FLUENT

V.1.2 Maillage

Le maillage subdivise le domaine physique en petites cellules reliées les unes aux autres, de sorte que la géométrie soit décrite avec un nombre et une taille d'éléments spécifiés avec différentes formes : Maillage structuré (quadra/hexa), Maillage non structuré (tri/tétra), Maillage hybride. [58]

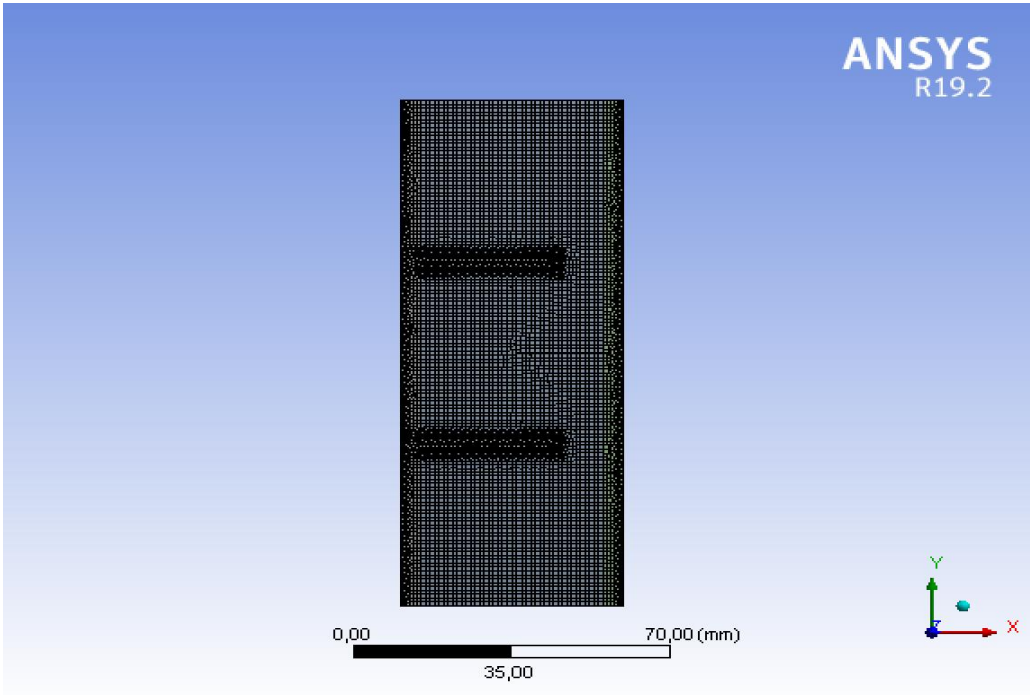


Figure III.4 : Maillage du panneau solaire dans ANSYS meshing.

L'étape suivante consiste à nommer les différentes parties de la géométrie a fin de définir les conditions aux limites du problème (entrées sorties...etc.) et définir les conditions sur le maillage au niveau des différentes sélections. [57]

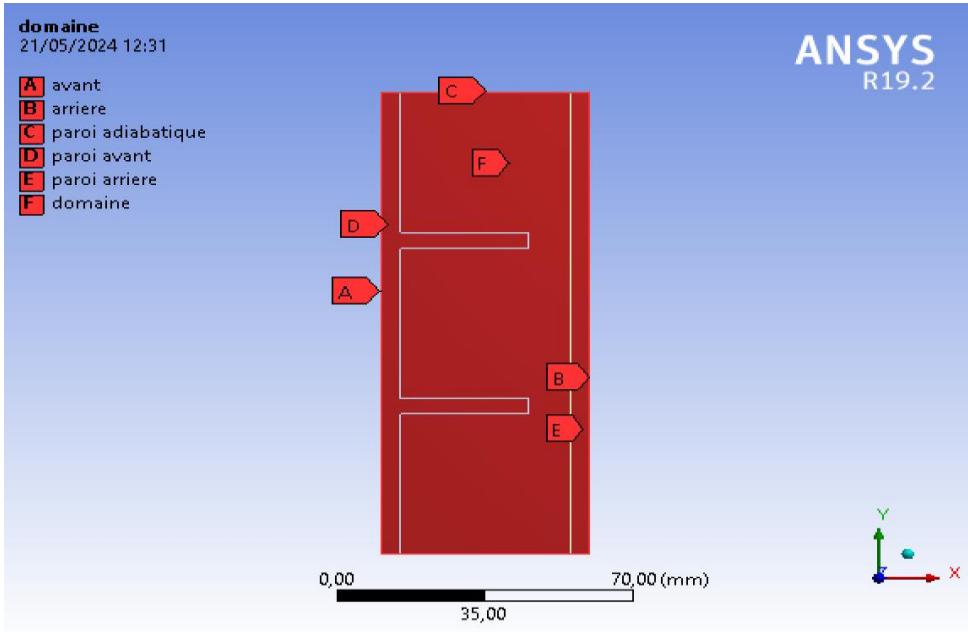


Figure III.5 : Nomination des surfaces.

V.1.3 Le solveur Fluent

Chapitre III : Modélisation numérique

Une fois le maillage terminé, les équations du problème sont résolues avec le solveur Fluent, couramment utilisé pour les problèmes d'écoulements numériques. L'interface de Fluent est facile à prendre en main, commençant par l'importation du maillage. Ensuite, il faut définir les paramètres de calcul et choisir le modèle physique. Fluent offre aussi un outil de visualisation pour afficher les champs de température et de vitesse. [59]

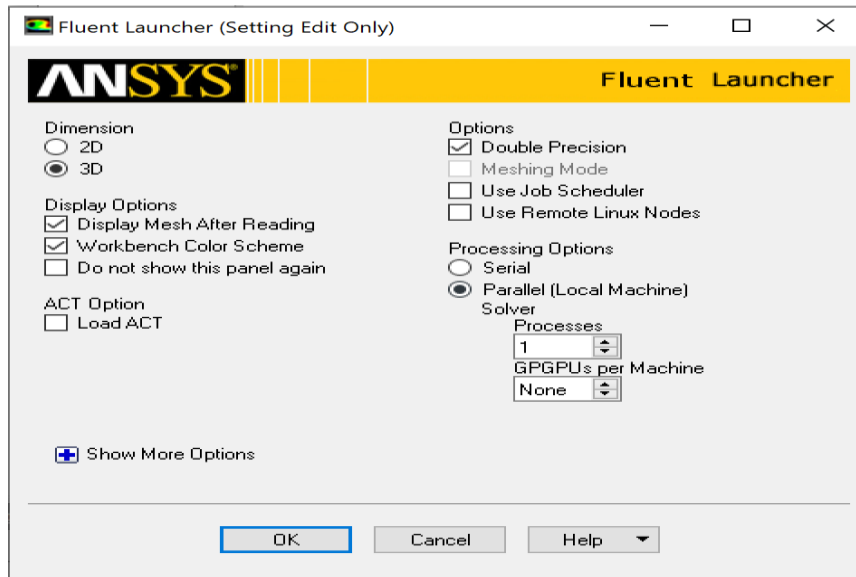


Figure III.6 : Fenêtre de lancement FLUENT.

V.1.3.1 Choix l'équation d'énergie

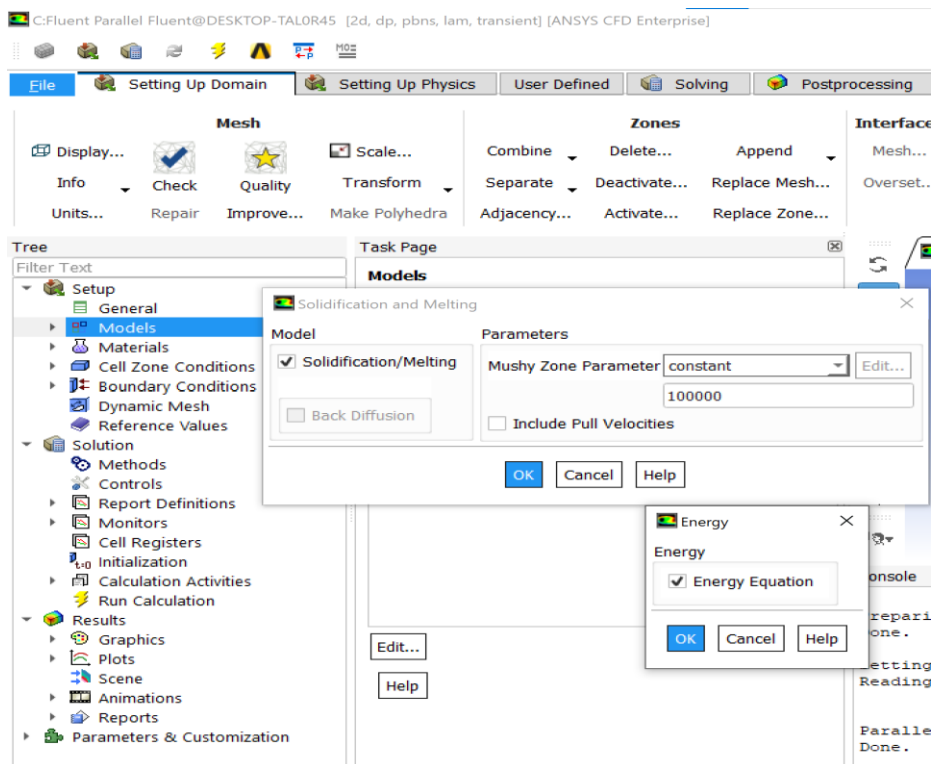


Figure III.7. Etablir équation d'énergie.

V.1.3.2 Les propriétés des fluides

Le code Fluent contient une bibliothèque contenant les fluides les plus communs.

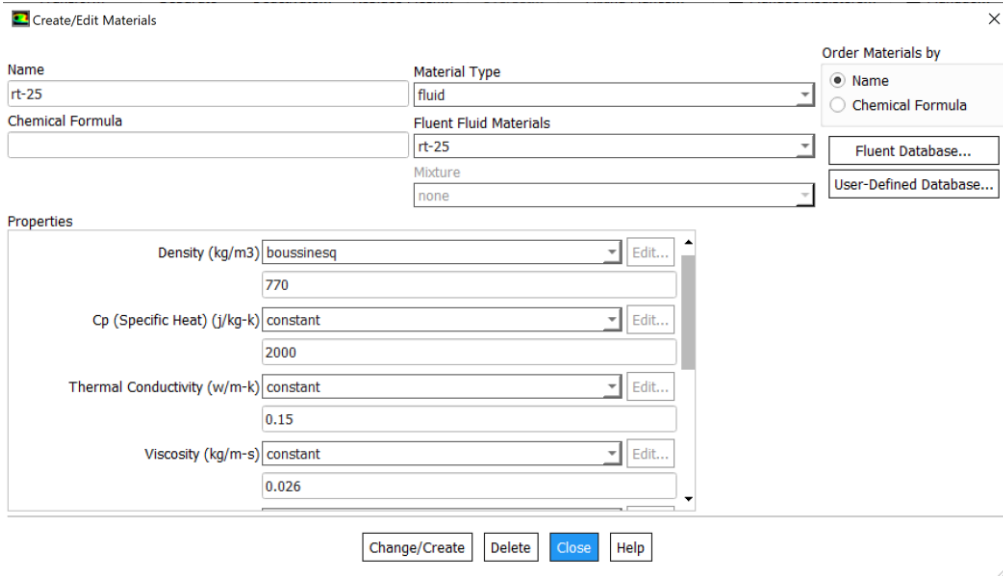


Figure III.8 : Définition des caractéristique thermo-physique des fluides.

V.1.3.3 Conditions aux limites

Les conditions aux limites imposées dans les simulations sont les caractéristiques des propriétés d'écoulement sur les frontières numériques du domaine de calcul.

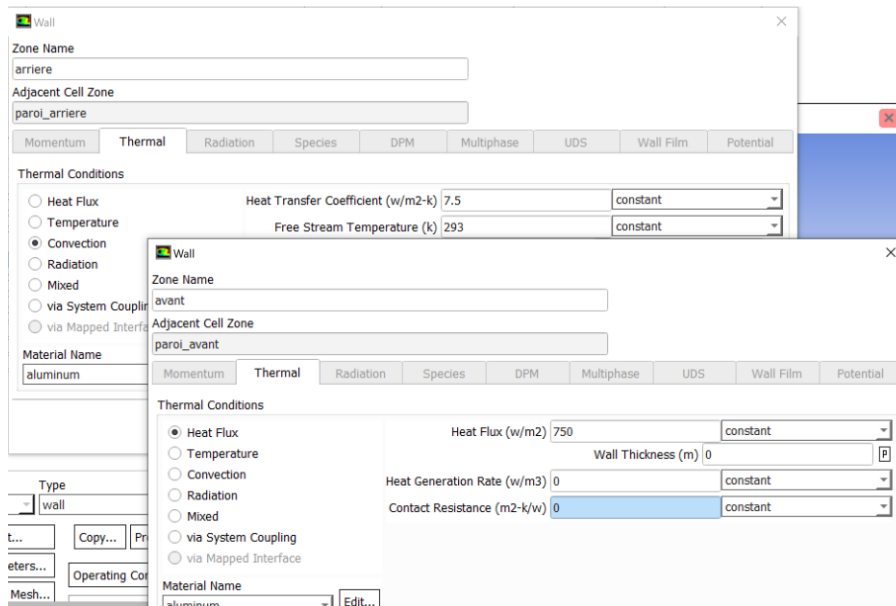


Figure III.9 : Conditions aux limites.

V.1.3.4 Initialisation du calcul

L'initialisation du calcul consiste à définir les conditions de départ pour les simulations, assurant des résultats réalistes précis. Cette étape est cruciale pour poser les bases d'une modélisation numérique fiable.

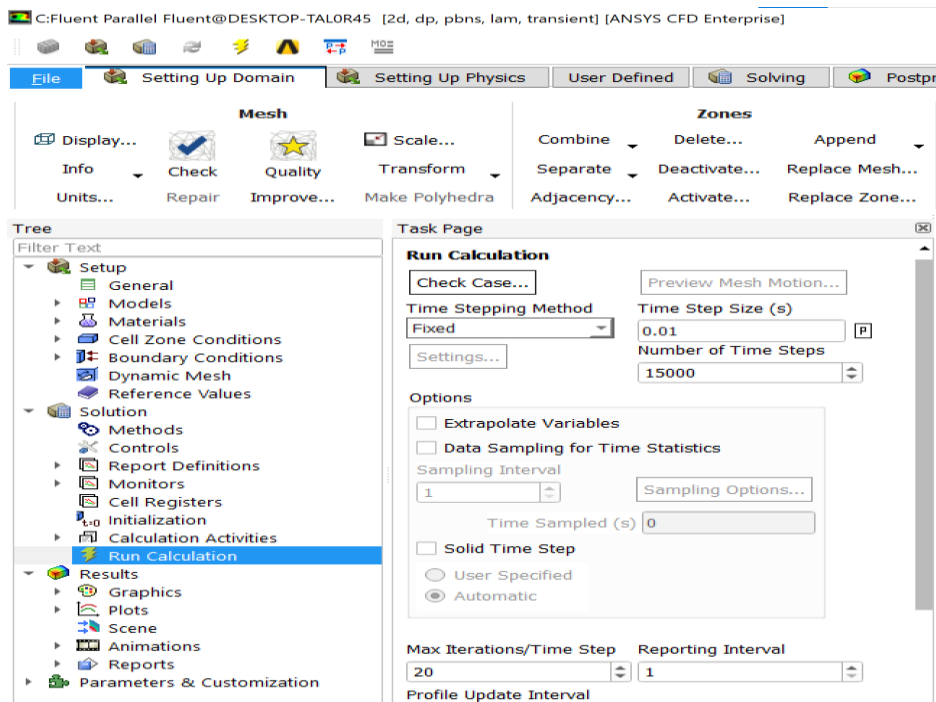


Figure III.10 : Initialisation du calcul sur Ansys fluent.

VI. Conclusion

En conclusion, l'utilisation d'ANSYS Fluent a été essentielle pour faire progresser notre compréhension et notre optimisation des systèmes de refroidissement à base de matériaux à changement de phase (PCM) pour les panneaux photovoltaïques (PV). Grâce à ses fonctionnalités de modélisation sophistiquées, ANSYS Fluent nous a permis de réaliser des simulations détaillées du transfert de chaleur et de l'écoulement des fluides, facilitant ainsi une analyse précise des performances thermiques.

Chapitre IV :

Résultats et

discussion

I. Introduction

Dans ce chapitre, nous exposons les conclusions de la simulation numérique réalisée selon un modèle à deux dimensions. L'objectif principal est de démontrer l'efficacité du logiciel de calcul CFD "FLUENT" dans la modélisation de l'écoulement de convection naturelle à l'intérieur d'une cavité contenant un matériau à changement de phase, conçue pour refroidir un panneau solaire.

II. Procédure de la solution numérique

"FLUENT" représente un logiciel de calcul commercial largement adopté pour la résolution des défis en mécanique des fluides et en transfert de chaleur.

La méthode numérique des volumes finis est utilisée pour résoudre les équations régissant le problème instationnaire en question avec l'algorithme SIMPLE. Les équations discrétisées ont été résolues de manière itérative dans chaque direction le long des axes. Le schéma de second ordre amont (second order upwind) est utilisé pour minimiser la diffusion numérique pour les termes de convection des équations de quantité de mouvement et l'équation d'énergie. Le bilan de masse pour la convergence a été considéré comme 10^{-6} .

Dans cette étude, le code commercial a été employé pour effectuer une simulation numérique du transfert de chaleur conjugué impliquant la conduction et la convection naturelle à travers le système PV-PCM. Après avoir confirmé la validité de notre modèle numérique en le comparant aux résultats de la littérature, nous avons exploré l'impact de divers paramètres sur l'écoulement et le transfert de chaleur à l'intérieur de cette enceinte, notamment :

- Etude du système PV-PCM simple sans ailettes.
- Etude de l'effet de la longueur de l'ailette avant et de l'effet de l'ailette arrière.
- Etude de l'effet l'inclinaison pour un système PV-PCM avec ailettes

Tableau IV.1 : Propriétés Thermo-physiques de "RT25"

Propriétés	Matériaux à changement phase "RT25"	Cire de paraffine	Aluminium
Densité			
Solide, Kgm^{-3}	785	830	2675
Liquide, Kgm^{-3}	749	830	Non utilisé
La capacité thermique spécifique			
Solide, $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$	1,413,000	1,593,600	2,415,525
Liquide, $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$	1,797,600	2,705,800	Non utilisé
conductivités thermique			

Solide, $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	0.19	0.514	211
Liquide, $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	0.18	0.224	Non utilisé
température de Fusion, °C	26.6	32	Non utilisé
La chaleur latente de fusion, J kg^{-1}	232,000	251,000	Non utilisé

III. Etude du cas simple sans ailettes

III.1 Le système sans ailettes

Dans le présent cas on traite le transfert de chaleur bidimensionnel dans une cavité rectangulaire rempli de PCM destinée pour refroidir un panneau solaire (voir figure IV.1). La paroi avant chaude est soumise à un flux de chaleur et un flux convectif, tandis que la paroi arrière froide est soumise à un flux convectif, or les deux parois horizontales sont adiabatiques. Les trois conditions aux limites considérées sont :

- la paroi avant du panneau est fixe et soumise à un flux de chaleur $I_T=750 \text{ Wm}^{-2}$ plus un flux convectif de coefficient de transfert de chaleur $h_1=12\text{Wm}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ et une température de l'extérieur de 20°C .
- la paroi arrière du panneau est soumise uniquement à un flux convectif de coefficient de transfert de chaleur $h_2=7.5\text{Wm}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ et une température de l'extérieur de 20°C
- les deux parois horizontales sont adiabatiques.

Les caractéristiques thermo-physiques des matériaux à changement de phase utilisés (RT25) ainsi que du matériau constituant le système PV-PCM (aluminium) sont représentés dans le tableau IV.1.

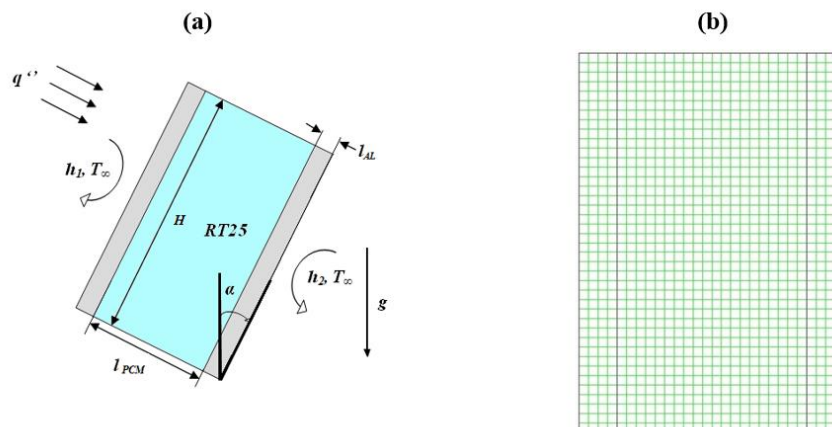


Figure IV.1 : Schéma du système PV/PCM sans ailettes: a) Géométrie et conditions aux

limites; b) Maillage utilisé.

Tableau IV.2 : Effet du maillage sur la température de l'avant.

Temps \ Maillage	16×24	28×40	32×52	40×60
80mn	35.201°C	36.637 °C	36.638 °C	36.638 °C
160mn	35.200 °C	36.612 °C	36.613 °C	36.613 °C
200mn	36.785°C	37.096°C	37.097°C	37.098°C
280mn	45.901°C	48.938°C	48.940°C	48.939°C

III.2 Maillage pour le cas simple sans ailettes

On a utilisé un maillage quadratique régulier structuré. Ce maillage régulier est de pas d'espace 1mm. Le nombre total des cellules de contrôle utilisés est 28x40.

On a étudié l'indépendance du maillage sur les résultats pour cela nous avons utilisé quatre types de maillages structurés. Par suite, les résultats obtenus de la température de l'avant sont présentés dans le tableau IV.2 et montre que le choix du maillage 28×40 est adéquat pour une bonne prédiction du transfert thermo-convectif établi au sein du système PV-PCM sans ailette.

III.3 Effet de l'inclinaison pour le cas simple sans ailettes

L'impact de l'inclinaison du panneau photovoltaïque sur son processus de refroidissement est examiné dans le temps en variant l'angle θ du système PV-PCM depuis la verticale ($\theta=0^\circ$) jusqu'à la position horizontale ($\theta=90^\circ$), avec un incrément de 15° . Par conséquent, sept simulations ont été menées pour le système PV-PCM sans ailettes (0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° et 90°). Toutes ces simulations numériques ont été réalisées sur une période de 150 minutes, à partir de l'état initial où le MCP est solide à une température ambiante de 20°C . Cette durée de 150 minutes semble adéquate pour obtenir une compréhension suffisante du comportement de tous les cas étudiés.

Pour tous les cas étudiés, la face avant est exposée à un flux de chaleur, par suite, elle est chauffée par contre la face arrière du système est froide. Cependant, le MCP commence à se fondre à proximité de la face avant. On a remarqué à partir des simulations que la fusion initiale du MCP est entraînée par la conduction, mais une fois le MCP est assez fondu, la convection naturelle dans la masse fondue liquide commence se développer et à dominer.

0°

15°

30°

45°

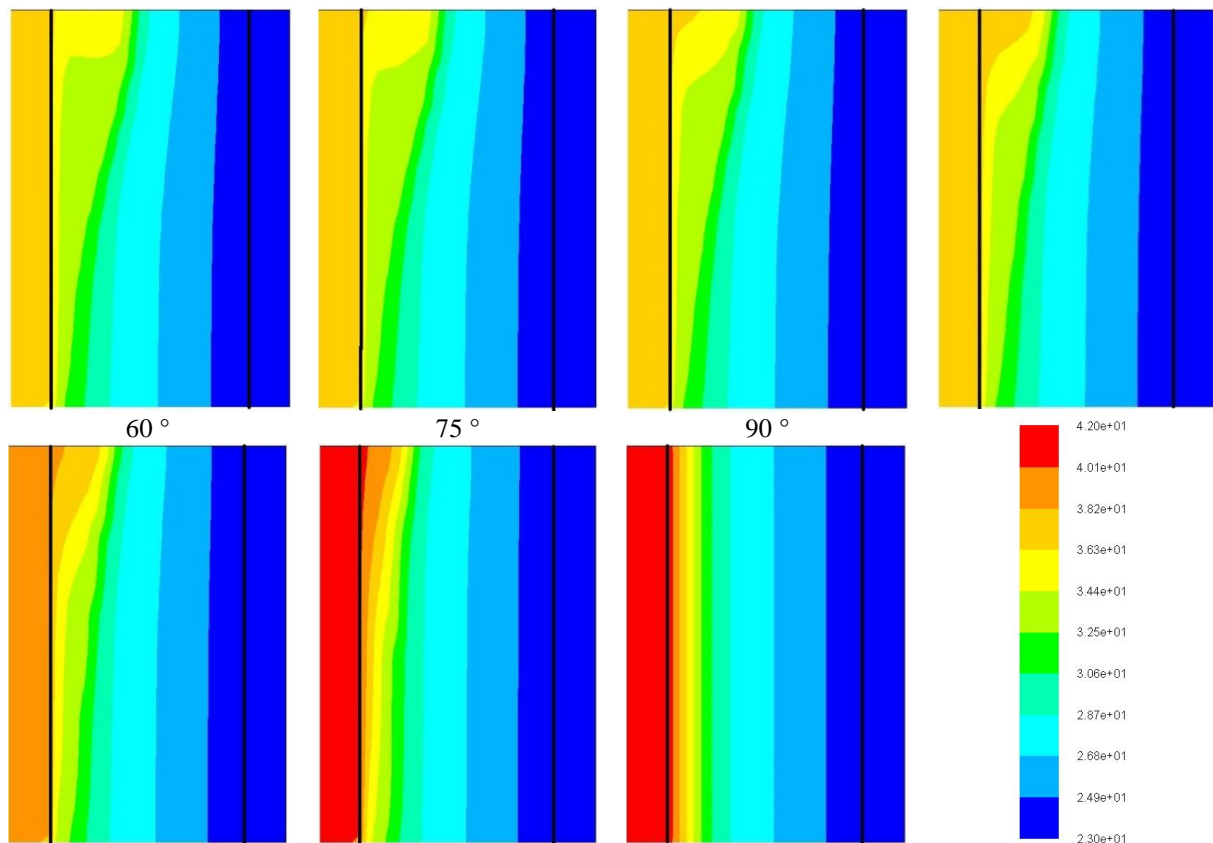


Figure IV.3 : Effet de l'inclinaison sur les isothermes pour le cas sans ailettes

La figure IV.3 présente les isothermes pour les cas étudiés à la 80^{ème} minute. Comme il est bien connu, la zone frontale est plus chaude que les autres parties du système PV-PCM. Par ailleurs, on observe une diminution de la température de l'avant vers l'arrière du système. Il est clairement visible sur cette figure que, pour toutes les inclinaisons, une couche limite ascendante est présente. Cette couche facilite le transfert thermique par convection naturelle dans la cavité, assurant ainsi le refroidissement du panneau. De 0° à 60° d'inclinaison, on constate une augmentation de la taille de cette couche, entraînant une augmentation du transfert de chaleur par convection. En revanche, pour les inclinaisons supérieures à 60°, la taille de cette couche diminue, réduisant ainsi le transfert de chaleur par convection jusqu'à ce que la conduction pure soit atteinte pour une orientation horizontale du système.

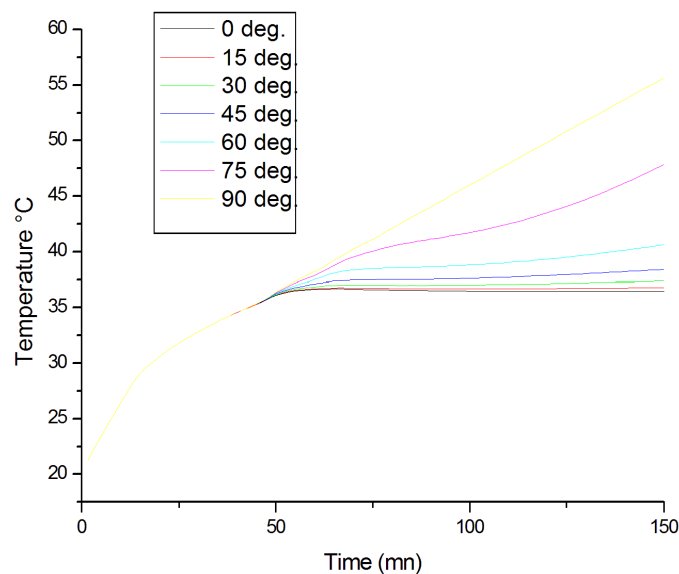


Figure IV.4 : Effet de l'inclinaison sur la température du Front pour le cas simple sans ailettes du système PV-PCM.

La figure IV.4 illustre l'évolution de la température du panneau PV en un point central, sur une période de 150 minutes, pour différentes inclinaisons étudiées. On observe clairement sur cette figure que la température augmente avec l'augmentation de l'inclinaison, comme mentionné dans les figures IV.3. Cette augmentation de température du PV est particulièrement significative pour des inclinaisons supérieures à 60°. Cela s'explique par une activité de transfert thermique plus importante dominée par la convection pour les inclinaisons inférieures à 60°, par rapport aux inclinaisons supérieures à 60° où l'activité de transfert de chaleur est de plus en plus dominée par la conduction.

IV. Etude du cas du système PV-PCM avec ailettes

L'échange thermique par conduction au sein du système PV-PCM est limité en raison de la faible conductivité thermique du PCM ($\lambda=0.02$), comme indiqué précédemment par les figures IV.3 et IV.4. Pour améliorer ces performances et assurer une répartition homogène de la chaleur à l'intérieur du PCM, l'utilisation de surfaces étendues, telles que des ailettes, est courante dans la cavité. Cependant, les ailettes peuvent également perturber la circulation du fluide (PCM fondu) et ainsi réduire le transfert de chaleur par convection dans le PCM fondu. Par conséquent, il est pertinent de déterminer la longueur optimale des ailettes pour un système PV/PCM afin de proposer une configuration optimisée.

IV.1 Les conditions aux limites pour le cas du système avec ailettes

Chapitre IV : Résultats et discussion

Dans cette étude, nous avons traitons le transfert de chaleur bidimensionnel à l'intérieur d'une cavité rectangulaire remplie de PCM, conçue pour le refroidissement d'un panneau solaire. Le système physique examiné dans cette étude est représenté dans la figure IV.5. La paroi avant, chauffée, est soumise à un flux de chaleur ainsi qu'à un flux convectif, tandis que la paroi arrière, plus froide, est exposée uniquement à un flux convectif. Les deux parois horizontales sont traitées comme adiabatiques.

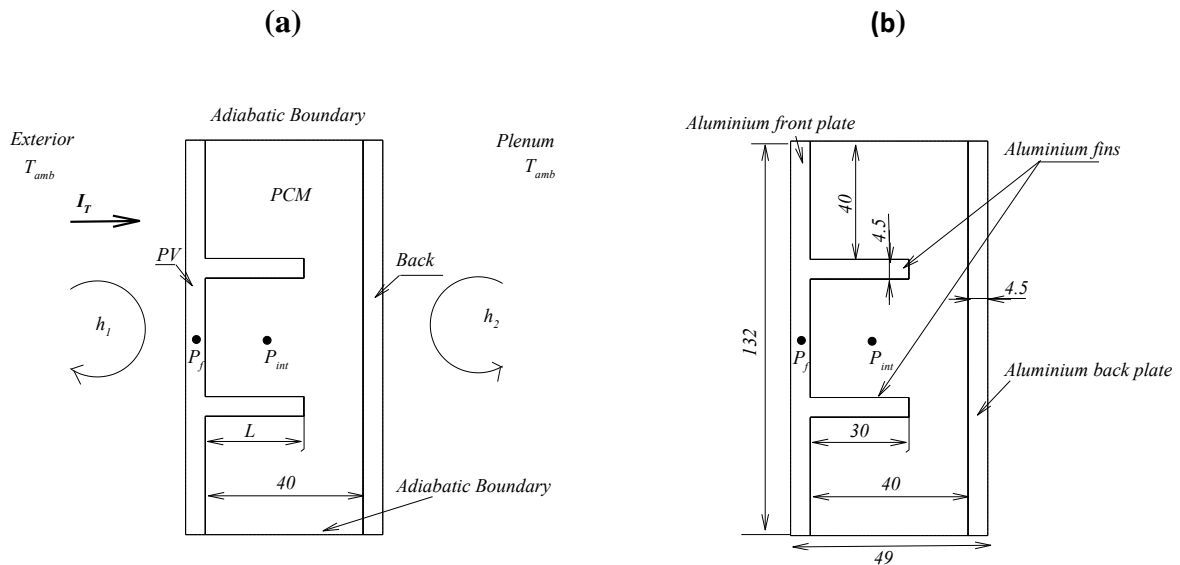


Figure IV.5 Schéma du système PV/PCM avec des ailettes internes: a) transfert de chaleur et conditions aux limites; b) Géométrie du système pour le cas $L=30$ mm.

Les mêmes conditions aux limites utilisées pour le précédent cas ont été considérées pour le présent système avec ailettes, à savoir :

- la paroi avant du panneau est fixe et soumise à un flux de chaleur $I_T=750 \text{ Wm}^{-2}$ plus un flux convectif de coefficient de transfert de chaleur $h_1=12 \text{ Wm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ et une température de l'extérieur de 20°C .
- la paroi arrière du panneau est soumise uniquement à un flux convectif de coefficient de transfert de chaleur $h_2=7.5 \text{ Wm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ et une température de l'extérieur de 20°C
- les deux parois horizontales sont adiabatiques.

Le RT25 est le matériau à changement de phase utilisé (RT25) pour cet cas ainsi que l'Aluminium est le matériau du centenaire du système PV-PCM.

Chapitre IV : Résultats et discussion

Les résultats obtenus sont représentés à travers des isothermes et la fraction liquide pour les différentes longueurs des ailettes internes implantées en avant et de valeurs : 0mm, 5mm, 10mm, 15mm, 20mm, 25mm, 30mm, 35mm et 40mm. Les effets d'une ailette implantée en arrière du panneau sont aussi étudiés ici.

IV.2 Maillage pour le cas du système avec ailettes

Nous avons utilisé le maillage quadratique régulier qui est un quadrillage structuré qui forme des lignes continues à travers le domaine, qui suivent au mieux le contour des surfaces définissant la géométrie. Ce maillage régulier est de pas d'espace 1mm. Le nombre total des cellules de contrôle utilisés est 48x132 dans toutes les configurations étudiées.

Tableau IV.3 : Effet du maillage sur la température de l'avant (le point P_f), et à l'intérieur du MCP (le point P_{int}) pour la configuration $L=30mm$.

Temps Maillage	28×100		48×132		32×52		40×60	
	T_{P_f}	$T_{P_{int}}$	T_{P_f}	$T_{P_{int}}$	T_{P_f}	$T_{P_{int}}$	T_{P_f}	$T_{P_{int}}$
50mn	31.885 °C	23.154°C	33.177 °C	24.064°C	33.180 °C	24.068°C	33.181 °C	24.069°C
100mn	28.506 °C	26.305°C	29.303 °C	27.198°C	29.310 °C	27.201°C	29.312 °C	27.200°C
150mn	32.017°C	30.756°C	33.097°C	31.555°C	33.101°C	31.558°C	33.100°C	31.559°C
200mn	35.103°C	36.216°C	36.008°C	38.718°C	36.010°C	38.721°C	36.011°C	38.720°C

On a aussi testé l'influence du maillage sur les résultats pour cela on a utilisé quatre types de maillages structurés, cependant les résultats obtenus de la température de l'avant (le point P_f), et à l'intérieur du MCP (le point P_{int}) sont présentés dans le tableau IV.3 et montre que le choix du maillage 48×132 est adéquat pour une bonne prédiction du transfert thermo-convectif établi au sein du système PV-PCM avec ailette en avant. D'autre part, les mêmes tests qui concernent le système PV-PCM avec ailettes en avant et arrière montrent que le quadrillage 48×132 est aussi bon pour cette dernière configuration.

(a)

(b)

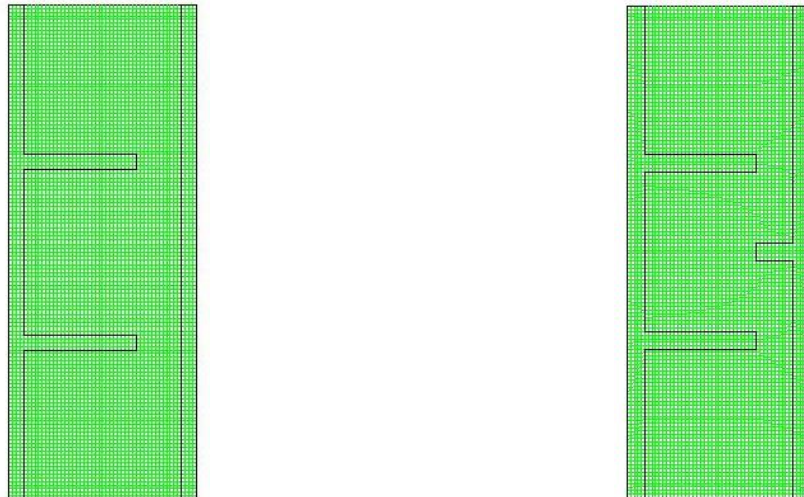
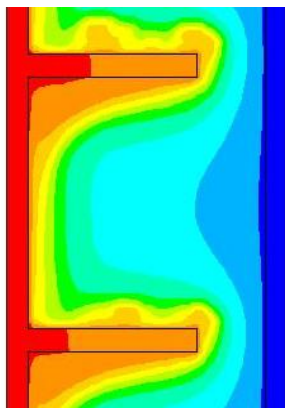


Figure IV. 6 : Maillage utilisé pour le système PV/PCM : (a)avec ailettes avant et (b) avec ailettes avant-arrière

IV.3 Validation pour le cas du système avec ailettes

Le modèle numérique utilisé pour ce cas a été validé contre les données expérimentales et numériques de Huang et al pour la température au cours de la 50eme minute. Un bon accord a été atteint, comme illustré dans la figure IV.7, entre nos résultats et ceux de Huang et al pour les contours de température.

Présents résultats numérique.



Résultats Exp. de *Huang et Al*

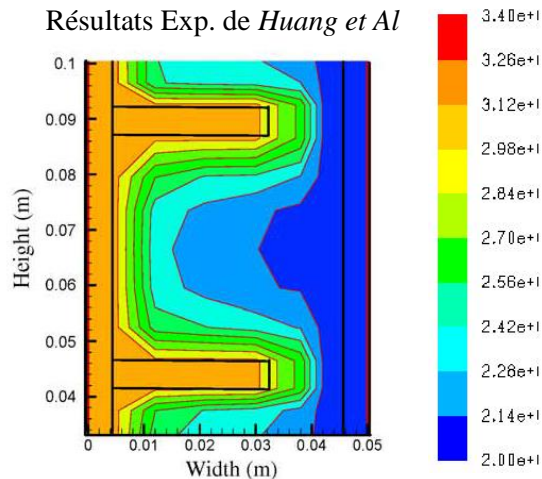


Figure IV.7: Comparaison entre les contours de température prédit numériquement et ceux mesurée par « Huang et Al » au cours de la50^e minute.

IV.4 Etude de l'effet de la longueur de des ailettes internes

Les résultats pour le système PV/PCM présentés ci-dessus ont été générés en utilisant le logiciel commercial Fluent, comme décrit dans le paragraphe précédent. Le critère de convergence a été fixé à 10^{-6} . Les équations régissant le problème ont été résolues pour différentes configurations du système PV/PCM. Les résultats numériques obtenus sont

illustrés à travers des isothermes et des graphiques de fraction liquide. Nous avons particulièrement étudié l'impact des ailettes sur le refroidissement du panneau solaire au fil du temps afin de déterminer la configuration optimale.

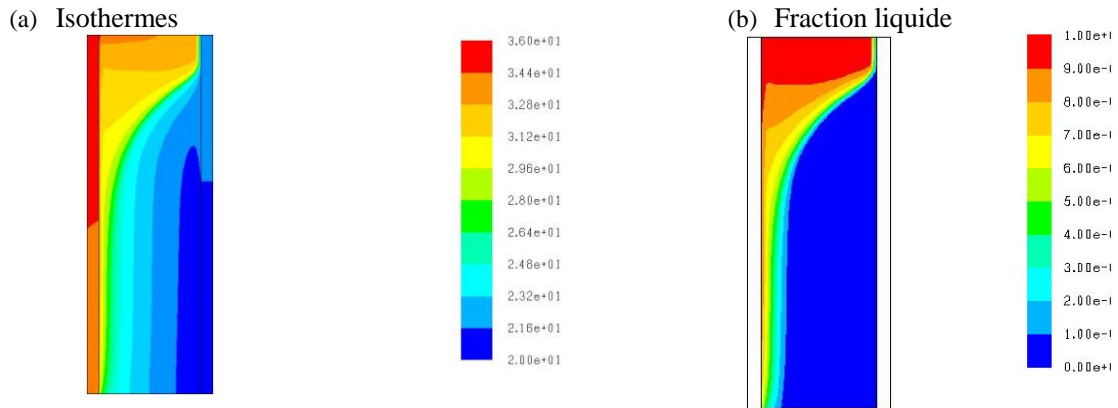


Figure IV.9: Isothermes et distribution de la fraction liquides dans le système PV-PCM à la minute 50^{ème} pour le cas sans ailettes ($L=0\text{mm}$).

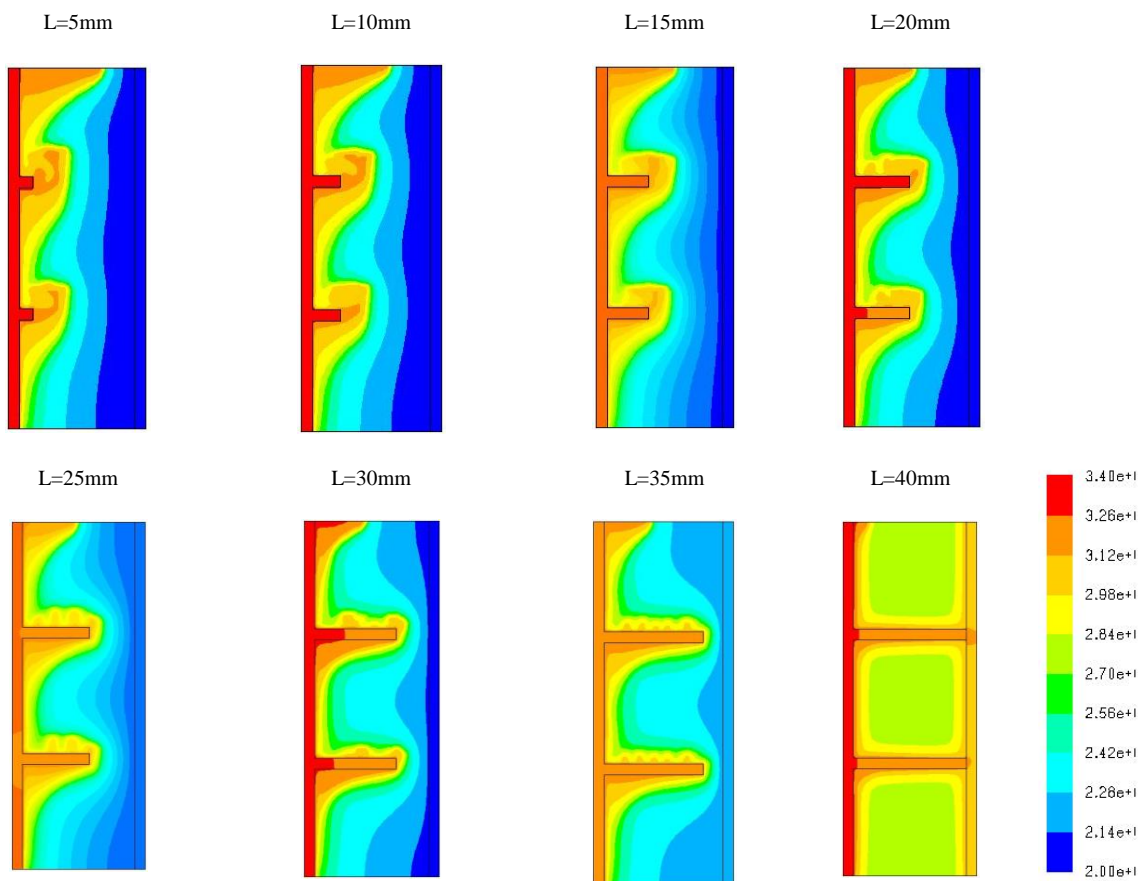


Figure IV.10 : Les isothermes pour différentes configurations du système PV/PCM avec ailettes à la 50^{ème} minute.

Pour $L=0\text{mm}$, on observe la formation d'une couche limite (voir figure IV.9a,b) ascendante et étendue le long de la direction verticale, elle est faiblement mince en bas du système PV-PCM

et de plus large épaisseur en haut du système. La convection naturelle qui se développe au cours du temps et génère cette couche limite ascendante suite au mouvement ascendant des particules du PCM fondues qui se trouvent légères (sous l'effet de l'échange thermique) par rapport aux particules en fusion du PCM qui ont tendance à se déplacer vers le bas pour prendre leurs places. En résultat global pour le système PV-PCM on observe une distribution de la température non convenable pour un bon refroidissement du panneau photovoltaïque ou la partie inférieure du panneau est mieux refroidit que la partie supérieure.

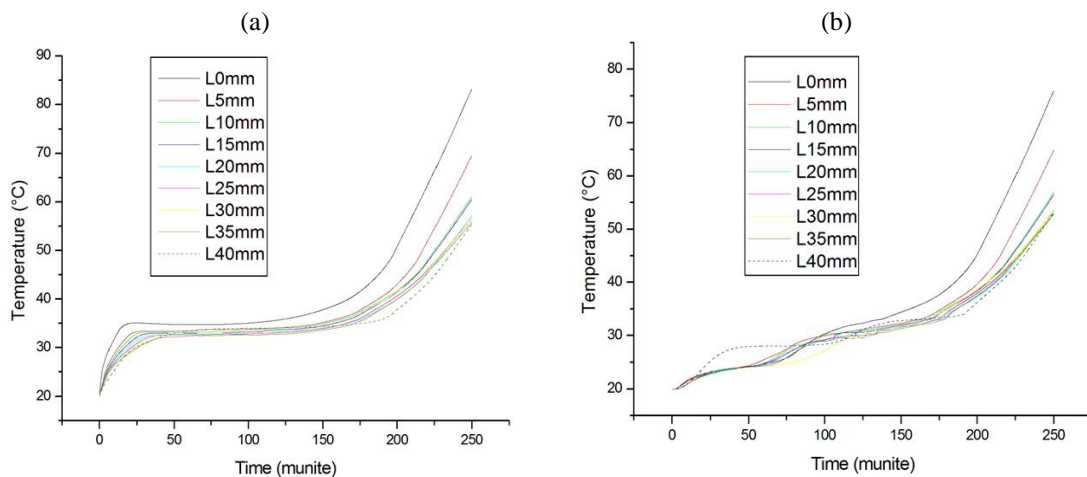


Figure IV.11: L'évolution de la température au cours du temps pour différentes configurations à ailettes à deux endroits : a) le point avant et b) Le point interne.

Pour remédier à ce problème, on va utiliser des ailettes internes pour mieux répartir la charge thermique dans le MCP que subit le panneau photovoltaïque. Il serait intéressant de trouver la longueur optimale pour un bon refroidissement du panneau, pour se faire plusieurs ailettes de longueur différente ont été considérées dans cette investigation ($L=5mm$; $10mm$; $15mm$; $20mm$; $25mm$; $30mm$; $35mm$ et $40mm$). La figure IV.10 montre la distribution des isothermes dans les huit (8) configurations sous investigation au cours de la 50ème minute. Il est clair dans que toutes les configurations, que la couche limite s'est partagée en trois cellules de taille nettement inférieure à la taille du cas de la configuration sans ailette. Ces dernières trois (3) cellules sont pratiquement de même grandeur et garantissent une meilleure répartition de la charge thermique au sein du PCM. On remarque qu'à la 50ème minute, les configurations $L=25$, 30 et $35mm$ permettent un meilleur refroidissement du panneau. Ceci est confirmé dans la figure IV.11, qui montre l'évolution temporelle de la température du panneau photovoltaïque et du point en milieu du PCM au cours de 250 minutes. Il est clair que les trois (3) configurations ($L=25$; 30 et 35) permettent un meilleur refroidissement du

panneau PV ou la température maximale (55°C) est atteinte au $250^{\text{ème}}$ minute.

V. Conclusion

Les essais effectués pour analyser les performances du panneau photovoltaïque à l'aide du logiciel d'analyse ANSYS Fluent ont été déterminés dans ce chapitre, et une discussion des résultats de différentes études réalisées a été présentée.

Conclusion

générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons essayé de maintenir la température du panneau photovoltaïque (PV) à une température adéquate pour une production électrique à des rendements acceptables. Ceci, en incorporant un matériau à changement de phase (PCM) solide-liquide et des ailettes internes. Le PCM "RT25" choisi se change de phase à 25°C, température de caractérisation du PV. En ce sens, on a étudié numériquement le comportement du refroidissement passif et les performances de fusion en utilisant des ailettes internes de différentes longueurs dans une encapsulation rectangulaire en plus en faisant varier l'orientation du panneau photovoltaïque comme si on fait le suivi du soleil le long de la journée. Faire cela, le logiciel CFD commercial (Fluent) a été utilisé pour résoudre les équations de conservation de masse, du mouvement et de l'énergie.

En ce qui concerne le modèle numérique choisi pour prédire l'échange thermique non-stationnaire à travers le système PV-PCM, on a utilisé la méthode des volumes finis, un schéma numérique de discrétisation de second ordre (Second Order Upwind) et l'algorithme SIMPLE pour la détermination du champ de pression et de vitesse. D'autre part, un maillage simple et régulier a été utilisé. Ce modèle numérique, a été bien validé avec les résultats numériques et expérimentales de la littérature. Un bon accord a été obtenu entre les présents résultats numériques et ceux de la littérature pour le cas simple sans ailette et aussi pour le cas avec ailette ($L=30\text{mm}$) à la fois pour les contours isothermes et l'évolution temporelle de la température.

En ce qui concerne les configurations avec ailettes, les résultats obtenus montrent que les ailettes internes de l'avant règlent la répartition de la température, en divisant la couche limite thermique à trois cellules de taille moyenne. Il est intéressant de confirmer que ces ailettes réduisent de manière significative l'augmentation de la température par rapport au cas de la configuration sans ailettes intérieures. De plus, les configurations de $L = 25, 30$ et 35 mm permettent un meilleur refroidissement du panneau photovoltaïque.

D'autre part, l'ailette arrière interne implantée dans le système PV-PCM avec ailettes réduit d'une manière significative les performances de refroidissement du système PV-PCM. Ainsi, il devrait être nécessairement d'utiliser une plaque arrière lisse pour un bon refroidissement.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] « Énergie solaire : exploitation photovoltaïque et thermique ». Consulté le: 22 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-solaire>
- [2] CHERGUI Aghiles et TALBI Nabil, « Intégration de l'énergie solaire dans la gestion énergétique optimisée pour un bâtiment », Université A.MIRA-BEJAIA, 2019.
- [3] Selman Mohamed Abd Setar et Taibi Mohamed El Amine, « Étude des panneaux solaires photovoltaïques », Université Badji Mokhtar- ANNABA, 2021.
- [4] P. Dupuis, « Modélisation aux éléments finis du refroidissement d'un module photovoltaïque intégré au bâtiment à l'aide de matériau à changement de phase ».
- [5] C. Wang et Y. Lu, « SOLAR PHOTOVOLTAIC », Savonia University of Applied Sciences, 2016.
- [6] « Types of Photovoltaic Cell - SolarPost ». Consulté le: 23 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://solarpost.in/basics/types-of-pv-cell/>
- [7] HENNOUS Chahrazet et AIT-ALLALA Kahina, « Dimensionnement et installation d'un système photovoltaïque », universite mouloud mammeri , tizi-ouzou, 2008. [En ligne]. Disponible sur: <https://dspace.ummo.dz/server/api/core/bitstreams/23a89efe-c3a4-4202-ab9e-33b27d5170ef/content>
- [8] DigooodCMS, « Photovoltaic Array », Solar Cable, Mc4 Connector, Solar Connector Manufacturer, Solar Junction Box. Consulté le: 23 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.leader-solar.com/article/photovoltaic-array.html>
- [9] inconnu, « Les systèmes de refroidissement et réutilisation de la chaleur fatale issue des panneaux photovoltaïques », Projet de fin d'études. Consulté le: 19 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.rapport-gratuit.com/les-systemes-de-refroidissement-et-reutilisation-de-la-chaleur-fatale-issue-des-panneaux-photovoltaïques/>
- [10] « Understanding PV Module Performance Characteristics - Technical Articles ». Consulté le: 23 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://eepower.com/technical-articles/pv-module-performance-characteristics/#>
- [11] A. Ghezal, « ASPECTS TECHNIQUES DES PROJETS SOLAIRES PV RACCORDÉS AU RÉSEAU ».
- [12] « Chapitre 5: Capteurs solaires photovoltaïques: . Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque ». Consulté le: 19 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.foad.uadb.edu.sn/mod/book/view.php?id=2448&chapterid=1522>
- [13] N. Benaouda et R. Aiouaz, « Réponses spectrales et des caractéristiques I - V des cellules solaires au silicium ».
- [14] « HENNOUSCHAHRAZET_AITALLALKAHINA caractisse.pdf ».
- [15] P. A. Ouibrahim, « Contraintes Thermiques développées dans un Panneau Solaire Photovoltaïque. ».
- [16] MOUSSAOUI Hanène, « Modélisation et simulation du panneau solaire sous différents rayonnement », Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi –Bordj, Bou Arreridj, 2020.

- [17] B. B. Amel, « Le stockage thermique de l'énergie solaire ».
- [18] P. Pardo, « Développement d'un procédé de stockage d'énergie thermique haute température par voie thermochimique ».
- [19] « Stockage thermochimique », Stockage de l'Énergie. Consulté le: 24 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur:
<https://www.mytopschool.net/mysti2d/activites/polynesie2/ETT/C011/21/StockageEnergie/Stockagethermochimique.html>
- [20] « Une technique de refroidissement passif appliquée aux modules PV », pv magazine France. Consulté le: 24 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.pv-magazine.fr/2021/04/07/une-technique-de-refroidissement-passif-appliquee-aux-modules-pv/>
- [21] I. ZERKOUT et K. CHABOU, « Conception d'un système de refroidissement des panneaux photovoltaïques pour améliorer le rendement dans les zones à haute température », ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES – T L E M C E N--, Telemcen, 2018. [En ligne]. Disponible sur: http://thesis.essatlemcen.dz:8080/xmlui/bitstream/handle/STDB_UNAM/24/INGELN.zerkout%2bchabou.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [22] TELLACHE Khaled et SELMANE Mustapha, « Amélioration des performances de la turbine à gaz MS-5001 avec refroidissement par évaporation », UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES, BOUMERDES, 2017.
- [23] RECHEK Seyfeddine et IKHLEF Roumaïssa, « Simulation numérique par le code de calcul COMSOL d'un capteur hybride photovoltaïque thermique », UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BEN YAHIA - JIJEL, JIJEL. [En ligne]. Disponible sur: <http://dspace.univ-jijel.dz:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/11127/M-GM.ENE-2021-01.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [24] A. MILOUDI et N. DELLAOUI, « Amélioration des performances thermiques dans les panneaux photovoltaïques avec PCM », UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET, Tiaret. [En ligne]. Disponible sur:
<https://mail.google.com/mail/u/0/?hl=fr#sent?projector=1>
- [25] « The Study of Phase Change (Theory) : Heat & Thermodynamics Virtual Lab : Physical Sciences : Amrita Vishwa Vidyapeetham Virtual Lab ». Consulté le: 23 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur:
<https://vlab.amrita.edu/index.php?sub=1&brch=194&sim=709&cnt=1>
- [26] C. K. Ho et A. Ambrosini, « CHAPTER 12 THERMAL ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES », *Thermal Energy Storage*.
- [27] A. Sevault, F. Bøhmer, E. Næss, et L. Wang, « Latent heat storage for centralized heating system in a ZEB living laboratory: integration and design », *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 352, n° 1, p. 012042, oct. 2019, doi: 10.1088/1755-1315/352/1/012042.
- [28] Deffass Meriem, « Intégration des matériaux à changement de phase (MCPs) comme système de stockage de la chaleur », universite mohamed seddik ben yahia, jijel, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <http://dspace.univ-jijel.dz:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/10971/Phy.Mat.14-21.pdf?sequence=1>
- [29] N. Madjoudj et K. Imessad, « Matériau à changement de phase au service de la bioclimatique », *J. Ren. Energies*, vol. 19, n° 4, p. 647-662, oct. 2023, doi: 10.54966/jreen.v19i4.601.
- [30] « Phase Change Material - Material that can absorb, store, and release heat », Material Sample Shop. Consulté le: 23 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur:
<https://www.materialsampleshop.com/products/phase-change-material>

- [31] B. Cárdenas et N. Leon, « High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, p. 724-737, nov. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.07.028.
- [32] « Chine Matériel solide-solide de changement de phase, Matériel solide-solide de changement de phase usine, Acheter Matériel solide-solide de changement de phase, De bonne qualité Matériel solide-solide de changement de phase », Sichuan Aishipaier New Material Technology Co., Ltd. Consulté le: 23 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://french.scasp.cn/index.php?cateId=470773&r=Products/Show>
- [33] R. Zeinelabdein, S. Omer, et G. Gan, « Critical review of latent heat storage systems for free cooling in buildings », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, p. 2843-2868, févr. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.10.046.
- [34] Siad Redouane et Djouhri Sliman, « Amélioration de l'efficacité thermique d'un capteur solaire à air avec système de stockage d'énergie thermique », 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/25796/1/Am%C3%A9lioration%20de%20l%27efficacité%C3%A9%20thermique%20d%27un%20capteur%20solaire%20%C3%A0%20air%20avec%20syst%C3%A8me%20de%20stockage%20d%27%C3%A9nergie%20the_0_compressed.pdf
- [35] Md. H. Zahir *et al.*, « Challenges of the application of PCMs to achieve zero energy buildings under hot weather conditions: A review », *Journal of Energy Storage*, vol. 64, p. 107156, août 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.107156.
- [36] S. Riffat, B. Mempo, et W. Fang, « Phase change material developments: a review », *International Journal of Ambient Energy*, vol. 36, n° 3, p. 102-115, mai 2015, doi: 10.1080/01430750.2013.823106.
- [37] mohamed boutina, « etude de l'apport des materiaux a changement de phase pour la climatisation passive », l'universite de blida, 2013. [En ligne]. Disponible sur: <file:///C:/Users/DSI-FK/Downloads/mim%201.pdf>
- [38] defaas meriem, « INTEGRATION DES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE CPMME SYSTEME DE STPACKAGE DE CHALEUR », universite de jijel. [En ligne]. Disponible sur: <space.univ-jijel.dz:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/10971/Phy.Mat.14-21.pdf?sequence=1UNIVERSITR>
- [39] Md. H. Zahir *et al.*, « Challenges of the application of PCMs to achieve zero energy buildings under hot weather conditions: A review », *Journal of Energy Storage*, vol. 64, p. 107156, août 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.107156.
- [40] O. Mahian, S. Ghafarian, H. Sarrafha, A. Kasaeian, H. Yousefi, et W.-M. Yan, « Phase change materials in solar photovoltaics applied in buildings: An overview », *Solar Energy*, vol. 224, p. 569-592, août 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.06.010.
- [41] Akshayveer, A. Kumar, A. Pratap Singh, R. Sreeram Kotha, et O. P. Singh, « Thermal energy storage design of a new bifacial PV/PCM system for enhanced thermo-electric performance », *Energy Conversion and Management*, vol. 250, p. 114912, déc. 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114912.
- [42] A. Waqas, J. Ji, L. Xu, M. Ali, Zeashan, et J. Alvi, « Thermal and electrical management of photovoltaic panels using phase change materials – A review », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 92, p. 254-271, sept. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.04.091.
- [43] « Installer un équipement PVT eau avec MaPrimeRénov' ». Consulté le: 23 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.quelleenergie.fr/aides-prim/ma-prime-renov/pour-un-pvt>

- [44] S. Alsaqoor, A. Alqatamin, A. Alahmer, Z. Nan, Y. Al-Husban, et H. Jouhara, « The impact of phase change material on photovoltaic thermal (PVT) systems: A numerical study », *International Journal of Thermofluids*, vol. 18, p. 100365, mai 2023, doi: 10.1016/j.ijft.2023.100365.
- [45] M. Sharaf, M. S. Yousef, et A. Huzayyin, « Review of cooling techniques used to enhance the efficiency of photovoltaic power systems », *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, avr. 2022, doi: 10.1007/s11356-022-18719-9.
- [46] R. E. Kassar, A. A. Takash, J. Faraj, M. Khaled, et H. S. Ramadan, « Phase change materials for enhanced photovoltaic panels performance: A comprehensive review and critical analysis », *Energy and Built Environment*, févr. 2024, doi: 10.1016/j.enbenv.2024.02.004.
- [47] R. Reji Kumar, M. Samykan, A. K. Pandey, K. Kadirgama, et V. V. Tyagi, « Phase change materials and nano-enhanced phase change materials for thermal energy storage in photovoltaic thermal systems: A futuristic approach and its technical challenges », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 133, p. 110341, nov. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.110341.
- [48] « Processes | Free Full-Text | Machine Learning-Based Approach for Modeling the Nanofluid Flow in a Solar Thermal Panel in the Presence of Phase Change Materials ». Consulté le: 23 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.mdpi.com/2227-9717/10/11/2291>
- [49] Jean-Pierre DUMAS, « Stockage du froid par chaleur latente ». 3 novembre 2015. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/stockage-de-l-energie-42638210/stockage-du-froid-par-chaleur-latente-be9775/criteres-de-choix-d-un-materiau-a-changement-de-phases-be9775niv10003.html>
- [50] sellami ilyes, blida, 2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://di.univ-blida.dz/xmlui/bitstream/handle/123456789/733/042-2018.pdf?sequence=1>
- [51] MEKHATRIA Ridha, « Etude d'un écoulement entre deux parois ondulées », Université Mohamed Khider de Biskra, 2018. [En ligne]. Disponible sur: http://archives.univ-biskra.dz/bitstream/123456789/14575/1/MEKHATRIA_Ridha.pdf
- [52] Boutasseta Abdellah et Chabani Mostapha, « Simulation numérique d'un l'écoulement à surface libre en présence d'obstacle », Université de Mohammed Seddik Ben Yahia - Jijel, 2019. [En ligne]. Disponible sur: <http://dspace.univ-jijel.dz:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/219/M-HYD.URB-2019-10.pdf>
- [53] : et MEKHATRIA Ridha, « Etude d'un écoulement entre deux parois ondulées », boumerdes, 2019. [En ligne]. Disponible sur: <http://dlibrary.univ-boumerdes.dz:8080/bitstream/123456789/8538/1/memoir%20fin%20d%27etude.pdf>
- [54] « Etude expérimentale et numérique de l'écoulement à surface libre au-dessus du déversoir à seuil épais », Mlle ZERGUIE Nor El Houda, – Université ABOU BEKR BELKAID TLEMCEM, 2018. [En ligne]. Disponible sur: <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/13330/1/Ing.Hyd.Zerguit.pdf>
- [55] Heithem ELBAH et Nouredine Marouani, « Etude numérique d'un tube absorbeur de concentrateur cylindro-parabolique », Université Mohamed Khider de Biskra Faculté des Sciences et Technologie Département de Génie Mécanique, 2020. [En ligne]. Disponible sur: http://archives.univ-biskra.dz/bitstream/123456789/19446/1/Heithem_ELBAH_Nouredine_Marouani.pdf
- [56] KOUROUGHLI MOHAMED ANIS et IGLOULI TAHAR, « Simulation numérique du comportement dynamique et thermique d'un échangeur thermique coaxial », 2019. [En ligne]. Disponible sur: <http://dlibrary.univ-boumerdes.dz:8080/bitstream/123456789/8538/1/memoir%20fin%20d%27etude.pdf>
- [57] « Etude d'un écoulement entre deux parois ondulées », Université Mohamed Khider de Biskra, 2019. [En ligne]. Disponible sur: http://archives.univ-biskra.dz/bitstream/123456789/14575/1/MEKHATRIA_Ridha.pdf

- [58] M. Allouche, « Calcul sismique et modélisation numérique du comportement dynamique des réservoirs de stockage de liquides », [En ligne]. Disponible sur: <https://univ-bejaia.dz/jspui/bitstream/123456789/20791/1/ZOUAOUI%20Lina%20DEBBOU%20Syliia.pdf>
- [59] HALITIM SIHEM HOURIA, « STRATIFICATION THERMIQUE DANS LES TUYAUTERIES D'UN POINT DE VUE INDUSTRIEL », 2012.