

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued
Faculté des Sciences Technologiques

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de fin d'étude

**Présenté pour l'Obtention du Diplôme de
MASTER ACADEMIQUE**

Spécialité : Energétique



Thème

**Refroidissement des panneaux
photovoltaïques, par utilisation des
matériaux à changement de phase (PCM) :
Etude numérique**

Dirigé par :

Mr. Ali BOUKHARI (PhD)

&

Mr. Abdelhak KEDDOUDA (Doctorant)

Présenté par :

- AOUINE Farouk

- ABBASSI Bachir

- BELAID Mohammed El Hadi

- BEN ALI Abdallah

2021/2022

Remerciements

Avec un grand plaisir on remercie ALLAtt qui nous a aidé et nous a donné la patience, le courage et la force d'achever ce travail, et d'aller jusqu'au bout du rêve car sans lui rien n'est possible. Nous tenons à remercier en cette occasion tout le Corps professoral et administratif de Département de Génie Mécanique pour la richesse et la qualité de leurs enseignements et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée. Nous tenons à remercier sincèrement Dr. Ali BOUKHARI, qui, en tant que directeur de thèse, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour ses orientations, la confiance, l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer. Nous exprimons également notre gratitude aux membres du jury, qui nous ont honorés en acceptant de juger et d'évaluer ce modeste travail. Nous tenons à remercier sincèrement nos parents, qui nous ont donné le courage. Nous souhaitons d'adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué de près et de loin à l'enrichissement de notre travail et à notre épanouissement intellectuel.

Dédicace

A mon père, (ALLAH yarhamah), et à ma chère mère pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études..., à ma femme et mes filles, pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral, à mes frères et sœurs, à toute ma famille et mes amis....

(ADUINE Farouk).

Je dédie ce modeste travail : A mon très Cher Père. A ma très Chère Mère. A mes très Chers Frères. A mes très chères sœurs. A mes chers et fidèles amis (ABASSI Bachir).

Je dédie ce modeste travail : A mon très Cher Père. A ma très Chère Mère. A mes très Chers Frères. A mes très chères sœurs. A mes chers et fidèles amis (BELAID Mohammed Elhaddi).

Je dédie ce modeste travail : A mon très Cher Père. A ma très Chère Mère. A mes très Chers Frères. A mes très chères sœurs. A mes chers et fidèles amis (BEN ALI Abdallah).

Table des matières

Remerciement.....	i
Dédicaces.....	ii
Table des matieres.....	iii
Liste des figures.....	vi
Liste des tableaux.....	vii
Introduction general.....	1
CHAPITRE I: Généralités et étude bibliographique	
I-Introduction.....	4
I.1.Panneau solaire photovoltaïque.....	4
I.2.Qu'est-ce que la technologie photovoltaïque (PV) et comment fonctionne-t-elle ?.....	4
I.3.Modules solaires photovoltaïques.....	5
I.4.Types de systèmes solaires photovoltaïques.....	6
I.4.1. Composants des systèmes photovoltaïques.....	7
I.4.2. Les systèmes photovoltaïques typiques se composent des éléments suivants.....	7
I.5. Cellule PV.....	7
I.5.1. Matériaux de cellules solaires photovoltaïques.....	9
I.5.2. Différents types des cellules PV.....	10
I.6. Onduleurs solaires photovoltaïques.....	10
I.7. Effets de la température.....	11
I.8. Généralités sur les techniques de refroidissement et les matériaux à changement de phase.....	11
I.8.1. Technique de refroidissement (technologie de refroidissement).....	12
I.8.1.1. Techniques de refroidissements actives.....	14
I.8.1.2. Techniques de refroidissement passif.....	14
a) - Refroidissement par écoulement d'air.....	14
b) - Refroidissement par changement de phase solide-liquid.....	15
I.8.2. Principe de changement de phase, Chaleur sensible et chaleur latente.....	15
I.8.2.1. Le transfert thermique par Chaleur Sensible.....	15
I.8.2.2. Le transfert thermique par Chaleur Latente.....	16
I.9. Les matériaux à changement de phase (PCM).....	16
I.9.1. Définition.....	17
I.9.2. Principes des matériaux à changement de phase.....	16

I.9.3. Classification des PCMs.....	17
I.9.3.1. Les PCMs Organiques.....	19
I.9.3.2. Les PCMs Inorganiques.....	19
I.9.3.3. Les PCMs Eutectiques.....	20
I.9.4. Les propriétés désirables des PCMs.....	20
I.9.4.1. Propriétés thermophysiques.....	20
I.9.4.2. Propriétés chimiques.....	21
I.10. Conclusion.....	21
CHAPITRE II: Modélisation mathématique	
II- Introduction.....	24
II.1. Description du problème à résoudre.....	24
II.2. Équations du modèle mathématique.....	24
II.2.1. Équation de continuité.....	25
II.2.2. Les équations de quantités de mouvements.....	25
II.2.3. L'équation de la conservation d'énergie.....	25
II.3. Système d'équations gouvernantes.....	27
II.4. Analyse dimensionnel.....	27
II.5. Transfert de chaleur avec changement de phase.....	29
II.6. Solutions numériques du transfert de chaleur avec changement de phase.....	29
II.6.1. Cas où le position exact du front de changement de phase est connu.....	30
II.6.2 Cas où il n'y a pas besoins de connaître la position exacte du front de phase.....	30
II.7. Conclusion.....	30
CHAPITRE III: Méthode numérique et présentation du code "ANSYS FLUENT®"	
III. Introduction	31
III.1. Méthodes des volumes finis.....	32
III.1.1. Principe de la méthode des volumes finis.....	32
III.1.2. Maillage.....	33
III.2. Post-processeur "FLUENT" Le Post-processeur.....	34
III.3. Méthode de résolution des équations de transport.....	34
III.3.1. Schéma de discrétisation.....	34
III.3.2. Choix de la méthode de couplage	34
III.4. Résolution numérique.....	35

Table de matières

III.4.1. Paramètre de contrôle de la convergence.....	35
III.4.2. Les étapes de résolution du problème.....	35
III.5. ANSYS Fluente	36
III.5.1. Introduction	36
III.5.2. Procédure de la simulation	37
III.5.2.1. Logiciel ANSYS Workbench	37
III.5.2.2. Définition	37
III.5.2.3. La structure générale du logiciel est présentée ci-dessous	37
III.5.2.3.1. Création de la géométrie	38
III.5.2.3.2. Le maillage	39
III.5.2.3.3. Configuration (steup)	39
III.6. Conclusion.....	40
CHAPITRE IV : Résultats et discussion	
IV-Introduction.....	43
IV-1. Solution numérique par logiciel ANSYS Fluent.....	43
IV-2. Etude 1 ^{er} Simulation.....	43
IV-3. Etude 2 ^{em} Simulation.....	45
IV-4. Etude 3 ^{em} Simulation.....	47
IV-5. Conclusion.....	51
Conclusion générale.....	52
Références bibliographiques	53
Résumé.....	55

Liste des figures

Fig.I.1: Panneaux solaires photovoltaïques.....	4
Fig.I.2: Dispositions du système PV modulaire.....	5
Fig.I.3: installation photovoltaïque connectée au réseau.....	6
Fig.I.4: Schéma de Structure d'une cellule photovoltaïque.....	8
Fig.I.5: panneau solaire Monocristallin.....	10
Fig.I.6: panneau solaire Polycristallin.....	10
Fig.I.7: film mince souple amorphe	10
Fig.I.8: film mince de sélénure de gallium.....	10
Fig.1.9: Circuit de refroidissement actif.....	14
Fig.I.10: Profil de changement de phase pour le stockage par chaleur latente.....	15
Fig.I.11: Schéma de principe des changements de phase de la matière.....	16
Fig.I.12: Classification des matériaux de stockage d'énergie.....	19
Fig.II.1: Solidification d'un matériau pure	28
Fig.III.1: Schéma représentant le volume de contrôle bidimensionnel.....	32
Fig.III.3: géométrie de panneaux photovoltaïque étudiée.....	33
Fig.III.2: Types de maillage utilisé par "FLUENT"	38
Fig.III.4: Maillage obtenu.....	39
Fig.IV.1: Conditions aux limites applique dans 1 ^{er} simulation.....	42
Fig.IV.2: Distribution de température dans système PV dans 1 ^{er} cas avec source de chaleur.....	43
Fig.IV.5: Condition aux limites applique dans 2 ^{ème} simulation.....	44
Fig.IV.6: distribution de température dans le système PV avec radiation solaire à 08h00 am.....	45
Fig.IV.7: distribution de température dans le système PV avec radiation solaire à 11h00 am.....	45
Fig.IV.8: distribution de température dans le système PV avec radiation solaire à 14h00 pm.....	46
Fig.IV.9: Conditions aux limites appliquées dans la 3 ^{ème} simulation.....	46
Fig.IV.10: Distribution de température dans le PV dans 1 ^{er} cas avec PCM à 08h00 am.....	47
Fig.IV.11: Fraction liquide de PCM à 08h00 am.....	48
Fig.IV.12: Distribution de température dans le PV dans 1 ^{er} cas avec PCM à 11h00 am.....	48
Fig.IV.13: Fraction liquide de PCM à 11h00 am.....	48
Fig.IV.14: Evolution Fraction liquide de PCM à 11h00 am.....	48
Fig.IV.15: Evolution Fraction liquide de PCM à 14h00 pm	49
Fig.IV.16: Evolution de la fraction liquide de PCM à 14h00 Pm.....	49

Liste des tableaux

Tableau I .1: Propriétés thermiques de certains PCMs.....	20
Tableau III.1: Dimensions de panneaux et ses couches.....	38
Tableau III.2: Propriétés chimique de matériaux que contient le PV utilisé.....	40
Tableau IV.1: Les propriété de PCM (cire paraffine)	47

Introduction générale

Les besoins énergétiques d'aujourd'hui ont été principalement satisfaits par les combustibles fossiles et les non-ressources, Les énergies renouvelables s'épuisent à un rythme rapide et en plus d'être des émetteurs de gaz à effet de serre, des solutions basées sur des sources d'énergie renouvelables sont utilisées pour répondre aux défis énergétiques actuels. L'énergie solaire fait partie des sources d'énergie renouvelables propres et inépuisables qui ne produisent pas d'émissions de dioxyde de carbone et ne génèrent aucun déchet. Des efforts de recherche ont été faits au fil des ans pour utiliser efficacement les énormes ressources solaires à l'aide de panneaux photovoltaïques, mais l'efficacité est encore faible car une grande partie de l'énergie solaire est convertie en énergie thermique. Cela réduit non seulement l'efficacité de la production d'électricité, mais affecte également la durée de vie des panneaux photovoltaïques.

Il a été constaté que les performances des panneaux photovoltaïques diminuent avec l'augmentation de la température de l'ensemble. L'efficacité des cellules solaires en silicium cristallin diminue de 5,0 % pour chaque augmentation de 1°C de la température des cellules solaires et cette diminution d'efficacité varie selon le type de cellule.

La température des cellules solaires est fonction de différents paramètres, dont les plus importants sont l'insolation du récepteur, la vitesse Vent à la surface du panneau photovoltaïque, direction du vent et température ambiante. La température des faces avant et arrière du panneau photovoltaïque varie avec le degré d'orientation sous l'effet de la convection, de la conduction et du rayonnement. Depuis le rayonnement solaire tombant sur le panneau photovoltaïque, la vitesse du vent et la température ambiante, sont sous contrôle humain.

La recherche se concentre sur le développement de nouveaux matériaux et de nouvelles méthodes pour abaisser la température des cellules solaires.

Il existe plusieurs façons de réduire l'élévation de température de la surface PV ; Par exemple, L'utilisation du refroidissement actif avec circulation d'air sur la surface inférieure du PV. En tant que liquide de refroidissement pour le PV, l'eau est transportée dans des tubes sur la surface inférieure du PV, qui est destinée à obtenir sur l'eau chaude.

Il existe également une méthode utilisant des matériaux à changement de phase (PCM) Ces méthodes sont capables d'augmenter l'énergie électrique produite par le PV jusqu'à 9 % par rapport à la méthode sans refroidissement.

Les modules photovoltaïques pendant les journées ensoleillées peuvent atteindre des températures supérieures de 35°C à la température ambiante, ce qui influence fortement leurs performances et leur efficacité électrique, car les pertes de puissance peuvent atteindre jusqu'à - 0.65% par degré Celsius. Pour minimiser et contrôler la température des panneaux PV, la communauté scientifique a différentes stratégies et approches innovantes, dont l'une est proposée par le biais du refroidissement passif avec des matériaux à changement de phase (PCM). Cependant, une enquête plus approfondie, y compris les effets de la forme géométrique, de l'isolation, de la température de changement de phase, de la température ambiante et du rayonnement solaire sur la puissance de sortie et l'efficacité du module PV, nécessite une optimisation et des recherches supplémentaires.

Le but de notre travail est de présenter une étude numérique travers des simulations effectuée en CFD (ANSYS Fluent) pour améliorer le refroidissement des panneaux photovoltaïques, via l'utilisation des matériaux à changement de phase (PCM).

Le mémoire présenté comporte quatre chapitres et est organisée de la manière suivante :

- **Une introduction générale** : présentant le but de la thèse et l'intérêt du refroidissement des panneaux photovoltaïques.
- **Le chapitre I** : présente une revue bibliographique, puis présente les généralités sur panneaux photovoltaïques, les techniques du refroidissement et les matériaux à changement de phase (PCM).
- **Le chapitre II** : présente la modélisation mathématique.
- **Le chapitre III** : Méthode numérique et présentation du code "ANSYS FLUENT®".
- **Le chapitre IV** : dans ce chapitre, on présente les résultats de la simulation numérique effectuée.
- **Une conclusion générale** le travail a été conclue par la reprise des principaux résultats obtenus et par des recommandations pour de futures contributions dans le domaine.

CHAPITRE I :

Généralités et étude bibliographique

I-Introduction:

Les panneaux photovoltaïques n'absorbent pas toute l'énergie solaire incidente qui est convertie en électricité (absorbe à peu près 16%), l'ensoleillement restant est absorbé et transformé en chaleur. L'efficacité des cellules photovoltaïques diminue lorsque la température augmente. Cela peut généralement donner lieu à une perte du rendement de 0.5% par °C d'accroissement de la température de fonctionnement de la cellule. Etant donné que, par exemple, les cellules solaires de silicium sont caractérisées à 1000 W/m² et 25°C comme température idéale pour la cellule, en maintenant la température de la cellule à 25°C peut conserver l'efficacité nominale de la cellule. Les cellules subiront également une dégradation à long terme si la température dépasse une certaine limite. Ce problème peut être évité en maintenant une température uniforme dans tout le panneau. [1]

. Dans ce chapitre nous avons présenté des généralités sur les capteurs solaires photovoltaïques, leurs inconvénients et les différentes techniques de refroidissement.

I.1.Panneau solaire photovoltaïque:

Un module photovoltaïque est basé sur la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire absorbé en électricité. Cette conversion s'effectue par une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un processus appelé effet photovoltaïque. [2]

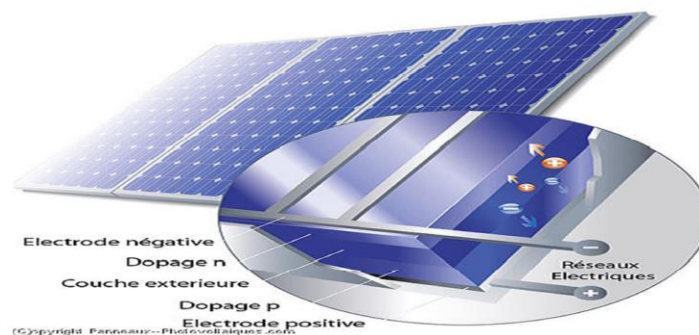


Fig. I.1: Panneaux solaires photovoltaïques [3].

I.2. Qu'est-ce que la technologie photovoltaïque (PV) et comment fonctionne-t-elle?

Les matériaux et dispositifs photovoltaïques convertissent la lumière du soleil en énergie électrique. Un appareil PV unique est appelé une cellule. Une cellule PV individuelle est généralement petite, produisant généralement environ 1 ou 2 watts de puissance. Ces cellules sont constituées de différents matériaux semi-conducteurs et ont souvent une épaisseur inférieure à quatre cheveux humains. Afin de résister à l'extérieur pendant de nombreuses années, les cellules sont prises en sandwich entre des matériaux de protection dans une combinaison de verre et/ou de plastique.

Pour augmenter la puissance de sortie des cellules photovoltaïques, elles sont connectées ensemble en chaînes pour former des unités plus grandes appelées modules ou panneaux. Les modules

peuvent être utilisés individuellement, ou plusieurs peuvent être connectés pour former des tableaux. Un ou plusieurs générateurs sont ensuite connectés au réseau électrique dans le cadre d'un système PV complet. En raison de cette structure modulaire, les systèmes photovoltaïques peuvent être construits pour répondre à presque tous les besoins en énergie électrique, petits ou grands.

Les modules et générateurs PV ne sont qu'une partie d'un système PV. Les systèmes comprennent également des structures de montage qui pointent les panneaux vers le soleil, ainsi que les composants qui prennent l'électricité en courant continu (CC) produite par les modules et la convertissent en électricité en courant alternatif (CA) utilisée pour alimenter tous les appareils de votre domicile.

Les systèmes photovoltaïques sont fiables et sans pollution. Dépend Le soleil comme source d'énergie renouvelable. Ces systèmes fonctionnent mieux dans les bâtiments à haut niveau d'efficacité énergétique. Par conséquent, il est logique de s'assurer d'abord que la consommation électrique globale du bâtiment est à un niveau optimal, en réduisant la consommation inutile et en utilisant la climatisation, l'éclairage, les appareils et les fenêtres à haute efficacité énergétique avant d'investir dans un système photovoltaïque. [30]

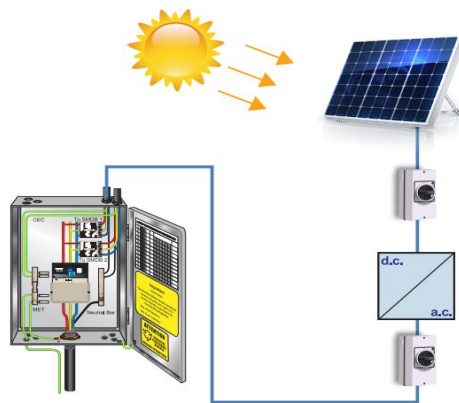
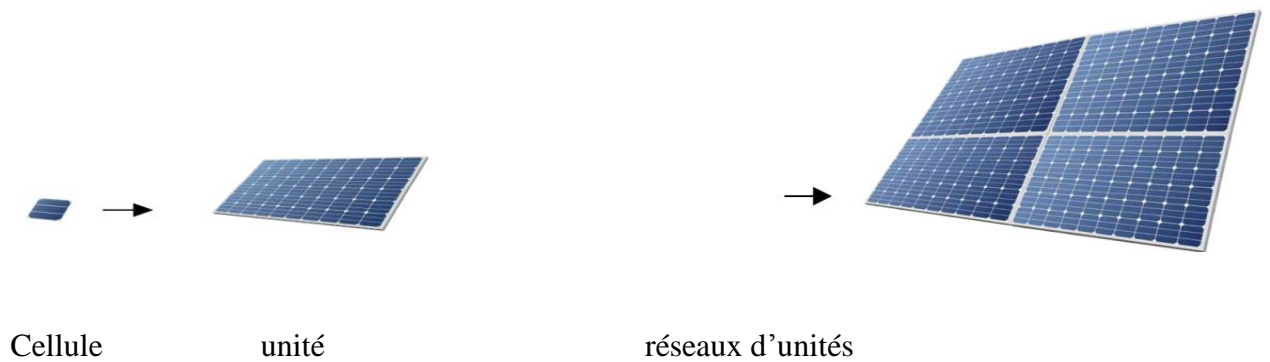


Fig. I.2: Dispositions du système PV modulaire [30]

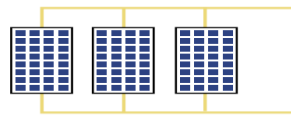
I.3. Modules solaires photovoltaïques :

Les cellules solaires photovoltaïques sont interconnectées en série et en parallèle pour former Modules photovoltaïques. Les modules, à leur tour, peuvent être combinés et liés pour former des réseaux de cellules photovoltaïques de différentes tailles et puissances de sortie. Les unités de réseau constituent l'essentiel d'un système PV, qui peut également inclure des connexions électriques, des luminaires, des charges ou des équipements de conditionnement de l'alimentation.



Les modules solaires photovoltaïques ont généralement l'une des deux options suivantes :

a) Connectez-les en parallèle afin que le courant de l'unité soit la somme de tous les courants de l'unité et que la tension de sortie reste la même que la tension de l'unité.



b) Connectez-les en série de sorte que la tension de sortie soit la somme de toutes les tensions de l'unité et que le courant de sortie reste le même que le courant de l'unité.

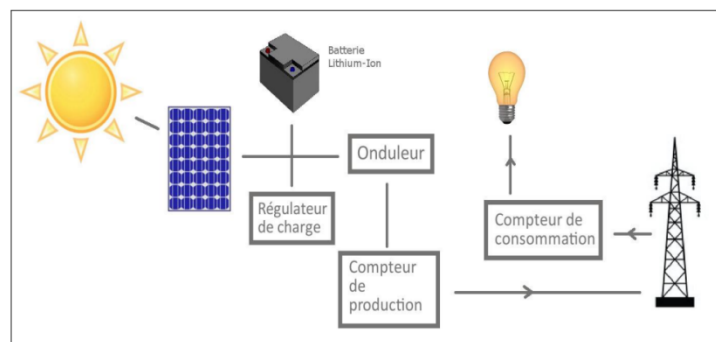
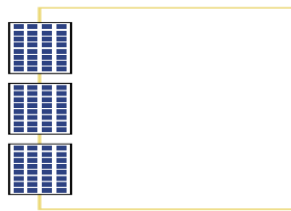


Fig. I.3: Installation photovoltaïque connectée au réseau [30]

I.4.Types de systèmes solaires photovoltaïques :

Il existe deux principaux types de systèmes solaires photovoltaïques :

a) Systèmes solaires photovoltaïques connectés aux réseaux de distribution : systèmes électriques PV solaire connecté en parallèle avec un système de distribution basse tension.

b) Systèmes solaires PV non connectés aux réseaux de distribution ou indépendants :

Ce sont des systèmes solaires photovoltaïques qui ne sont pas connectés en parallèle avec un système de distribution peu d'effort.

I.4.1. Composants des systèmes photovoltaïques :

La cellule photovoltaïque est le composant de base d'une centrale photovoltaïque, elle produit généralement Interconnectés pour former des modules qui peuvent produire plus de puissance (par exemple : 250 watts/unité). Chaque cellule a environ 1 ou 2 watts de puissance. Pour profiter de ces cellules, il est connecté.

I.4.2. Les systèmes photovoltaïques typiques se composent des éléments suivants :

- a) Une cellule solaire forme une unité qui, lorsqu'elle est connectée graphiquement à l'aide de câbles et de conducteurs, forme des chaînes et des réseaux.
- b) Ensuite, ces chaînes et tableaux sont connectés aux transformateurs pour transformer le courant de sortie.

Ces séries et tableaux sont convertis en courant alternatif, puis peuvent être utilisés Dans la limite de la demande d'électricité dans les bâtiments.

- c) Câbles électriques, ensembles d'appareillage de commutation, dispositifs de commande et systèmes Unités de surveillance, de mesure et de protection.
- d) Les structures mécaniques qui supportent les unités et les orientent vers le soleil. [30]

I.5. Cellule PV:

Les cellules photovoltaïques, ou cellules solaires, convertissent directement la lumière du soleil en électricité. Les cellules photovoltaïques sont assemblées dans des systèmes de plaques plates qui peuvent être montés sur les toits ou d'autres zones ensoleillées. Ils génèrent de l'électricité sans pièces mobiles, fonctionnent silencieusement sans émissions et nécessitent peu d'entretien. Une cellule photovoltaïque individuelle produira généralement entre 1 et 2 W.

Pour augmenter la puissance de sortie, plusieurs cellules sont interconnectées pour former un module. Les systèmes photovoltaïques sont disponibles sous la forme de petits systèmes résidentiels sur le toit (moins de 10 kWe), de systèmes de taille moyenne dans la plage de 10 à 100 kWe et de systèmes plus grands de plus de 100 kWe connectés aux départs de distribution des services publics.

Deux couches semi-conductrices dans la cellule solaire créent le courant d'électrons. Des matériaux, tels que le silicium, conviennent à la réalisation de ces couches semi-conductrices et présentent chacun des avantages et des inconvénients pour différentes applications. En plus des matériaux semi-conducteurs, les cellules solaires sont constituées de deux grilles métalliques ou contacts électriques. L'un est placé au-dessus du matériau semi-conducteur et l'autre est placé en dessous. La

grille ou le contact supérieur collecte les électrons du semi-conducteur et les transfère à la charge externe. La couche de contact arrière est connectée pour compléter le circuit électrique. [4]

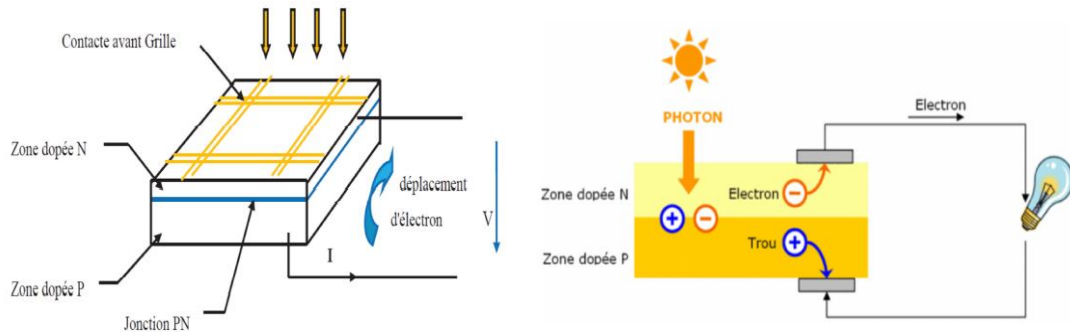


Fig. I.4: Schéma de Structure d'une cellule photovoltaïque [5].

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectronique qui transforment directement la lumière solaire en énergie électrique par un phénomène appelé « effet photovoltaïque » découvert par E. Becquerel en 1839. Les plaques solaires sont fabriquées partir d'un matériau semi-conducteur, généralement du cristal de silicium. Lorsque le rayonnement solaire atteint le capteur solaire photovoltaïque, la lumière est absorbée par les cristaux de silicium. Cette absorption décolle les électrons de leurs atomes, faisant circuler les électrons à travers les cristaux de silicium et produit de l'électricité. [6]

Ils présentent de nombreux avantages, notamment un fonctionnement totalement silencieux, une adaptabilité à divers environnements météorologiques et d'installation, et l'absence de pièces mobiles. Ils nécessitent également un minimum d'entretien et ont une longue durée de vie. L'avantage le plus important est peut-être qu'ils génèrent de l'électricité sans produire d'émissions de gaz à effet de serre ou d'autres gaz. Une cellule PV se compose de deux ou plusieurs couches minces de matériau semi-conducteur, principalement du silicium. Lorsqu'ils sont exposés à la lumière, des charges électriques sont générées, évacuées par des contacts métalliques sous forme d'électricité CC. Généralement, la sortie électrique d'une seule cellule est faible, de sorte qu'un certain nombre de cellules sont connectées ensemble en série et en parallèle pour produire le courant et la tension requis, et encapsulées généralement avec un couvercle en verre et une feuille de plastique pour former un module généralement appelé " panneau". [7]

L'élément de base d'un système PV est le panneau PV et n'importe quel nombre de panneaux peut être connecté ensemble, toujours en série ou en parallèle, pour produire la puissance électrique souhaitée. En fait, cette structure modulaire est un avantage considérable du système PV, car plusieurs panneaux peuvent être ajoutés à un système existant en fonction des besoins, selon les besoins.

Les systèmes PV peuvent être utilisés efficacement dans n'importe quelle application alimentée par l'électricité, bien que les systèmes rentables incluent les communications terrestres et spatiales, l'alimentation électrique à distance dans les stations relais, les systèmes de surveillance à distance, l'éclairage des rues, des parkings et domestiques, le pompage de l'eau et le chargement des batteries, principalement pour les véhicules d'urgence tels que les camions de pompiers. La capacité installée mondiale de PV à fin 2015 a dépassé, pour la première fois, la limite de 227 GWc. [8]

Comme mentionné ci-dessus, les modules PV sont conçus pour une utilisation en extérieur et peuvent être utilisés dans diverses situations difficiles telles que les environnements désertiques, marins, tropicaux, arctiques et spatiaux. Un certain nombre de matériaux actifs PV peuvent être utilisés et le choix du matériau à utiliser dans chaque cas a des effets importants sur la conception et les performances du système PV. Ces matériaux diffèrent par la composition du matériau et sa structure atomique. La structure atomique d'une cellule PV peut être basée sur l'un des trois principaux types ; le silicium monocristallin (monocristallin), polycristallin ou amorphe ; le matériau PV le plus couramment produit et utilisé est le silicium cristallin, sous forme polycristalline ou monocristalline. Le plus grand avantage des cellules solaires en silicium amorphe est qu'elles peuvent être déposées sur une variété de formes, telles que des tuiles, ce qui ouvre de nouveaux horizons dans les applications possibles du PV. [9]

Comme vu ci-dessus, un panneau PV, également appelé module PV, est un ensemble de cellules PV qui protège les cellules et fournit une tension de fonctionnement utilisable. Les cellules PV sont des composants délicats constitués de feuilles minces qui sont fragiles et sensibles à la corrosion par l'humidité et les empreintes digitales. De plus, la tension de fonctionnement d'une seule cellule PV est très faible, généralement inférieure à 1 V, ce qui ne convient pas à de nombreuses applications pratiques. De plus, selon le fabricant et le type de matériau PV utilisé, les modules ont des apparences (comme une couleur bleuâtre ou verdâtre) et des caractéristiques de performance différentes. [10]

I.5.1. Matériaux de cellules solaires photovoltaïques :

Les cellules photovoltaïques en silicium cristallin sont les plus couramment utilisées aujourd'hui. Les dispositifs photovoltaïques sont également pionniers dans la réussite dans ce domaine. Donc, Les cellules photovoltaïques typiques. Les cellules solaires en silicium cristallin fournissent un bon exemple des fonctions.

Bien que les cellules en silicium cristallin soient le type le plus courant, les cellules Les cellules photovoltaïques ou cellules solaires sont constituées de nombreux matériaux semi-conducteurs. Chaque sujet a des points Les matériaux des cellules photovoltaïques varient en fonction de leur degré de cristallinité, de leur bande interdite, de leur absorption, de leur résistance et de leurs propriétés uniques

qui affectent leur adéquation à des utilisations particulières. Par exemple, vous pouvez et la complexité de la fabrication. [11]

I.5.2. Différents types des cellules PV:

Il ya plusieurs familles de cellules photovoltaïques. Actuellement, les plus utilisées, sur le marché sont les cellules en silicium cristallin et les cellules en couches minces. D'autres sont encore en phase de recherche et développement. [12]

a) Silicium (Si) : compris le silicium monocristallin, le silicium polycristallin et le silicium amorphe.

b) Couches minces : dont sélénure de gallium (CIGS), tellure de cadmium (CdTe), un film mince à base de silicium.

c) Couches minces monocristallines : y compris les matériaux à haut rendement tels que (GaAs).

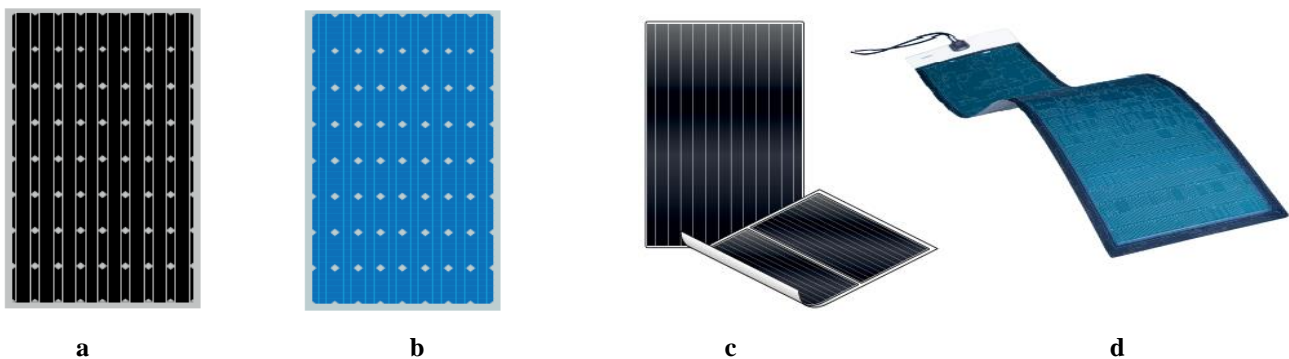


Fig. I.5: Différents types de panneau solaire; **a)** panneau solaire Monocristallin, **b)** panneau solaire Polycristallin **c)** film mince souple amorphe **d)** film mince de sélénure de gallium [30]

I.6. Onduleurs solaires photovoltaïques :

Les transformateurs convertissent la tension et le courant continu en tension et courant alternatifs à utiliser pour répondre aux demandes de l'électricité pour divers appareils. Les types de transformateurs les plus courants sont :

a) Transformateurs autonomes utilisés dans des systèmes déconnectés isolés ou décentralisés Dans le réseau d'utilisation, si le transformateur reçoit la tension et le courant continu des batteries

Chargés ou non par des chaînes et des panneaux d'énergie PV.

b) Transformateurs en réseau qui régulent la quantité de tension et de courant reçue de série DC et tableaux, puis le convertit en AC en s'assurant que La puissance est en phase ou synchrone avec la puissance du réseau. Cela permet d'exporter tout excédent.

L'énergie est générée par le système photovoltaïque vers le réseau de distribution. Les commutateurs de réseau doivent, en plus de leur fonction première de commutation entre DC et AC, les fonctions suivantes :

- a) puissance et fréquence avec le réseau de courant alternatif.
- b) Synchronisation de la tension
- c) Déconnexion du réseau si la tension et la fréquence sont en dehors des limites autorisées ou en cas de Panne du réseau de distribution. Sortie dans les limites harmoniques.
- d) Assurer que la forme d'onde des courantes alternatives oscillations spécifiées.
- e) Modifier la tension de fonctionnement du générateur photovoltaïque pour assurer la limite d'extraction maximum d'énergie de celui-ci.
- f) Surveillance des défauts de mise à la terre et d'isolement par rapport à la borne DC du système d'alimentation Solaire photovoltaïque. [12]

I.7. Effets de la température :

La performance des modules PV est inversement proportionnelle à la température du module (Par exemple, une augmentation d'un degré Celsius de la température de l'unité cristalline au-dessus de sa moyenne dans les conditions qu'elle entraîne généralement une baisse de ses performances de 5.0 % (elle représente donc Essai standard

La ventilation derrière les modules PV est d'une grande importance pour réduire cette réduction de performances ou les réduire.

Les transformateurs dissipent la chaleur et doivent être pourvus d'une ventilation. Les distances de dégagement doivent également être fournies spécifié par le fabricant. Le non-respect de ce qui précède peut entraîner une perte de la performance du système; Les performances du transformateur se dégradent lorsqu'il atteint sa température maximale de fonctionnement.

Cela doit être confirmé dans le manuel d'utilisation et d'entretien, et éventuellement à l'aide d'une étiquette indiquant qu'Obstruction de la ventilation à côté du transformateur. Il faut aussi s'assurer que les transformateurs sont installés loin de Lumière directe du soleil (ex : zones ombragées ou à l'intérieur d'une pièce) pour éviter l'exposition Aux températures élevées, surtout en été.

Nettoyage de l'appareil le plus souvent, et parfois du brouillard (rare à EL-OUED, provoqué de la condensation sur les équipements extérieurs) et beaucoup de saleté (lorsque les tempêtes de sable soufflent l'obtenir de L'efficacité des modules solaires photovoltaïques est fortement augmentée. Parfois, cela peut provoquer une accumulation de poussière sur les unités photovoltaïques.

I.8. Généralités sur les techniques de refroidissement et les matériaux à changement de phase (PCM):

Dans le but d'économiser et de gérer rationnellement la consommation énergétique, les recherches se focalisent actuellement sur l'optimisation des systèmes énergétiques.

L'une des stratégies d'économie de l'énergie est le stockage. Les systèmes de stockage de l'énergie par chaleur latente, utilisant des matériaux à changement de phase (PCM), ont reçu, ces dernières années, une attention particulière. La raison majeure de l'utilisation de tels systèmes est leur densité énergétique élevée, comparativement aux systèmes de stockage par chaleur sensible. Il est à constater que pour tels cas, le rapport "énergie stockée" au "poids et/ou volume de stockage" est plus important en comparaison avec d'autre type de stockage (sensible par exemple).

Le mode de stockage d'énergie thermique par chaleur latente de fusion présente plusieurs avantages et trouve des applications techniques variées dans divers domaines, parmi lesquels on peut citer:

- Le stockage d'énergie solaire thermique pour éviter les pics thermiques et réduire la charge de climatisation dans l'habitat, pour réduire la charge de chauffage (en utilisant un système de stockage de l'énergie solaire thermique pendant la phase diurne).
- Le refroidissement des appareils fonctionnant dans des conditions extrémales, comme le cas des caméras électroniques utilisées lors des incendies, appareillage des volcanologues, microprocesseur informatique, etc...
- Le stockage du froid qui permet une alimentation continue en froid, en cas de panne des installations frigorifiques, surtout pour des secteurs sensibles (pharmaceutique par exemple) ; les systèmes de stockage de froid par chaleur latente peuvent être utilisés afin de mieux gérer la consommation d'électricité nécessaire à la climatisation des édifices. [13]

I.8.1. Technique de refroidissement (technologie de refroidissement) :

Diverses technologies peuvent être utilisées pour réaliser le refroidissement des systèmes PV tels que liquide, à base d'air, à caloduc et à base de matériaux à changement de phase.

Cependant, la technologie de refroidissement dépend de plusieurs facteurs tels que le type de technologie photovoltaïque utilisés, les types d'ingénierie photovoltaïque et les conditions météorologiques, le lieu d'installation du système.

Dans les systèmes de réfrigération, les technologies de réfrigération ont été classées comme :

- 1 - système de refroidissement passif.
- 2 - Système de refroidissement actif.

Le système de refroidissement passif fait référence aux technologies qui réduisent la température du module PV ci-dessous En absorbant leur chaleur sans consommation d'énergie supplémentaire. Ce mécanisme consiste à transférer la chaleur de l'endroit où elle a été générée et à la dissiper dans l'environnement.

Dans un matériau à changement de phase, il existe de nombreuses méthodes de refroidissement passif disponibles, y compris la plus simple Formes L'utilisation de matériaux solides de métaux à haute conductivité thermique, tels que l'aluminium et le cuivre, ou un réseau d'ailettes ou d'autres surfaces extrudées pour améliorer le transfert de chaleur vers l'environnement. Des systèmes plus complexes incluent l'utilisation de matériaux à changement de phase (PCM) et diverses méthodes de circulation naturelle, ainsi que l'utilisation de caloducs capables de transférer efficacement la chaleur via un processus de condensation par ébullition.

Les systèmes de refroidissement actifs consistent en un mécanisme d'extraction de chaleur utilisant des dispositifs tels que des ventilateurs ou en pompant de l'eau sur des panneaux pour extraire la chaleur. Bien que le système actif consomme de l'énergie, il a été utilisé dans des situations où l'efficacité ajoutée des panneaux est supérieure à l'énergie nécessaire pour faire fonctionner le système. Ces systèmes sont principalement utilisés dans ces situations où certains avantages peuvent être obtenus D'autres, comme la récupération de la chaleur perdue pour le chauffage de l'eau sanitaire.

A l'heure actuelle, le principal problème rencontré dans les cellules photovoltaïques est la conversion de Rayonnement aux impulsions électriques et coût d'une cellule solaire photovoltaïque. Pour surmonter ces deux problèmes, l'application de la technologie de refroidissement dans une cellule photovoltaïque est la meilleure approche. Plusieurs méthodes ont été proposées Et utilisez-le pour atteindre l'objectif de refroidissement des cellules photovoltaïques. Ces méthodes se répartissent en deux catégories principales de refroidissement actif, qui nécessite de l'énergie pour faire fonctionner le système, et de refroidissement passif, qui ne nécessite pas d'énergie pour faire fonctionner le système. La régulation thermique des matériaux à changement de phase (PCM) est également une méthode de classe passive.

La méthode de refroidissement passif est principalement utilisée par rapport aux méthodes de refroidissement actives pour la production d'énergie Photovoltaïque industriel car il nécessite de l'énergie pour pomper de l'eau ou de l'air pour le refroidissement et nécessite donc moins d'entretien.

Les techniques de refroidissement utilisées peuvent être passives, actives ou hybride (une combinaison entre les techniques passives et actives). Les techniques de refroidissement actives sont basées sur le transfert de chaleur par convection forcée et nécessitent l'utilisation d'une pompe mécanique pour assurer la circulation du fluide caloporteur et un circuit externe pour évacuer la chaleur du système vers l'extérieur. Les techniques de refroidissement passives sont relativement simples et leur utilisation ne nécessite aucune alimentation externe ce qui les rend fiables avec un coût relativement faible.

I.8.1.1. Techniques de refroidissements actifs:

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. [14]

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. [14]

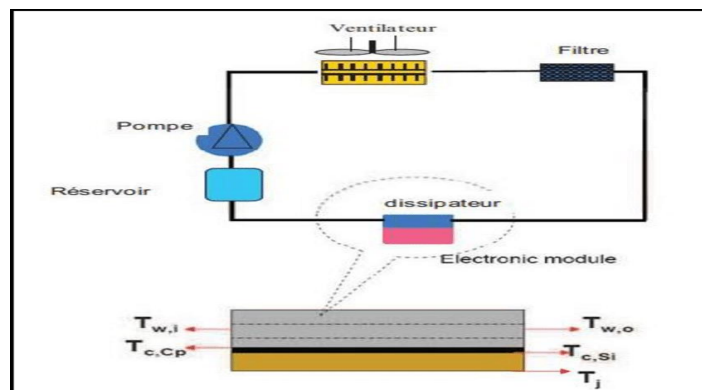


Fig.1.9: Circuit de refroidissement actif [14].

I.8.1.2. Techniques de refroidissement passif:

a) - Refroidissement par écoulement d'air:

C'est le système de refroidissement le plus simple à utiliser pour évacuer la puissance thermique vers l'air environnant par convection naturelle. Il ne nécessite aucun équipement annexe les systèmes de refroidissement par écoulement d'air où le transfert thermique s'effectue par convection naturelle. Comme le coefficient d'échange en convection naturelle entre l'air et la surface des ailettes reste faible et que le refroidissement par convection naturelle ne s'adresse qu'à des faibles puissances thermiques (inférieures à 50 W) il n'est pas adéquat aux panneaux solaires. Par suite, il est nécessaire d'assurer un mouvement d'air par convection forcée afin d'assurer une évacuation du flux thermique.

L'utilisation des ailettes dans les systèmes de refroidissement a pour but d'augmenter la surface d'échange et par conséquent, d'améliorer l'évacuation de la chaleur vers l'air ambiant. Les ailettes sont fabriquées en matériau très bon conducteur de la chaleur tel que l'aluminium. [15]

b) - Refroidissement par changement de phase solide-liquide:

Les matériaux à changement de phase solide-liquide se liquéfient en augmentant leur température dans une gamme bien connue. Lors du changement de phase solide-liquide, le PCM (Matériau à Changement de Phase) stocke à une température constante de la chaleur qu'il prélève au système à refroidir.

La quantité de chaleur stockée est proportionnelle à l'enthalpie de changement de phase du matériau et à sa masse. Celle-ci est rejetée à l'extérieur. Les performances thermiques des matériaux à changement de phase ont été étudiées dans la littérature. Il est montré que l'application des PCM est bien adaptée pour la dissipation thermique de la chaleur en régime transitoire. En effet, le stockage de la chaleur peut être effectué dans les périodes de pic de températures et le rejet de cette charge thermique peut être fait au moment où la température est en dessous de celle de fusion du PCM. Cette technique de refroidissement permet de réduire la taille du système, son coût et son encombrement. L'inconvénient majeur de cette technique de refroidissement passif est la résistance thermique qui est élevée. [16]

I.8.2. Principe de changement de phase, Chaleur sensible et chaleur latente :

Tout matériau, solide ou liquide (ou gazeux) possède une capacité à stocker ou céder de l'énergie sous forme de chaleur. On distingue deux types de stockage de chaleur (ou stockage thermique) à savoir par chaleur sensible et chaleur latente. La Figure I.10 représente les différentes étapes d'un tel système de stockage.

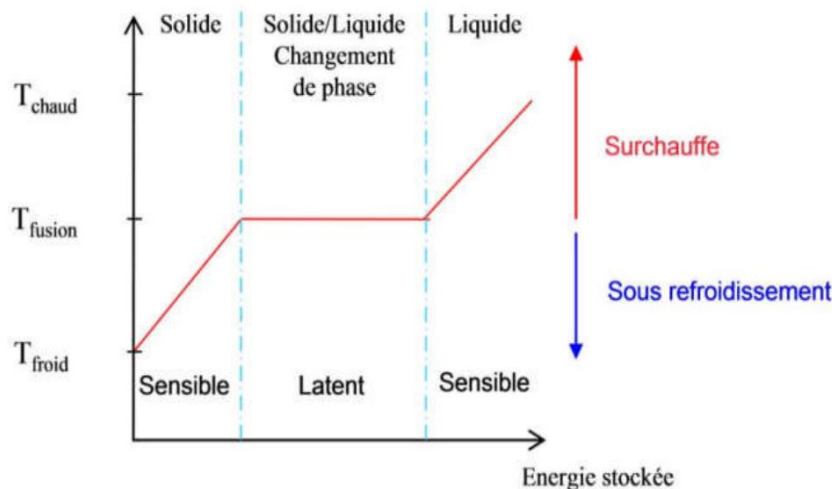


Fig. I.10: : Profil de changement de phase pour le stockage par chaleur latente. [17]

I.8.2.1. Le transfert thermique par chaleur sensible :

Dans ce cas, l'énergie thermique transférée fait varier la température du matériau (Fig. I.11, zone sensible). Si h est l'enthalpie massique du matériau, la variation de la quantité de chaleur Q échangée par le matériau lorsqu'il passe d'un état initial noté avec l'indice i à un état final noté avec l'indice f peut être exprimé comme suit :

$$Q = m (h_f - h_i) \quad (J) \dots\dots\dots(I. 1)$$

Avec:

m : la masse du matériau [kg]

h_i : l'enthalpie massique initiale [J/kg]

h_f : l'enthalpie massique finale [J/kg]

dans le cas de la capacité thermique massique du matériau (notée C_p) est constante, l'équation (I.1) de la variation de la quantité de chaleur peut s'écrire comme suit :

$$Q = m.C_p. (T_f - T_i) \quad (J) \dots\dots\dots(I. 2)$$

T_i : la température initiale [K]

T_f : la température finale [K]

C_p : la chaleur spécifique à pression constante du matériau [J/K]

I.8.2.2. Le transfert thermique par chaleur latente :

Dans ce cas, le matériau peut stocker ou céder de l'énergie par simple changement d'état, tout en conservant une température constante, celle du changement d'état. La grandeur utilisée pour quantifier la CL échangée par un matériau est la Chaleur Latente de Changement de Phase notée L_f (f : pour fusion) pour un changement de phase liquide/solide, et L_v (v pour vaporisation) pour un changement de phase Liquide/Vapeur. Celle-ci est exprimée en J/kg.

Le stockage d'énergie par chaleur latente de fusion est plus bénéfique comparé à celui par chaleur sensible. Une quantité importante d'énergie est stockée lors de la fusion: Par exemple, dans un kilogramme de brique réfractaire, il est possible de stocker environ 1 kJ pour chaque degré d'élévation de la température, alors qu'en faisant fondre un kilogramme de paraffine, environ 250 kJ sont absorbés.

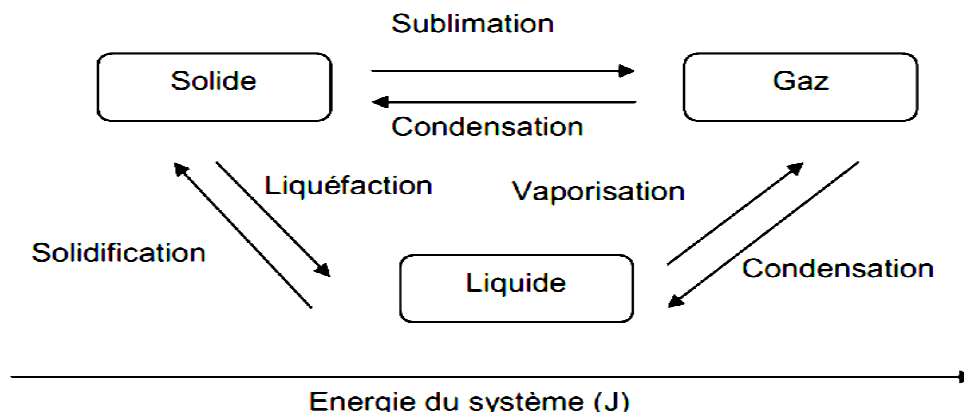


Fig. I.11: Schéma de principe des changements de phase de la matière. [17]

Le stockage par chaleur latente consiste à utiliser le point de fusion ou de vaporisation d'un matériau. Il est alors appelé matériau à changement de phase (PCM). Tout l'intérêt de ce principe réside lors du changement d'état du matériau (Fig. I.10)

Lors du changement de phase, le PCM emmagasine ou relâche une très grande quantité d'énergie pour un volume relativement faible et sur une gamme de température plus petite qu'en sensible. Pour illustrer le phénomène, on peut citer l'exemple suivant : la quantité d'énergie nécessaire pour liquéfier 1 kg d'eau (en latent) de -1°C à 1°C est égale à la quantité d'énergie nécessaire pour chauffer la même quantité d'eau liquide (en sensible) de 1°C à 83°C . La puissance, quant à elle, est inférieure à un système sensible et s'explique par la faible conductivité thermique des PCMs. Cela signifie qu'il faut plus de temps pour stocker ou déstocker une même quantité d'énergie en latent qu'en sensible.

I.9. Les matériaux à changement de phase (PCM):

I.9.1. Définition : Matériau à changement de phase, ou PCM, tout matériau capable de changer d'état physique dans une plage de température restreinte. Dans cet intervalle de température, le changement de phase prépondérant reste la fusion/solidification. Ces températures sont accessibles naturellement et sont omniprésentes dans la vie quotidienne (température d'ambiance d'une maison, température d'un corps humain, de l'eau chaude sanitaire, etc.). [18]

Un matériau à changement de phase (PCMs) est ont une chaleur de fusion élevée en général et une substance qui stocke et libère de l'énergie thermique. Lorsqu'un PCM cristallise, il libère de grandes quantités d'énergie (exothermique) et, lorsqu'il fond, passant de la forme solide à liquide, il absorbe une quantité égale d'énergie (endothermique). Un tissu contenant un PCM peut agir comme une barrière thermique transitoire qui régule le flux de chaleur. L'absorption de chaleur par les PCMs entraîne un retard de la température du microclimat et donc une diminution substantielle de la quantité de sueur

produite par la peau du porteur. Les deux entraînent une amélioration du confort de port et préviennent le stress thermique [20].

Les PCMs peuvent stocker/libérer une grande quantité d'énergie pendant les processus de fusion/solidification. Les PCMs ont été considérés comme des supports de stockage avec un large éventail d'applications, notamment le refroidissement des produits alimentaires, les systèmes thermiques des engins spatiaux, les textiles, les bâtiments, les systèmes solaires et les systèmes de récupération de la chaleur résiduelle [19].

I.9.2. Principes des matériaux à changement de phase:

Les matériaux à changement de phase utilisent la chaleur latente de changement de phase pour contrôler la température dans une plage spécifique. Lorsque la température dépasse un certain point, les liaisons chimiques dans le matériau vont commencer à briser et le matériau absorbe la chaleur dans un endothermique processus ou il passe de l'état solide à l'état liquide. Comme la température baisse, le matériau dégage l'énergie et revient à l'état solide.

Les matériaux à changement de phase (PCMs) possèdent la capacité d'absorber de l'énergie lorsque la phase passe du solide au liquide et de libérer de l'énergie lorsque la phase passe du liquide au solide. En 1987, la technologie d'utilisation des matériaux à changement de phase (PCM) dans les vêtements a été développée et brevetée dans le but d'améliorer l'isolation thermique des matériaux textiles lors des changements de conditions de température ambiante [20].

De nombreux PCMs changent de phase dans une plage de températures juste au-dessus et en dessous de la température de la peau humaine, qui est utilisée pour fabriquer des tenues de protection toutes saisons, et celles pour les environnements changeant brusquement. Les matériaux tels que les fibres, les tissus et les mousses avec PCMs intégrés stockent la chaleur du corps et la restituent ensuite lorsque le corps en a besoin. En raison de la nature dynamique des changements de phase, ces matériaux passent continuellement du solide au liquide et inversement en fonction du mouvement physique du corps et de la température extérieure.

Lorsque les PCMs condensés sont chauffés au point de fusion, ils absorbent l'énergie thermique lorsqu'ils passent d'un état solide à un état liquide et un effet de refroidissement à court terme est produit dans les couches de vêtements par cet effet de changement de phase. L'énergie thermique nécessaire à cet effet peut provenir du corps ou d'un environnement chaud, et une fois les PCMs totalement fondus, le stockage de chaleur s'arrête. Lorsqu'un vêtement PCM est porté dans des environnements extrêmement froids, où la température est inférieure au point de congélation du PCM et la température du tissu chute en dessous de la température de transition, le PCM liquide micro-encapsulé se convertira

à l'état solide, générant de l'énergie thermique et produisant un momentané effet chauffant. En d'autres termes, lorsqu'il est utilisé en quantité suffisante, cet échange thermique crée un effet tampon dans les vêtements, minimisant les changements de température de la peau et maintenant le confort thermique du porteur. Les couches de tissu des vêtements PCMs doivent traverser la plage de températures de transition avant que les PCMs ne changent de phase et produisent ou absorbent de la chaleur. Par conséquent, le porteur doit effectuer une certaine activité pour que la température du tissu PCM change. Généralement, les PCMs présentent des phénomènes transitoires et n'ont aucun effet dans un environnement thermique en régime permanent [21].

I.9.3. Classification des PCMs:

La classification générale des matériaux, utilisée depuis par la communauté scientifique du stockage latent. Cette classification est illustrée sur la Figure suivants:

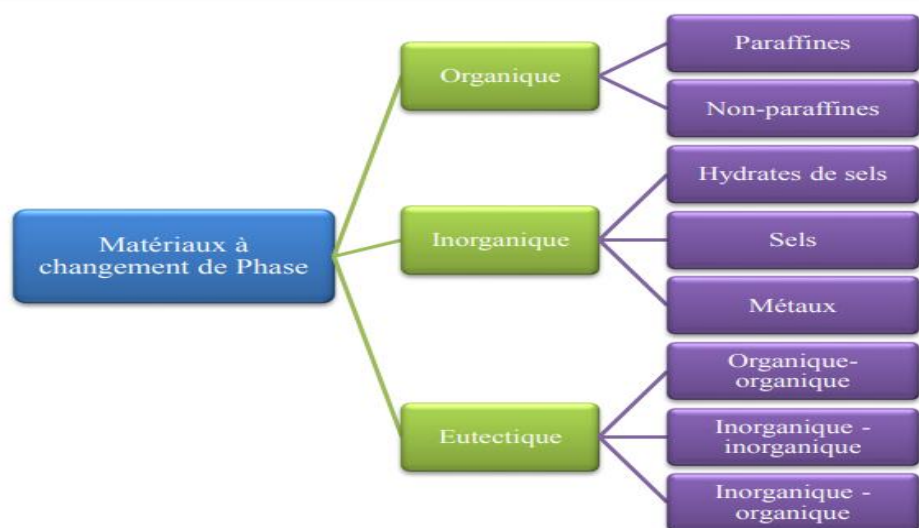


Fig. I.12: Classification des matériaux de stockage d'énergie. [17].

La méthode de stockage d'énergie thermique la plus couramment utilisée est la méthode à chaleur sensible (à eau). En plus d'être abondante, bon marché et non toxique, l'eau a une capacité thermique élevée permettant de l'utilisée à la fois comme un stockeur d'énergie et comme un fluide caloporteur [22].

I.9.3.1. Les PCMs Organiques:

Les matériaux ou les substances organiques ont une température ou une plage de température comprise entre 0°C et 150°. Les plus utilisés sont essentiellement à base de paraffine, des acides gras et des alcools de sucre. Ils comportent certains inconvénients, comparés aux avantages des PCM inorganiques : ils ont une plus faible conductivité à l'état solide et à l'état liquide, ils ont une chaleur

latente de fusion plus faible, ils sont inflammables. Par contre, ils ont des avantages majeurs ; ils sont disponibles dans une large gamme de températures et sont compatibles avec les matériaux conventionnels de construction, ils sont chimiquement stables et ne nécessitent pas l'utilisation d'agents de nucléation. Ils sont non réactifs la plupart du temps et ils sont recyclables.

I.9.3.2. Les PCMs Inorganiques:

Les matériaux ou les substances inorganiques ont une température ou une plage de températures de fusion comprise entre -100°C et $+1000^{\circ}\text{C}$. Les plus utilisés sont : Léau (température de fusion 0°C), les solutions aqueuses de sel (température de fusion inférieure à 0°C), des sels hydratés (température de fusion comprise entre 5°C et 130°C), des mélanges de sels, des mélanges de métaux (température de fusion supérieur à 150°C). Ils ont plusieurs avantages : ils ont une chaleur latente importante et une haute conductivité thermique. Ils ont une fusion nette (c.-à-d. une plage de fusion étroite). Ils sont non-inflammables et ils ont un coût d'investissement abordable. Ils sont en général 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.

I.9.3.3. Les PCMs Eutectiques:

Les PCMs eutectiques sont des substances composées de plusieurs PCMs purs. En général, ce sont des mélanges de PCMs organiques et inorganiques (organique-organique, organique inorganique, inorganique-inorganique). Ils ont deux principaux avantages, ils ont un point de fusion net similaire à une substance pure et leurs chaleurs latentes volumétriques sont légèrement supérieures à celle des composés organiques purs. Leurs deux principaux inconvénients sont que l'on a peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux et ils sont peu utilisés au niveau des systèmes industriels. Le tableau I-1 présente les propriétés thermiques de certains PCMs [23].

Matériaux		Température de fusion (°C)	Enthalpie de fusion (kJ/kg)
MCP Organique	Eau	0	333.6
	Stéarate de butyle	19	140
	Acide caprique-Aurique	21	143
MCP Inorganique	KF.4H ₂ O	18.5	231
	Mn(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	25.8	125.9
	Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O	32	251
MCP Eutectique	66,6%CaCl ₂ .6H ₂ O+33,3%Mgcl ₂ O.6H ₂ O	25	127
	48%CaCl ₂ +4,3%NaCl+47,3%H ₂ O	26.8	188
	47%Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O+53%Mg(NO ₃) ₂ 6H ₂ O	30	136

Tableau I .1. Propriétés thermiques de certains PCM [24].

I.9.4. Les propriétés désirables des PCMs:

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

I.9.4.1. Propriétés thermophysiques:

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

I.9.4.2. Propriétés chimiques:

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

I .10. Conclusion :

L'intérêt que représente les panneaux photovoltaïque leur définition s et sont types et sont composition et comment transfert l'énergie solaire a énergie électrique par les cellules photovoltaïque à concentration a été mis en évidence dans cette étude bibliographique. Nous avons présenté un aperçu du problématique que nous allons étudier dans ce travail, qui est l'augmentation de température des panneaux photovoltaïques et l'impact sur leur rendement, pour cela nous avons évoqué les techniques refroidissements et puisque nous avons choisi des matériaux à changement de phase pour les étudier en

tant que matériau de refroidissement, nous avons parlé de leurs types, propriétés et principe de fonctionnement, Celui-ci permettra de lisser la production d'électricité, de gérer les pics de production, d'avoir la possibilité de produire de l'électricité en continu ou encore d'avoir une production inter-saisonnière.

CHAPITRE II :

Modélisation

Mathématique

II- Introduction:

L'utilisation de matériaux à changement de phase (PCMs) en vue du refroidissement des panneaux voltaïques a été l'une des importantes applications pour ces matériaux. Dans ce chapitre, nous présentons le modèle physique intégrant des matériaux à changement de phase et qui sont soumises aux conditions climatiques équivalentes aux réelles. Dans ce but un modèle mathématique a été développé permettant de simuler le comportement thermique à la fois en mode conductif et convectif et rayonnement solaire.

Nous exprimons les équations de conservation de la masse, de quantité de mouvement et d'énergie, ainsi que les conditions aux limites sous forme dimensionnelle et adimensionnelle.

Finalement nous introduisons les principales grandeurs dynamiques et thermiques.

II.1. Description du problème à résoudre:

Le code "FLUENT" a été utilisé pour simuler le transfert thermique à travers une enceinte remplie de PCM. La figure 3.1 montre la géométrie de la cellule test étudiée, il s'agit d'une structure modulaire, représentative d'une portion d'un panneau solaire couplé avec une couche de PCM placée à l'intérieur d'une cavité.

On considère que transfert de chaleur à travers le système PV/PCM s'effectue à la fois par conduction et par convection, et que le PCM fondu est un fluide incompressible. La cavité contenant le PCM est rectangulaire bidimensionnelle, dont les parois inférieure et supérieure sont adiabatiques et fixes.

II.2. Équations du modèle mathématique:

Les équations exprimant les phénomènes du transfert thermique en régime laminaire sont principalement celles de dérivées des lois physiques de conservation de masse de la quantité de mouvement et de l'énergie.

Pour construire des modèles suffisamment détaillés et précis, il faut parfois tenir compte d'un certain nombre d'hypothèses simplificatrices.

Pour notre cas, on suppose que :

- Le fluide (phase liquide du PCM) est incompressible et newtonien
- L'écoulement est bidimensionnel, laminaire, instationnaire
- La dissipation visqueuse est négligeable
- Les propriétés physiques de la phase solide supposées constantes

Compte tenu des précédentes considérations, les équations qui régissent le problème en question sont les suivantes :

II.2.1 Équation de continuité:

C'est l'équation qui exprime la loi de conservation de masse aux cours de l'écoulement. Elle s'exprime mathématiquement sous la forme suivante:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho v) = 0 \dots\dots\dots(\text{II.1})$$

Où ρ est la masse volumique et v est le vecteur vitesse. Pour le cas des écoulements incompressibles et bidimensionnels, la masse volumique ρ est constante, qui après simplification devient :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots(\text{II.2})$$

II.2.2 Equations de quantité de mouvement:

Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'établir les relations entre les caractéristiques du fluide (le PCM fondu) et son mouvement et la cause qui le produit. On peut indiquer que le taux de variation de quantité de mouvement contenu dans le volume est égal à la somme de toutes les forces extérieures qui lui sont appliquées, pour un fluide newtonien incompressible, les équations de Navier Stokes pour la convection naturelle en 2D s'écrivent sous la forme suivante :

Équation de quantité de mouvement suivant l'axe x :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv) = -\frac{\partial p}{\partial x} + u\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) + \rho g \sin(\alpha) + S_x \dots\dots\dots(\text{II.3})$$

Équation de quantité de mouvement suivant l'axe y:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v^2) = -\frac{\partial p}{\partial y} + v\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) - \rho g \cos(\alpha) + S_y \dots\dots\dots(\text{II.4})$$

Avec :

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \dots\dots\dots(\text{II.5})$$

II.2.3. Équation de l'énergie :

L'équation de la conservation d'énergie est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique. Ce principe met en relation les différents termes, soit :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u h) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v h) = \frac{\partial}{\partial x}\left(k \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k \frac{\partial T}{\partial y}\right) + S_h \dots\dots\dots(\text{II.6})$$

où :

x, y : Coordonnées cartésiennes.

u_i : Composante de vitesse dans la direction x_i

t : temps.

k : Conductivité thermique.

T : Température du fluide.

T_{ref} : Température de référence.

C_p : Chaleur spécifique du fluide à pression constante.

ρ : Masse volumique.

μ : Viscosité dynamique.

β : Coefficient d'expansion thermique.

S_h : Terme de source.

$$h_s = h_{ref} \int_{T_{ref}}^T C_p dT \dots\dots\dots(II.7)$$

h_s : Enthalpie sensible

L'enthalpie totale, H est défini comme suit :

$$H = h_s + \Delta H \dots\dots\dots(II.8)$$

où $\Delta H = \gamma L$ est le changement d'enthalpie en raison du changement de phase, h_{ref} est l'enthalpie de référence à la température de référence T_{ref} , C_p est la chaleur spécifique, L est l'enthalpie spécifique de fusion (état liquide) et γ est la fraction liquide au cours du changement de phase qui se produisent sur une plage de températures $T_{solidis} < T < T_{liquidus}$ définies par les relations suivantes:

$$\gamma = \frac{\Delta H}{L} = 0 \dots\dots\dots(II.9)$$

Si $T_{solide} < T < T_{liquide}$ (état

$$\gamma = \frac{\Delta H}{L} = \frac{T - T_s}{T_1 - T_s} \dots\dots\dots(II.10)$$

Si $T > T_{liquide}$ (état liquide)

$$\gamma = \frac{\Delta H}{L} = 1 \dots\dots\dots(II.11)$$

Le terme source S_i dans l'équation de mouvement est donnée par:

$$S_i = -A(\gamma)u_i \frac{C(1-\gamma)^2}{\gamma^3 + \epsilon} u_i \dots\dots\dots(II.12)$$

II.3. Système d'équations gouvernantes:

Après introduction des hypothèses données ci-dessus, on peut considérer que les équations suivantes décrivent le phénomène de la convection naturelle à l'intérieur de la cavité.

• Equation de continuité:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots(II.13)$$

• Équation de quantité de mouvement (NS-xx) :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv) = -\frac{\partial p}{\partial x} + u\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) + \rho g \sin(\alpha) + S_x \dots\dots\dots(II.14)$$

• **Équation de quantité de mouvement (NS-yy) :**

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v^2) = -\frac{\partial p}{\partial y} + u\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) - \rho g \cos(\alpha) + S_y \dots\dots\dots(II.15)$$

• **Équation d'énergie:**

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uh) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vh) = \frac{\partial}{\partial x}\left(k \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k \frac{\partial T}{\partial y}\right) + S_h \dots\dots\dots(II.16)$$

Les conditions aux limites dimensionnelles sont :

Pour : $0 < x < L_x$ et $y = 0$, $\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots(II.17)$

Pour : $0 < x < L_x$ et $y = H$, $\frac{\partial T}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots(II.18)$

II.4. Analyse dimensionnelle:

L'adimensionnalisation ou normalisation consiste à transformer les variables dépendantes et indépendantes en des variables sans dimensions, c.-à-d. qu'elles seront normalisées par rapport à certaines grandeurs caractéristiques. Cela permet de spécifier les conditions d'écoulement avec un nombre restreint de paramètres de façon à rendre la solution plus générale.

De façon à rendre les équations précédentes adimensionnelles, elles seront transformées par les relations suivantes :

$$X = \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{L}, U = \frac{u}{u_0}, V = \frac{v}{v_0}, P = \frac{p}{\rho u_0^2}, \theta = \frac{T-T_f}{T_c-T_f} \dots\dots\dots(II.19)$$

En introduisant les grandeurs sans dimensions dans les équations différentielles précédentes on obtient le modèle mathématique adimensionnel suivant :

• **Équation de continuité:**

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \dots\dots\dots(II.20)$$

• **Équation de quantité de mouvement (NS-XX):**

$$\frac{\partial}{\partial t}(U) + \frac{\partial}{\partial X}(U^2) + \frac{\partial}{\partial Y}(UV) = -\frac{\partial P}{\partial X} + Pr\left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2}\right) + Ra Pr \sin(\alpha) + S'_x \dots\dots\dots(II.21)$$

• **Équation de quantité de mouvement (NS-YY):**

$$\frac{\partial}{\partial t}(V) + \frac{\partial}{\partial X}(UV) + \frac{\partial}{\partial Y}(V^2) = -\frac{\partial P}{\partial Y} + Pr\left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2}\right) - Ra Pr \sin(\alpha) + S'_y \dots\dots\dots(II.22)$$

• **Équation d'énergie:**

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uh) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vh) = \frac{\partial}{\partial x}\left(k \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k \frac{\partial T}{\partial y}\right) + S_h \dots\dots\dots(II.23)$$

où Gr est le nombre de Grashoff, Pr le nombre de Prandtl, et Re le nombre de Reynolds, qui sont définis comme:

$$R_e = \frac{U_0 L}{\nu}, P_r = \frac{\nu}{\alpha}, R_i = \frac{G_r}{R_e^2}, G_r = \frac{g\beta L^3(T_h - T_c)}{\nu^2} \dots\dots\dots(II.24)$$

Le nombre de Nusselt local est défini par:

$$Nu_L = \frac{\partial\theta}{\partial N} \dots\dots\dots(II.25)$$

où N désigne la direction normale orientée vers l'extérieur. Le calcul du nombre de Nusselt moyen à la paroi chaude est donné par la formule:

$$Nu_{av} = \int_0^1 Nu_L dX \dots\dots\dots(II.26)$$

Le nombre de Grashoff est le rapport des forces thermiques aux forces visqueuses. La force de flottabilité thermique est due aux différences de masse volumique qui se produisant à partir des gradients latéraux (ou radiaux) inévitables de température, dans le liquide, qui provoquent la convection. Pour des petites valeurs du nombre Grashoff, les forces visqueuses sont suffisamment larges pour supprimer la convection et le fluide est stable. En revanche, à des valeurs critiques du nombre de Grashoff, les forces de flottabilité dépassent les forces visqueuses et une convection laminaire se produise. Dans un écoulement laminaire convectif l'épaisseur (dite aussi grandeur relative) des couches limites thermique (δT) et de quantité de mouvement (δq_m) sont importantes. Le nombre de Prandtl (Pr) est défini comme le rapport de la viscosité cinématique à la diffusivité thermique et il est une comparaison entre les épaisseurs des couche limites de quantité de mouvement et thermique.

$$P_r = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\delta_{mouv}}{\delta_T} \dots\dots\dots(II.27)$$

II.5. Echange de chaleur avec changement de phase:

La figure II.1 schématise un exemple de solidification d'un matériau pure. On suppose que le transfert de chaleur est dominé uniquement par la conduction (problème unidimensionnel), bien que dans certains cas les transferts convectifs et radiatifs peuvent jouer un rôle important. Dans cet exemple la chaleur est évacuée lentement par la surface d'échange. T_0 est la température de la surface d'échange ($T_0 < T_i$). On constate que la forme de l'interface solide-liquide. Cette interface représente le front de solidification lors du changement de phase. Elle se déplace en fonction du temps t au fur et à mesure que la phase solide avance et est repérée par l'abscisse s(t).

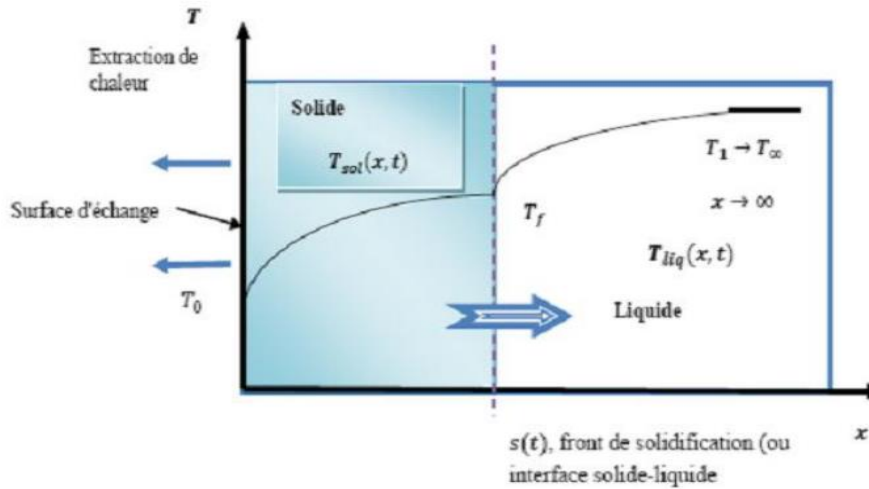


Fig. II.1: Solidification d'un matériau pure [25].

Avant le déclenchement du processus de solidification $t \leq 0$ le matériau est supposé en phase liquide et à température constante $T(x, 0) = T_1 > T_f$. Pour $t > 0$ la température de la surface $x = 0$ est instantanément mise à $T(0, t) = T_0 < T_f$. Par conséquent, la phase solide commence à se développer à partir d'une couche adjacente à la frontière $x = 0$ et au fur et à mesure que le temps augmente la phase solide avance $s(t)$ prenant la place du liquide.

II.6. Solutions numériques du transfert thermique avec changement de phase:

Les solutions analytiques des problèmes de changement de phase ne répondent qu'aux cas les plus simples (géométrie simple, conditions aux limites constantes, propriétés thermiques constantes dans chaque phase, problème 2D ... etc.). Pour des problèmes complexes ces solutions deviennent inutilisables ; on a recours aux solutions numériques pour approcher les solutions. On distingue deux grandes familles de méthode pour résoudre ces problèmes de changement de phase selon la connaissance ou pas de la position exacte du front de changement de phase au cours du temps.

II.6.1. Position exacte du front de changement de phase connue:

Dans cette méthode le pas de temps reste fixe et le pas d'espace est recalculé à chaque itération de façon que le front de changement de phase coïncide toujours avec un nœud du maillage (méthode du maillage dynamique). Une autre variante de cette méthode, consiste à fixer le pas d'espace et à recalculer le pas de temps à chaque itération de façon à ce que le front de transition se déplace de nœud en nœud pour chaque pas de temps recalculé. L'inconvénient de ces deux méthodes est qu'elles sont lourdes à mettre en œuvre, en plus ces types de solutions ne sont applicables qu'aux cas du changement de phase de produits purs.

II.6.2. Position exacte du front de phase n'est pas connue:

La méthode enthalpique et la méthode de la capacité thermique effective sont exemples des méthodes les plus connus pour ces types de solutions. Dans ces méthodes, le pas d'espace reste constant au cours du temps et le front de changement de phase peut se déplacer à l'intérieur du maillage. Dans certains cas, une connaissance approchée du déplacement du front de transition est nécessaire afin de permettre le calcul de corrections sur chaque pas de temps de façon à minimiser les instabilités numériques provoquées par la discontinuité des gradients de température dans la région de changement de phase. Ces solutions numériques sont relativement simples à mettre en œuvre et s'appliquent tant pour le cas du changement de phase de produits purs que pour le cas du changement de phase de mélanges [26].

II.7. Conclusion :

Le modèle mathématique est constitué d'un système d'équations, complétées par des conditions aux limites. Il s'agit d'un système complexe formé par des équations qui sont issues de la thermodynamique et de la mécanique des fluides. Ces équations présentent une difficulté dans la résolution analytique qui n'est jamais réalisable à cause de la non-linéarité visible dans les équations. Donc, l'utilisation des méthodes numériques s'avère indispensable pour la résolution des équations du modèle mathématique. Dans le chapitre qui suit nous présentons la méthode numérique utilisée pour résoudre notre problème.

CHAPITRE III:
Méthode numérique et
présentation du code
"ANSYS FLUENT®"

III. Introduction :

La résolution des équations d'un phénomène physique de convection thermique se fait par l'utilisation d'une méthode numérique. Ces types des phénomènes sont généralement modélisés par des équations aux dérivées partielles (E.D.P) non-linéaires. Cette dernière consiste à développer les moyens de la résolution de ces équations. A cette étape, intervient le concept de la discrétisation. Pour obtenir une solution numérique, le modèle mathématique constitué par une équation différentielle aux dérivées partielles (EDP) ou par un système d'EDP est transformé, à l'aide d'une méthode de discrétisation en système d'équations algébriques. Il existe plusieurs schémas de discrétisations des équations aux dérivées partielles (EDP) : les différences finies, les éléments finis et les volumes finis. Dans ce présent chapitre, on a procédé une simulation numérique à l'aide du logiciel ANSYS Workbench, en sa version étudiantine, qui est spécialement destiné à la dynamique des fluides numérique (CFD). CFD « Computational Fluid Dynamics », (soit en français : Dynamique des Fluides Numérique) est un ensemble des méthodes numériques pour obtenir une solution approchée pour des problèmes de la dynamique des fluides et transfert de chaleur. Équations de la mécanique des fluides sur ceux resaluent par des méthodes numériques. Il permet de rendre moins hypothèses et approche analytique permet à des problèmes relativement complexes. En outre, beaucoup moins cher qu'une approche expérimentale. En revanche, est limité par l'ordre des méthodes numériques utilisées, signifie arithmétique et modèle de précision. Les efforts et les progrès accomplis dans les méthodes numériques, en particulier dans les CFD depuis, montrant son intérêt. Le CFD préalable mieux identifier et évaluer le problème.

Le passage d'un problème aux dérivées partielles continu à un problème discret s'appuie sur les méthodes classiques d'analyse numérique. On distingue trois grandes méthodes pour formuler un problème continu sous forme discret, la méthode des différences finies, des éléments finis et des volumes finis. La méthode utilisée par le code "FLUENT" est celle des volumes finis. Le poste de travail utilisé pour ces simulations est un ordinateur (Windows 10) doté d'un microprocesseur Intel Core™ i5 de fréquence de 2.30 GHz et une mémoire vive de 4.0 Giga Bytes. La discrétisation des équations présentées dans le chapitre précédent traduisant le phénomène du transfert de chaleur par conduction-convection, permet de transformer ces équations différentielles en un système d'équations algébriques. Plusieurs méthodes de discrétisation sont utilisées actuellement telles que: la méthode des volumes finis, des différences finies et des éléments finis, etc.

III.1. Méthodes des volumes finis:

La méthode des volumes finis est caractérisée par son avantage à satisfaire la conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie dans tous les volumes finis ainsi que dans tout le domaine de calcul. Elle facilite la linéarisation des termes non linéaires dans les équations de conservation tel que le terme source par exemple. La méthode consiste à distribuer le domaine de calcul en plusieurs volumes, où chaque volume entoure un nœud.

Les processus de maillage dans le logiciel ANSYS Workbench sont basés sur la discrétisation du domaine d'étude en l'utilisation de la méthode des volumes finis, cette dernière consiste à diviser l'ensemble du domaine total à un réseau des points (nœuds). Ainsi un élément de volume (volume de contrôle) est défini autour de chaque nœud.

III.1.1. Principe de la méthode des volumes finis :

Le principe de méthode des volumes finis baser sur une technique de discrétisation qui convertit les équations de conservation aux dérivées partielles en équations algébriques qui peuvent être résolues numériquement. La méthode des volumes finis consiste à intégrer les EDP décrites au chapitre précédent pour obtenir les équations discrétisées, qui conservent toutes les grandeurs physiques sur chaque volume de contrôle. Chacun de ces derniers (volume de contrôle) contenant un nœud appelé le nœud principal. Un exemple de volume de contrôle est montré dans la figure ci-dessous. Pour un nœud principal (P), les points E et W (E : East, W : West) sont des voisins dans la direction X, tandis que N et S (N : North, S : South) sont ceux 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 point (e) et (w) dans la direction X, (n) et (s) dans la direction Y [27].

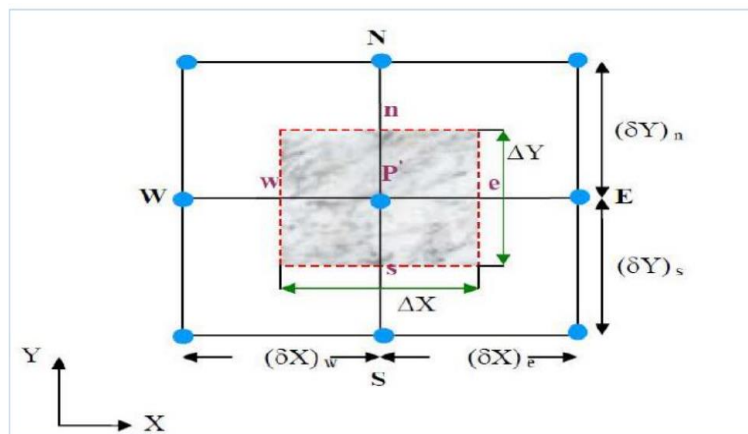


Fig. III.1: Schéma représentant un volume de contrôle bidimensionnel typique [28].

III.1.2. Maillage:

Le code de calcul "FLUENT" traite plusieurs types de maillages structurés, non-structurés ou hybrides. Un maillage structuré est généralement composé de mailles quadrilatérales en deux dimensions (2D ou maillage surfacique) et hexaédriques en trois dimensions (3D ou maillage volumique), tandis qu'un maillage non-structuré va être composé de mailles quadrilatérales ou triangulaires en 2D et hexaédriques ou tétraédriques en 3D. Dans un maillage hybride les mailles proches des parois sont des quadrilatères en 2D et des hexaèdres en 3D et les mailles du reste du domaine sont des triangles en 2D et des tétraèdres en 3D. En proche paroi, il est nécessaire d'avoir des mailles les plus petites possibles pour bien modéliser les écoulements à cet endroit, cette particularité est d'autant plus importante en régime turbulent, on l'appelle (l'inflation). En 3D, les mailles qui font les liaisons entre les hexaèdres et les tétraèdres sont des prismes ou des pyramides. La figure représente les différents types de maillage utilisé par notre code.

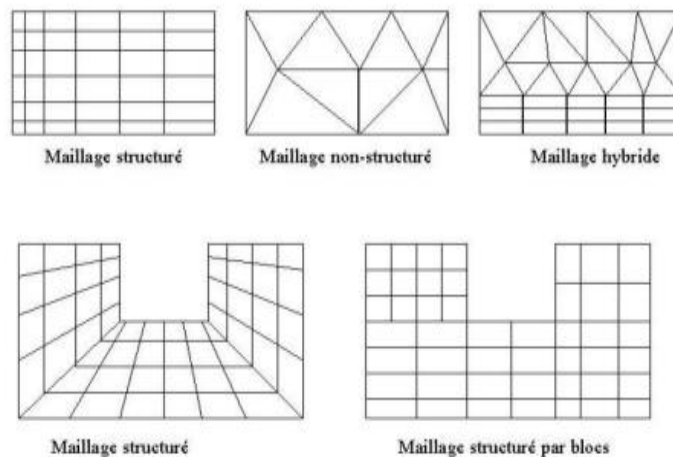


Fig. III.2: Types de maillage

Il existe un certain nombre de codes industriels, aux générateurs de maillage performants, permettant la prédiction d'écoulements de fluides. Le code de calcul "FLUENT" est commercialisé par le groupe ANSYS. Ce groupe est actuellement l'un des pôles de compétence en mécanique des fluides numérique les plus importants. Il développe et commercialise une solution complète sous forme de logiciels de CFD généralistes qui simule tous les écoulements fluides, compressibles ou incompressibles, impliquant des phénomènes physiques complexes tels que la turbulence, le transfert thermique, les réactions chimiques, les écoulements multiphasiques pour toute l'industrie [29].

Pour des fluides incompressibles, les calculs se font en pression relative. La méthode utilisée est la méthode des volumes finis. Cette méthode a l'avantage d'être conservatrice, c.-à-d. que tout le flux sortant d'un volume de contrôle entre dans les volumes voisins. Les étapes de calcul dans le solveur sont les suivantes :

- Intégration des équations continues sur chaque volume de contrôle. Le théorème de Green-Ostrogradski est utilisé pour transformer certaines intégrales de volume en intégrales de surface.
- Discrétisation en espace et en temps (pour les écoulements non permanents) des équations : substitution des dérivées partielles par des approximations en différences finies, transformation du système d'équations en système algébrique.
 - Résolution du système algébrique par un processus itératif, utilisation d'un algorithme pour corriger la pression et les composantes de la vitesse afin d'assurer la conservation de la masse.

III.2. Post-processeur "FLUENT":

Permet de visualiser les différents résultats à l'écran (champs de vitesse, champs de température, ligne de courant, etc.)

III.3. Méthode de résolution des équations de transport:

III.3.1. Schéma de discrétisation: Notre code emploie la méthode des volumes finis pour la résolution des systèmes d'équations utilisés pour modéliser les mouvements des fluides. En fait, avec la méthode des volumes finis, un problème physique donné est résolu suivant trois principales étapes :

- Division du domaine de calcul en volumes de contrôle via un maillage (voir figure III.2).
- Intégration des équations sur chaque volume de contrôle afin de les transformer en équations algébriques.
- Résolution des équations ainsi discrétisées.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i \varphi) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x_i}\right) + S\varphi \dots\dots\dots(III.1)$$

III.3.2. Choix de la méthode de couplage :

Divers algorithmes qui sont disponibles dans le logiciel de calcul CFD de ANSYS, parmi eux on cite :

- SIMPLE : Robuste mais relativement lent.
- SIMPLEC : Convergence plus rapide pour les problèmes simples.
- PISO : Utile pour des calculs CFD des écoulements instables.

L'algorithme choisit dans notre étude est l'algorithme SIMPLEC. A l'initialisation du calcul, un champ de pression fixé a priori est introduit dans l'équation de bilan de la quantité de mouvement, permettant de calculer un premier champ de vitesse. La combinaison des équations de bilan de masse et de quantité de mouvement permet ensuite de corriger ces premiers champs de pression et de vitesse. Les autres équations de transports sont ensuite résolues et le champ de pression corrigé est utilisé pour initialiser le calcul à l'itération suivante. Cette succession d'opération est répétée jusqu'à ce que les critères de convergences soient atteints.

Algorithme SIMPLER: La discrétisation d'une équation de transport diffusion sur un volume de contrôle par la méthode des volumes finis fait intervenir les valeurs des vitesses aux interfaces des volumes (U_e , U_w , U_n , U_s). Il est donc intéressant de calculer ces vitesses directement sur les interfaces (sans avoir à effectuer d'interpolations). D'autre part, la discrétisation de l'équation de continuité et du gradient de pression avec l'utilisation d'une interpolation linéaire peut induire des erreurs importantes du fait qu'une répartition de pression ou de vitesse en "damier" est vue comme un champ uniforme. Pour contourner ces difficultés on préfère utiliser des grilles décalées. Une grille principale est construite sur laquelle on calcule la pression, la température et la concentration. Deux grilles décalées vers la droite et vers le haut respectivement sont utilisées pour le calcul des vitesses horizontale et verticale.

III.4. Résolution numérique:

III.4.1. Paramètre de contrôle de la solution: La façon d'obtenir une solution convergée est un des éléments essentiels de prédiction d'écoulement au moyen des codes CFD. Le code "FLUENT" propose différentes techniques pour accélérer le processus de convergence est augmentée si une bonne estimation de la solution est donnée comme condition initiale. Nous avons recours à plusieurs techniques décrites ci-dessous :

a) Critère de convergence ; La résolution numérique des problèmes de type CFD nécessite un processus itératif. Pour apprécier la convergence du processus itératif, des critères de convergence doivent être pris en compte. Ainsi, la convergence du processus itératif est déterminée par le concept de résidu. Après l'étape de discrétisation, l'équation de conservation d'une variable ϕ donnée sur une cellule de centre P.

b) Sous-relaxation ; A cause de la non linéarité des équations résolues, il est possible, pour atténuer les fluctuations de la solution, de réduire les variations des variables d'une itération à une autre en introduisant une sous-relaxation. Il n'existe pas des règles générales concernant des meilleures valeurs des coefficients de sous-relaxation, mais il existe des recommandations pour chacune des grandeurs, généralement basé sur des connaissances empiriques.

III.4.2. Les étapes de résolution du problème:

Les principales étapes utilisées dans notre simulation sont les suivantes :

1. Détermination du domaine de calcul (construction de la géométrie).
2. Discrétisation du domaine de calcul (maillage).
3. Identification des conditions aux limites.
4. Choix du modèle mathématique.
5. Choix de l'algorithme de solution.
6. Solution du modèle mathématique.
7. Visualisation et interprétation des résultats.

III.5. ANSYS Fluente

III.5.1. Introduction :

La discrétisation des équations présentées dans le chapitre précédent traduisant le phénomène du transfert thermique par conduction, convection et rayonnement, permet de transformer ces équations différentielles en un système d'équations algébriques. Plusieurs méthodes de discrétisation sont utilisées actuellement telles que: la méthode des différences finies, des volumes finis, et des éléments finis, etc....

III.5.2. Procédure de la simulation :

III.5.2.1. Logiciel ANSYS Workbench:

III.5.2.2. Définition: L'ANSYS Workbench est un logiciel permet de gérer les fichiers et le lancement des différents logiciels à partir d'une fenêtre unique.

III.5.2.3. La structure générale du logiciel est présentée ci-dessous :

Menu principal du logiciel de ANSYS Workbench est L'ouverture du logiciel fait apparaitre le menu principal ci-dessous :

La barre d'outils donne accès à plusieurs systèmes pour l'analyse. Pour commencer à glisser une analyse en mécanique des fluides (fluent) au schéma de projet.

Les étapes de calcul se composent de 5 étapes :

- 1. Géométrie :** pour importer ou de créer ou de modifier ou de mettre à jour un modèle qui peut être utilisé pour l'analyse.
- 2. Maillage (mech) :** cette cellule est liée à la définition de la géométrie, systèmes de coordonnées et réseau de communication et du maillage dans le module de simulation mécanique, En plus de déclarer des certaines propriétés physiques des certains matériaux.
- 3. Configuration (steup) :** permet de définir les charges et conditions aux limites et une autre configuration pour l'analyse.
- 4. Solution :** cette cellule permet d'accéder aux données de résolution. 5. Résultats : cette cellule combine les résultats de l'analyse.

III.5.2.3.1. Création de la géométrie :

Pour créer une géométrie avec ANSYS Workbench double-clique sur la géométrie pour ouvrir le module de création géométrique « Design Modeler »

On choisit le type d'analyse 2D. Après l'ouverture du module de création une géométrie, nous sélectionnons à partir la liste du « Unités » le millimètre (mm) comme unité de dimension.

Par la suite, On choisit le plan et la vue sur laquelle on va travailler. En cliquant sur le plan XY. Pour dessiner la géométrie étudiée on clique sur la boîte à outils esquisse qui va permettre de créer la géométrie d'y ajouter des dimensions et la contraindre.

Méthode numérique et présentation du code "ANSYS fluent®"

Dans la boîte à outils esquisse, on clique sur la forme du rectangle et fait le dessin dans le plan que nous avons choisi, puis Sélectionnons les cotes à la géométrie.

Model physique:

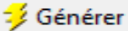
Dans notre travail nous étudie un panneau PV (Photovoltaïque) typique se compose de 5 couches, qui sont une couverture de verre supérieure, de l'éthylène-vinyle Acétate (EVA 1), cellules de silicium, EVA 2 et feuille arrière en Tedlar comme illustré à la figure III. 3.

Le verre utilisé est ultra-clair, avec un taux de transmission élevé et une faible teneur en fer afin qu'il puisse extraire autant d'énergie solaire que possible. Les cellules PV sont encapsulées dans une couche d'EVA pour coller le Cellules photovoltaïques vers le verre de protection et le matériau d'encapsulation arrière (Tedlar). Le polymère Tedlar couche est faite de fluorure de polyvinyle (PVF) qui fournit une isolation et une protection supplémentaires pour la couche photovoltaïque.

Les cinq (5) couches de PV sont dimensions dans le tableau suivant :

Langueur total de panneaux photovoltaïque	Epaisseur total de panneaux	Epaisseur Glass	Epaisseur EVA1	Epaisseur PV-cells	Epaisseur EVA2	Epaisseur Tedlar
1225 mm	35 mm	3 mm	0.5 mm	0.4 mm	0.5 mm	0.1 mm

Tableau III.1: les dimensions de panneaux et ses couches [24].

On clique sur  On obtient la géométrie de PV Cinq (5) couche comme la montre dans la figure Fig III. 3:

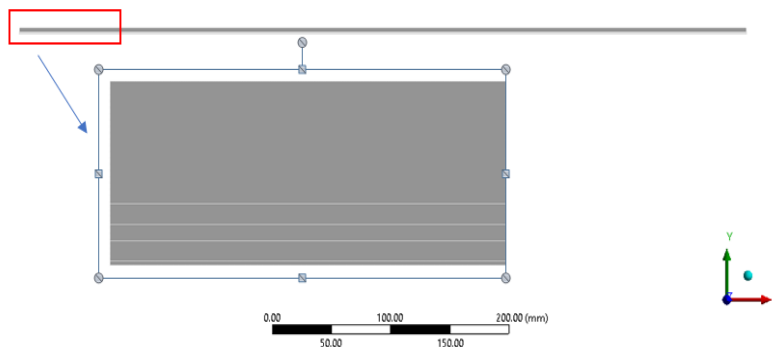


Fig. III. 3.: géométrie de panneaux photovoltaïque étudiée.

III.5.2.3.2. Le maillage :

Le maillage sous Workbench a été réalisé avec double-clic sur le maillage dans la boîte Workbench une fois. « Meshing » est lancé. Dans l'étape de maillage, il y a deux points importants à

considérer : ➤ La surnommassions des éléments qui construit la géométrie pour réaliser cette dernière étape ; Sélectionner une partie de la géométrie à l'aide de ces deux icônes :



: Pour choisir les surfaces.



: Pour choisir les arêtes.

Après on clique droit sur l'élément que nous voulons surnomme et on choisit Créer "une sélection nommée", puis lui donner les propriétés comme le montre la figure suivante :

On obtient finalement le maillage comme montré sur la figure suivante:

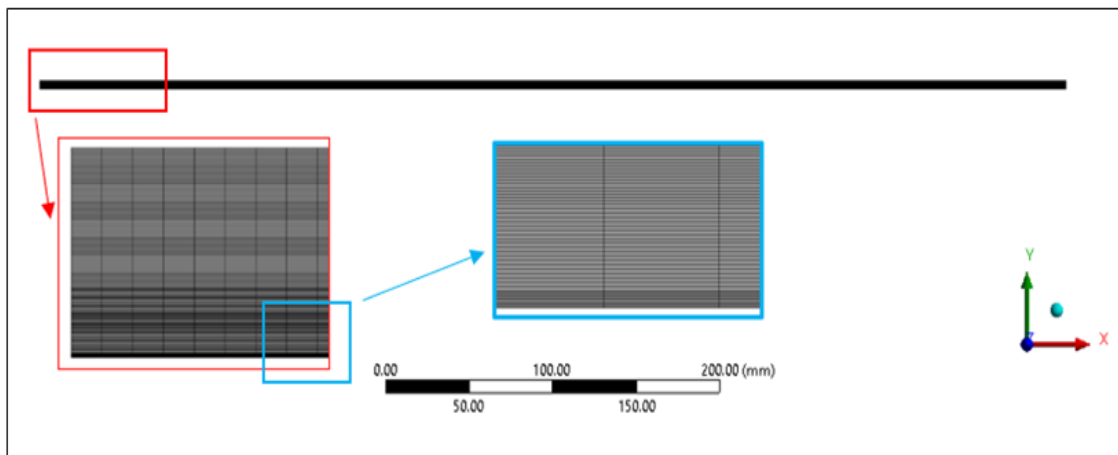


Fig. III.4: la maillage obtenue .

Node: 112941

Elements: 112000

III.5.2.3.3. Configuration (steup) :

Nous réaliser trois simulation (simulation 1 avec source chaleur constant et sans radiation et simulation 2 avec radiation et simulation 3 avec PCM).

Donc la configuration sous Workbench on a été réalisé avec double-cliquer sur la configuration (steup) dans la boîte Workbench dans cette étapes les sélections nommées serons affichées automatiquement, on pose nos conditions aux limites puis on pose les données comme montre les figures suivantes :

a) Model : laminaire, équation de l'énergie, radiation (deuxième cas)

b) Matériels : On ajoute les matériels utilisé dans notre étude et changeons les propriétés thermiques et physiques (la chaleur spécifique, la conductivité thermique et la densité) pour chaque type. On change aussi les propriétés du solide par les matériaux et supprimer le fluide (air) et solide (Aluminium).

c) Cell zone condition: Nous avons identifié les solides sur la zone de solide sur la zone de module photovoltaïque.

d) Boundary Conditions (Conditions aux limites):

Nous avons identifié les conditions aux limites suivantes : Entrée (heat_in_wall) : la vitesse dans solide égale zéro ($V=0$) et avec source chaleur constante dans trois (3) cas (1^{er} cas $Q=1000\text{W/m}^2$, 2^{ème} cas $Q=900\text{W/m}^2$ – 3^{ème} cas $Q=800\text{W/m}^2$).

Les parois latérales (gauche et droite) sont : adiabatique (flux de chaleur égal zéro, $Q=0$). Sortie (bottom_wall) : Nous supposons qu'il y'en a une convection, (de coefficient de transfert thermique $h=10\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$, $T=25^\circ\text{C}$).

Tableau III.2: les propriétés chimiques de matériaux que contient le panneau utilisé [24].

Couche	Epaisseur (mm)	Densité (kg/m^3)	Conductivité thermique ($\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$)	Chaleur spécifique ($\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$)
Glass	3 mm	3000	1.8	500
EVA1	0.5 mm	960	0.35	2090
PV cells	0.4 mm	2330	148	677
EVA2	0.5 mm	960	0.35	2090
Tedlar	0.1 mm	1200	0.2	1250

III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la méthode de volume finis et le programme d'ANSYS Fluent, basé essentiellement sur la méthode des volumes finis.

Cette dernière (méthode volumes finis) présente plusieurs propriétés, parmi plusieurs on cite les suivantes :

- Satisfaction de la conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie dans tous les volumes finis, ainsi que dans tout le domaine de calcul.
- Elle facilite la linéarisation des termes non linéaires dans les équations de conservation tels que le terme source par exemple.
- La méthode consiste à distribuer le domaine de calcul en plusieurs volumes, où chaque volume entoure un nœud.
- Traitement possible de géométries complexes,
- Détermination plus naturelle des conditions aux limites,
- Possibilité de démonstrations mathématiques de convergence et de majoration d'erreurs.

Les processus de maillage dans le logiciel ANSYS Workbench sont basés sur la discrétisation du domaine d'étude en utilisant de la méthode des volumes finis.

Méthode numérique et présentation du code "ANSYS fluent®"

Le principe de méthode des volumes finis basé sur une technique de discrétisation qui convertit les équations de conservation aux dérivées partielles en équations algébriques qui peuvent être résolues numériquement. Le code de calcul "FLUENT" traite plusieurs types de maillages structurés, non-structurés ou hybrides.

Nous avons discuté aussi les étapes de résolution du problème, et la procédure de la simulation par ANSYS Fluent.

CHAPITRE IV :

Résultats et discussion

IV-Introduction:

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de la trois (03) simulations numériques pour un modèle de deux dimensions (2D), donc l'objectif principal est de montrer la capacité du code de calcul CFD "FLUENT" à modéliser l'écoulement de convection naturelle dans un à matériaux à changement de phase destinée pour refroidir un panneau solaire.

IV-1. Solution numérique par le biais du code ANSYS Fluent :

Pour résoudre les problèmes de la mécanique des fluides ainsi que les transferts de chaleur nous utilisons le code de calcul nommé ANSYS Fluent.

Dans notre travail nous avons résolu l'équation de continuité et l'équation d'énergie (II.13 et II.16) à l'aide de méthode numérique des volumes finis.

Dans le présent projet, nous avons utilisé ANSYS fluent pour la création de la simulation numérique du transfert de chaleur conjugué à travers le système panneaux photovoltaïque sans et avec « cire paraffine ». Où nous avons étudié l'influence de plusieurs paramètres sur l'écoulement et le transfert de chaleur dans le système PV, à savoir:

1^{ère} Simulation: avec source de chaleur en supposant radiation est nulle (3 cas, $Q = 1000 \text{ w/m}^2$, $Q = 900 \text{ w/m}^2$, $Q = 800 \text{ w/m}^2$) avec convection naturel.

2^{ème} Simulation: on active la radiation en Fluent et remarque l'évolution de température pendant 3 temps différents (8:00 AM, 11:00 AM et 14:00 PM).

3^{ème} Simulation: dans cette simulation on utilise couche de « cire paraffine » pour le refroidissement du panneau et on étudie l'évolution de la température pendant 3 périodes différentes (8:00 AM, 11:00 AM et 14:00 PM).

IV-2. Etude de la 1^{ère} simulation:

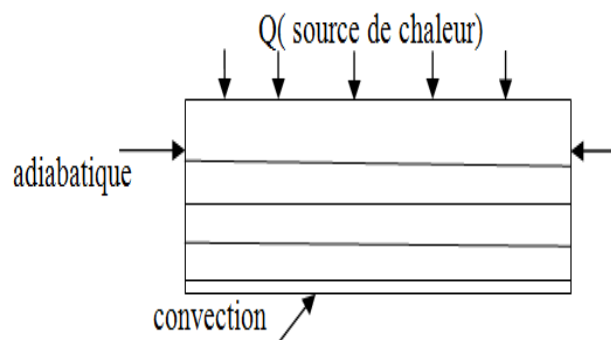


Fig.IV.1: Condition aux limites appliquées dans la 1^{ère} simulation.

On traite le transfert de chaleur bidimensionnel dans système photovoltaïque en supposant radiation est nulle et avec les conditions aux limites suivantes:

Résultats et discussion

- les sources chaleur implique du verre (paroi supérieure): $Q= 1000 \text{ w/m}^2$, $Q=900 \text{ w/m}^2$, $Q= 800 \text{ w/m}^2$
- convection dans la paroi inferieure (Tedlar) avec, T en degré °C et un coefficient de transfert par convection h.
- les parois gauche et droite (horizontale) sont adiabatiques $Q= 0$.

On obtenu de 3 résultats illustre dans les figures suivants:

1^{er} cas avec source de chaleur ($Q= 1000 \text{ w/m}^2$):

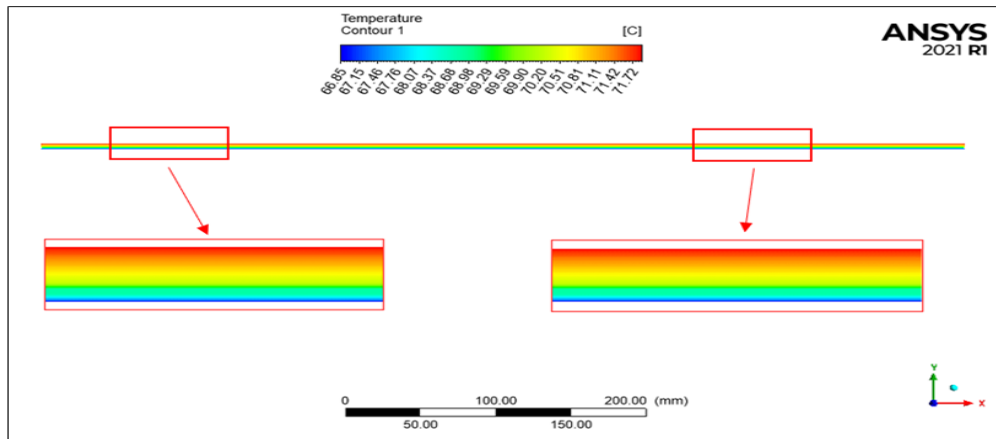


Fig.IV.2: Distribution de température dans système photovoltaïque dans 1^{er} cas avec source de chaleur $Q= 1000 \text{ W/m}^2$.

1^{er} cas: on calcule température moyenne, $T_{\text{moyenne}(1)} = (T_{\text{max}}+T_{\text{min}}) \div 2$

A.N, $T_{\text{moyenne}(1)} = (77.72 \text{ C}^\circ + 66.85^\circ\text{C}) \div 2$, donc $T_{\text{moyene}(1)} = 72.285^\circ\text{C}$

2^{eme} cas avec source de chaleur ($Q= 900 \text{ w/m}^2$):

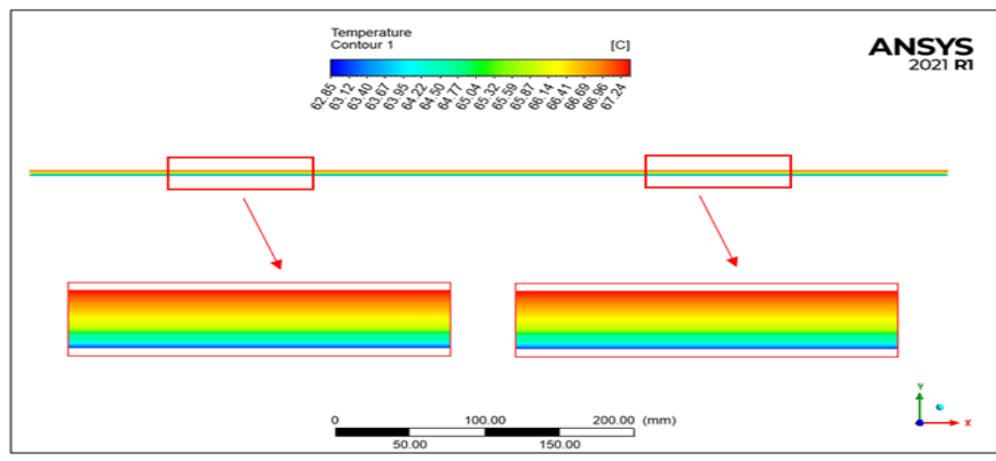


Fig. IV.3: distribution de température dans système photovoltaïque dans 1^{er} cas avec source de chaleur $Q= 900 \text{ W/m}^2$.

2^{eme} cas: on calcule température moyenne, $T_{\text{moyenne}(2)} = (T_{\text{max}}+T_{\text{min}}) \div 2$

A.N, $T_{\text{moyenne}(2)} = (67.24 \text{ C}^\circ + 62.85 \text{ C}^\circ) \div 2$, donc $T_{\text{moyenne}(2)} = 65,04 \text{ C}^\circ$

3^{ème} cas avec source de chaleur (Q= 800 w/m²):

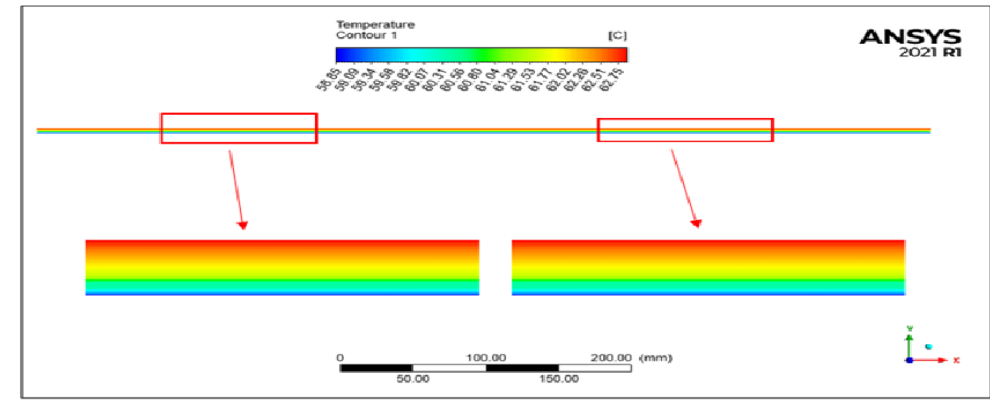


Fig. IV.4: Distribution de température dans système photovoltaïque dans 1^{er} cas avec source de chaleur Q= 800 W/m².

3^{ème} cas: on calcule température moyenne, $T_{moyenne(3)} = (T_{max} + T_{min}) \div 2$

A.N, $T_{moyenne(3)} = (62.75 \text{ C}^\circ + 58.85 \text{ C}^\circ) \div 2$, donc $T_{moyenne(3)} = 60.8 \text{ C}^\circ$

Dans trois cas de sources chaleur différente on remarque que la distribution de température, la température dans la 1^{ère} couche est max et dans la 5^{ème} couche est min.

$$T_{moyenne(1)} > T_{moyenne(2)} > T_{moyenne(3)}$$

On peut conclure que ; lorsque le flux de chaleur augmente, la température du panneau photovoltaïque augmente, nous étudierons donc l'effet de l'utilisation de matériaux à changement de phase pour refroidir le panneau.

On remarque qu'il y a une très légère diminution de la température du panneau photovoltaïque, ce qui entraînera une diminution de son efficacité au fil du temps.

IV-3. Etude de la 2^{ème} simulation:

Dans ce cas on a activé la radiation (module spécialisé pour le calcul du rayonnement thermique) dans logiciel Fluent, et on observe l'évolution de la température dans 3 périodes différentes de la journée sidérale de la région d'El Oued (08h00 am, 11h00 am et 14h00 pm en temps local GMT+1).

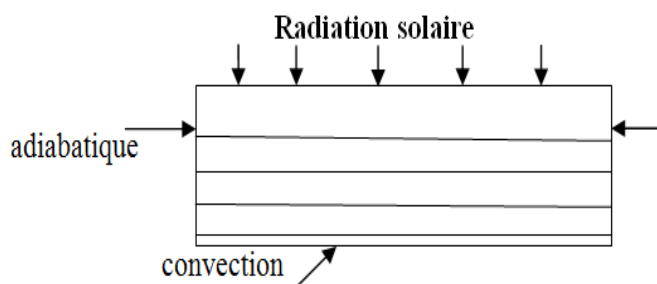


Fig.IV.5: Conditions aux limites appliquées dans la 2^{ème} simulation

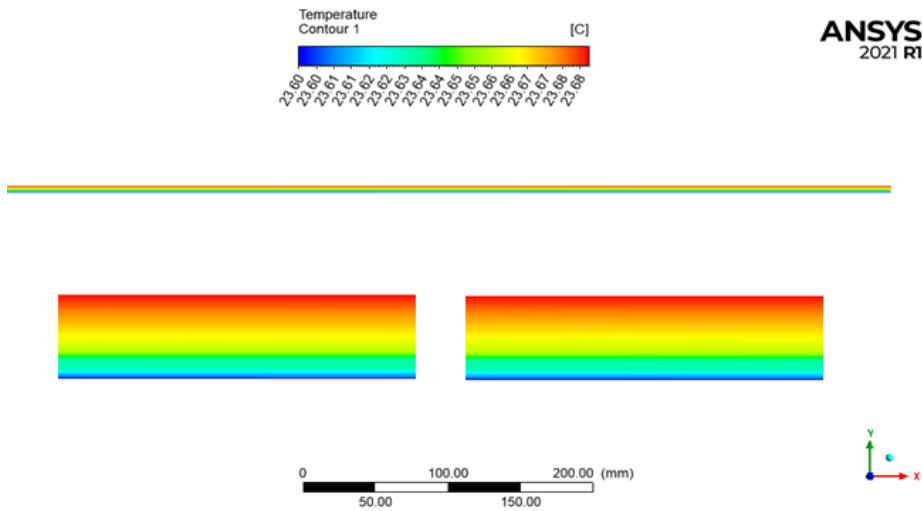


Fig. IV.6: Distribution de température dans le système PV dans le 2^{ème} cas avec radiation solaire à 08h00 am (GMT+1)

1^{er} cas (à 08h00): on calcule température moyenne, $T_{moyenne(1)} = (T_{max} + T_{min}) \div 2$

A.N, $T_{moyenne(1)} = (23.68^{\circ}C + 23^{\circ}C) \div 2$, donc

$$T_{moyenne(1)} = 23.64^{\circ}C$$

On constate qu'il y'en a presque la meme temperature dans l'entrée et la sortie pour radiation solaire.

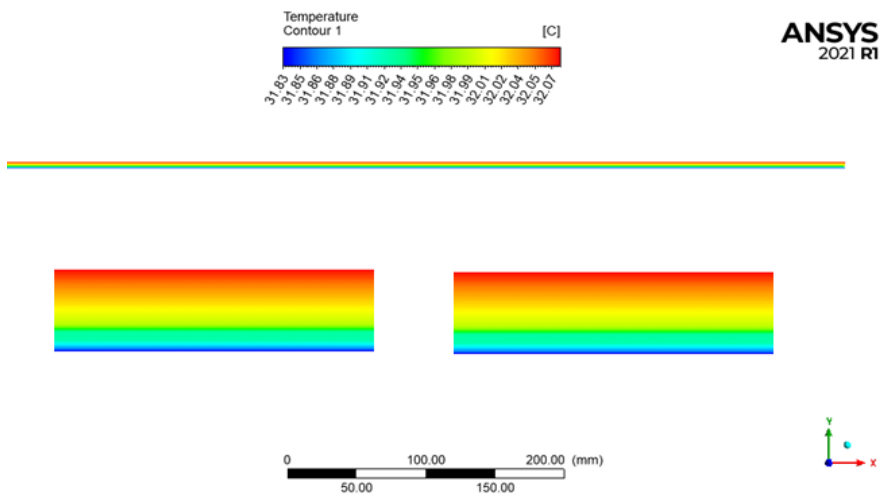


Fig. IV.7: Distribution de température dans le système PV dans le 2^{ème} cas avec radiation solaire à 11h00 am[Fluent 2021,R1]

2^{ème} cas (à 11h00): Calculons la température moyenne, $T_{moyenne(2)} = (T_{max} + T_{min}) \div 2$

A.N, $T_{moyenne(2)} = (32.07 C^{\circ} + 31.83 C^{\circ}) \div 2$, donc

$$T_{moyenne(2)} = 31.95 C^{\circ}$$

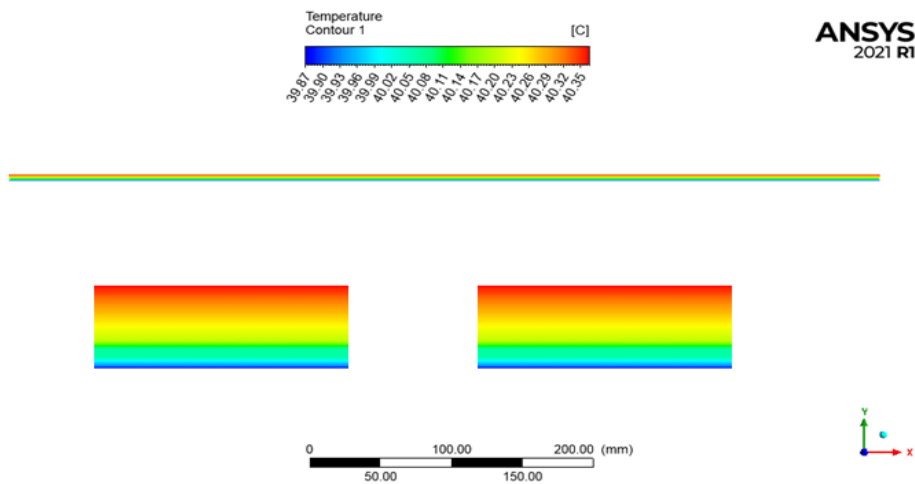


Fig. IV.8: Distribution de la température dans le système PV dans le 2^{ème} cas avec une radiation solaire à 14h00 pm

3^{em} cas (à 14h00): on calcule température moyenne, $T_{moyenne(3)} = (T_{max} + T_{min}) \div 2$

A.N, $T_{moyenne(3)} = (40.35^{\circ}\text{C} + 39.87^{\circ}\text{C}) \div 2$, donc $T_{moyenne(3)} = 40.11^{\circ}\text{C}$

$T_{moyenne(1)} < T_{moyenne(2)} < T_{moyenne(3)}$

Contrairement aux résultats issus de la 1^{ère} simulation la température du panneau photovoltaïque a augmenté au fil du temps avec le rayonnement (radiation) solaire, ce qui implique la diminution du rendement du panneau photovoltaïque. Par conséquent, on essaye de proposer une solution pour ce phénomène par insertion d'une couche de matériau à changement phase (PCM) choisi pour des raisons locales et subjectives dans le but de refroidir le panneau PV étudié.

IV-4. Etude de la 3^{ème} simulation:

Dans ce cas d'étude, la performance thermique du système basé sur PV-PCM est testée et est présentée. La « cire de paraffine » est utilisée comme PCM dans ce travail en opérant à des températures partant de la température ambiante (dans notre région climatique) mais ne dépassant pas 90°C.

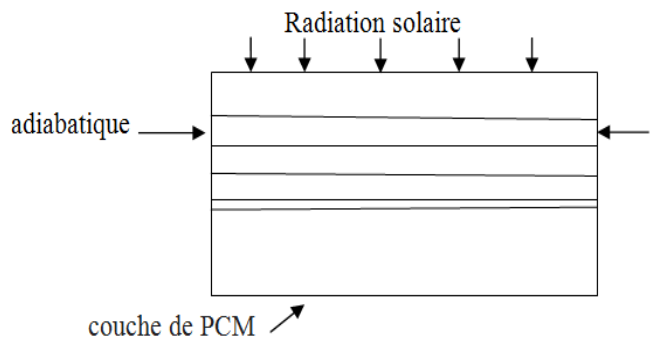


Fig. IV.9: Conditions aux limites appliquées dans la 3^{ème} simulation

Résultats et discussion

Au cours de cette simulation, le « cire paraffine » est considéré comme étant en état fluide. Dans tous les cas étudiés, la face avant est exposée à un flux de chaleur, par suite, elle est chauffée par le biais des rayonnements solaires incidents, quant à celle en arrière du système qui sera froide. Cependant, le « cire paraffine » commence à se fondre à proximité de la face avant. On a remarqué à partir des simulations que la fusion initiale du « cire paraffine » est entraînée par la conduction, mais une fois le « cire paraffine » est assez fondu, la convection naturelle dans la masse fondue liquide commence à se développer et à dominer le régime d'échange thermique. Les conductions aux limites dans cette simulation sont:

- Sur la couche supérieure du panneau PV: on impose une radiation thermique (solaire).
- Les autres parois restantes sont considérées comme étant adiabatiques.
- Les propriétés thermophysiques de cire paraffine sont illustrées dans tableau suivant:

Densité (Masse volumique)	Solid (Kg/m ³)	830
	Liquide (Kg/m ³)	830
Chaleur spécifique	Solid (J/m.K)	1,593,600
	Liquide (J/m.K)	2,705,800
Conductivité thermique	Solid (Kg/m ³)	0.514
	Liquide ((Kg/m ³)	0.224
Température de fusion (°C)		32
Chaleur de fusion (J/Kg)		251,000

Tableau IV.1: Propriétés thermophysiques du cire paraffine [14].

1^{er} cas (à 08h00): Condition de radiation solaire et « cire paraffine »

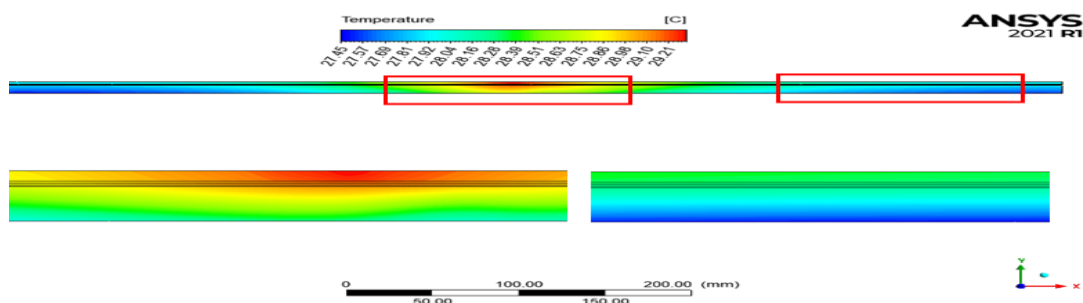


Fig. IV.10: Champ de température dans le système PV pour le 1^{er} cas avec « cire paraffine » à 08h00 am (local).

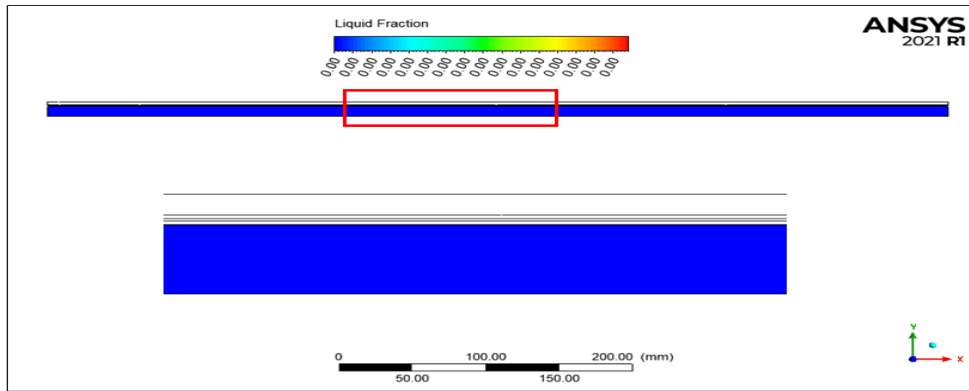


Fig. IV.11: Fraction liquide du « cire paraffine » à 08h00 am.

2^{ème} cas (à 11h00 am):

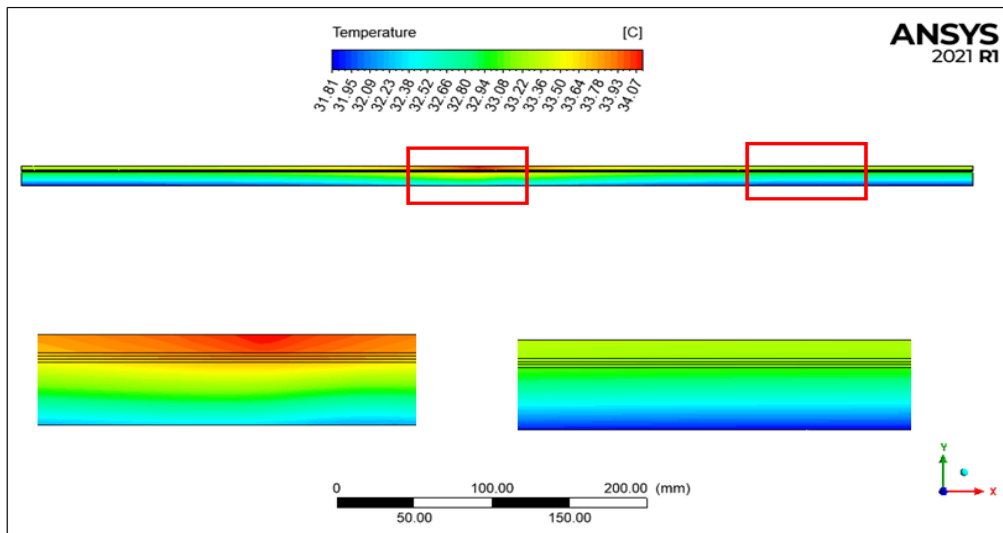


Fig. IV.12: Champ de température dans le système PV pour le 2^{ème} cas avec « cire paraffine » à 11h00 am.

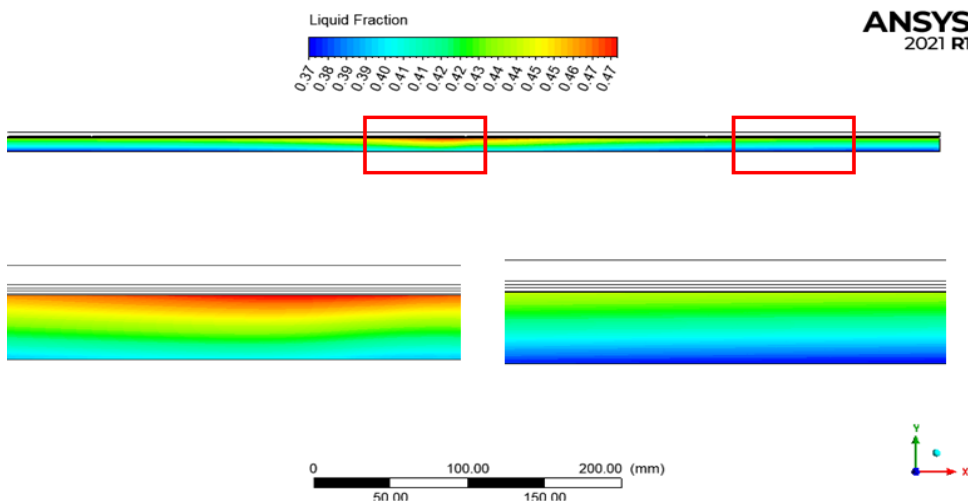


Fig. IV.13: Fraction liquide du « cire paraffine » à 11h00 am.

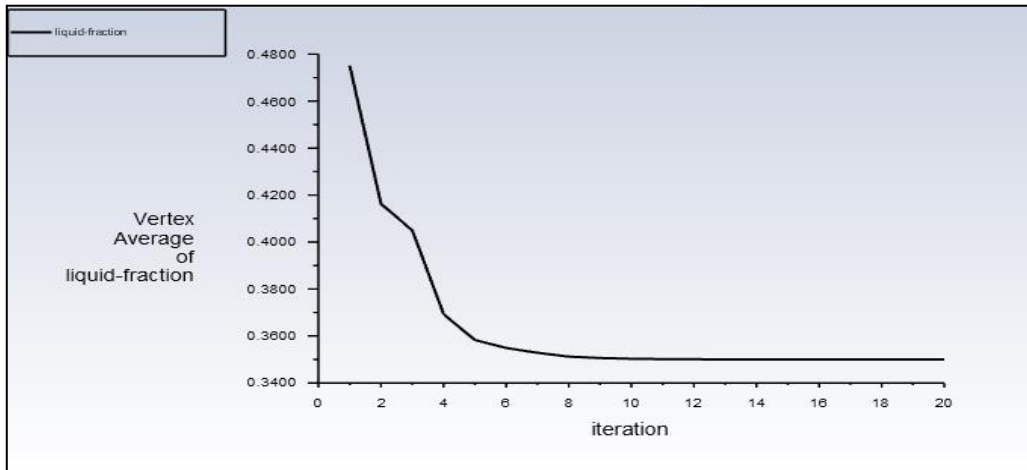


Fig. IV.14: Courbe d'évolution de la fraction liquide du « cire paraffine » à 11h00 am.

3^{eme} cas (à 14h00): dans ce cas le « cire paraffine » change sa phase de solide à liquide comme illustré dans la figure suivante:

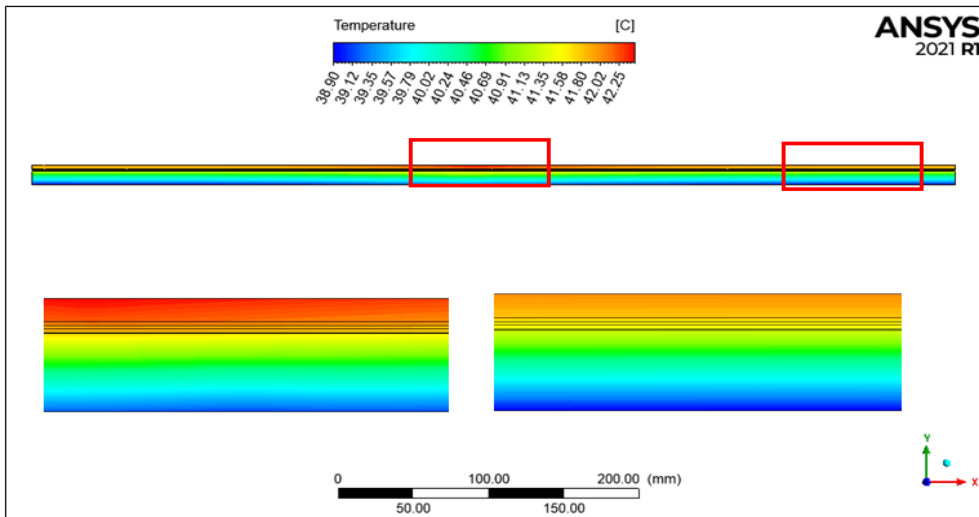


Fig.IV.15: Evolution de la raction liquide du « cire paraffine » à 14h00 pm.

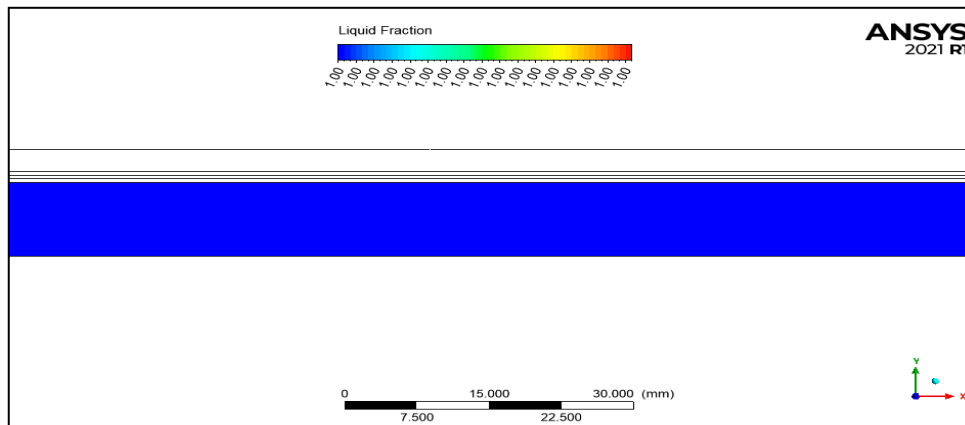


Fig.IV.16: Evolution de la fraction liquide du « cire paraffine » à 14h00 pm.

On peut constater clairement que le « cire paraffine » utilisé pour le refroidissement change son état (sa phase) de solide à liquide pour la période de l'après midi (à 14h00) où il y'en a d'intense radiation solaire dans la région de Oued Souf. Le « cire paraffine » abaissera la température du panneau photovoltaïque (PV) en stockant la quantité d'énergie thermique (calorifique) sous forme latente en changeant sa phase. L'inspection des températures au sein du système PV ou la température moyenne indique clairement que la température maximale atteinte ne sera plus de l'ordre de celle enregistrée pour ce module sans addition du « cire paraffine ».

IV-5. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté et discuté les résultats obtenus de la simulation numérique d'un panneau photovoltaïque dans le but d'améliorer son rendement par refroidissement via utilise le cire paraffine comme PCM (dans la simulation troisième).

On a étudié le panneau photovoltaïque de référence en Cinq (5) couche et un PV composé d'une couche en « cire paraffine ».

Les deux cas sont soumis aux conditions thermiques différent comme montre dans ce chapitre.

On remarque au cours de la simulation que la température de PV augmente avec l'augmentation de flux thermique (1^{er} simulation), et par augmentation de la radiation solaire (2^{em} simulation) , pour cela nous utilisé le « cire paraffine » pour refroidie notre panneau (3^{em} simulation).

On conclut que le MCP de type « cire paraffine » placé dans la couche dernière du mur, réduit la température de 50% par rapport à un mur de référence. L'épaisseur optimale de cette couche est entre 10 cm et 15 cm. Pour améliorer le rendement de panneau photovoltaïque, il faut choisie judicieux d'un matériau à changement de phase est indispensable.

Le choix du matériau à changement de phase dépend principalement de :

- l'intervalle de la température de panneau (température de fusion et température de solidification).
- le propriété chimique de PCM.
- les condition climatique de la région qu'étudie.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne une étude de la simulation numérique d'un panneau photovoltaïque (PV), pour contribuer numériquement à améliorer le refroidissement des modules photovoltaïques. La simulation numérique, abordée en 2D. Cette étude a été structurée en quatre grandes parties, dont les fondamentales conclusions sont exposées ci-dessous :

- La première partie présente une étude bibliographique de l'ensemble des recherches et les travaux antérieurs visant d'approfondir dans ce domaine de recherche.
- La deuxième partie présente une modélisation mathématique, décrivant le présent problème ainsi que les hypothèses simplificatrices adoptées. Les simulations numériques (calculs CFD) ont été parachevées après la création de la géométrie, le maillage et la spécification des conditions aux limites par le code commercial ANSYS Fluent®.
- La troisième partie présente de la méthode numérique utilisée et la procédure entreprise pour l'achèvement d'un nombre fini de simulations numériques visant à éclaircir tous les côtés du problème étudié.
- Dans la quatrième partie, on a présenté les résultats obtenus en les discutons cas par cas, et nous avons déduits les points suivants:
- La température de panneaux est augmentée suite à une augmentation de la source de chaleur ou le flux de chaleur incident ou fourni.
- La température de panneau PV varie avec le temps lorsqu'on impose une condition de radiation solaire.
- Un matériau de changement de phase (PCM) absorbe et stocke de l'énergie thermique, contribuant ainsi au refroidissement du panneau photovoltaïque. Ce fait favorise l'utilisation de cette propriété thermique (transfert thermique en chaleur latente) du PCM pour s'assurer que la température des modules PV est maintenue à une température tolérable pour un fonctionnement idéal, ce qui augmentera la puissance de sortie, améliorera l'efficacité des cellules photovoltaïques et protégera leur intégrité.

De futures travaux de recherche pourront être conduits afin de valider les performances d'un système PV couplé avec du PCM dans des conditions météorologiques plus ou moins réelles, ainsi que la quantité optimale à utiliser pour un PCM spécifique choisi.

Références bibliographies

A- Références en latin :

- [01] - Huang M. J., Eames P. C., Norton B., « Thermal regulation of building integrated photovoltaics using phase change materials», *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 47, pp. 2732, 2004.
- [02] – Site :Web: <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaique/> le 15/02/2022.
- [03] – Site : <https://www.panneau-photovoltaique.com/> le : 15/02/2022.
- [04] – Strachan N.,” Distributed Energy Overview”, *Encyclopedia of Energy*, 2004.
- [05] – Site Web: <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/la-cellule-photovoltaique-comment-ca-marche>
- [06] - Farid M. M., Khudhair A. M., Razack S. A., Al Hallaj S., “A review on phase change energy storage: materials and applications”, *Ene. Conv. Manag.*, vol. 45, pp. 1597-1615, 2004.
- [07] – Site Web: [\(15/03/2022\)](http://www.ef4.be/fr/archive/energie-renouvelable/solairephotovoltaique/le)
- [08] – Site Web: https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire_photovolta%C3%AFque (13/03/2022).
- [09] – Site Web: https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire_photovolta%C3%AFque (13/03/2022).
- [10] - Kalogirou S. A., “Renewable Energy Powered Desalination Handbook”, 2018.
- [11] - Sharma A., Tyagi V. V., Chen C. R., Buddhi D., “Review on thermal energy storage with phase change materials and applications”, *Ren. Sust. Ene. Reviews*, vol. 13, pp. 318-345, 2009.
- [12]- Norton M. J., Eames B., « Performance expérimentale des matériaux à changement de phase pour la réduction de hauteur Température dans la construction de cellules photovoltaïques intégrées », *Sol. Ene.* 80, pp.1121-1130, 2006.
- [13]- da Silva E. G., Thibault J. P., “Cycles thermodynamiques des machines thermiques”, Eng. school, Grenoble, 2008.
- [14]- Mecheri B., « Refroidissement d'une armoire de Télécommunication avec Boucle Diphasique Thermosyphon ». Thèse de Doctorat, université de technologie de Belfort-montbeliard, 2011.
- [15]- Maha A. ,« Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l’enveloppe légère des bâtiments », Thèse de doctorat, univ. Grenoble, 2004.

- [16]- Raj V. A., Velraj R., «Review on free cooling of buildings using phase change materials», Ren. Sus. Ene. Reviews, vol. 14, pp. 2819-2829, 2010.
- [17]- Pardo M. P., « Développement d'un procédé de stockage d'énergie thermique » 2013.
- [18]- Sala G., « Cooling of solar cells, in Cells and optics for photovoltaic concentration », edition Luque, Bristol, pp. 239-267, 1989.
- [19]- " Utilisation des PCM en climatisation passive et chauffage d'intersaison " [archive], 28 décembre 2004
- [20]- Hu J., Babu K.M., "Fabric Testing", 2008.
- [21]- Ho C. P., "Improving Comfort in Clothing", 2011.
- [22]- Mehling H., Cabeza L. F., «Heat and cold storage with PCM», Springer, 2008.
- [23]- Sharifi N., Robak C. W., Bergman T. L., Faghri A., « Three-dimensional PCM melting in a vertical cylindrical enclosure including the effects of tilting », Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 65, pp.798–806, 2013.
- [24]- Syafiqah Z., “Thermal and Electrical Study for PV Panel with Cooling System”, Univesrty Malaysia, 2017.
- [25]- Woinet .B, (1999).« Etude expérimentale et théorique de la cristallisation de l'eau dans les gels alimentaires congelés ». Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard, Lyon 1
- [26]- « Stockage de chaleur dans les Matériaux à Changement de Phase », Thèse de doctorat, 2015.
- [27]- Ghosal J, “Thermal management of photovoltaic panel using PCM for improved efficiency and power output”, University of Windsor, 2019.
- [28]- Versteeg H. K., Malalasekera W., « An introduction to computational Fluid Dynamics, the finite volume Method», Pergamon, 2007.
- [29]- Nehari T., « Etude du refroidissement des cellules photovoltaïques par un matériau à changement de phase », 2016.

b- Références en arabe :

- [30]- الدليل الارشادي لتركيب أنظمة الألواح الشمسية الكهروضوئية، رقم الإصدار 100/ب/04/أ، الصادر عن مكتب التنظيم والرقابة لقطاع الماء والكهرباء والصرف الصحي في امارة ابوظبي، الامارات، ص14، 15، 17، يناير 2017.

Résumé

La production d'électricité à l'aide de systèmes solaires photovoltaïques est devenue à l'heure actuelle l'une des sources importantes et croissantes d'énergies renouvelables et de leur utilisation. Le rendement des panneaux solaires photovoltaïques est réduit et affecté dans des conditions climatiques difficiles dues à la chaleur, sous un rayonnement solaire intense et des températures de l'air ambiant élevées. Pour pallier ce problème, ces plaques sont refroidies, et il existe différentes manières de refroidir ces plaques, par exemple au moyen de matériaux à changement de phase, que nous utiliserons numériquement et cela est difficile à obtenir, à travers des simulations réalisées dans ANSYS Fluent[®], et il s'agit d'améliorer le rendement des panneaux photovoltaïques en les refroidissant.

Mots clés : panneaux photovoltaïques, refroidissement, matériaux à changement de phase, simulation numérique.

Abstract:

The production of electricity using solar photovoltaic systems has become one of the important and growing sources of renewable energies and their use today. The efficiency of photovoltaic solar panels is reduced and affected in harsh climatic conditions due to heat, intense solar radiation and high ambient air temperatures. To overcome this problem, these plates are cooled, and there are different ways to cool these plates, for example by means of phase change materials, which we will use numerically and this is difficult to obtain, through simulations carried out in ANSYS Fluent[®], and it is about improving the yield of photovoltaic panels by cooling them.

Key words: photovoltaic panels, cooling, phase change materials, numerical simulation.

ملخص:

أصبح إنتاج الكهرباء باستخدام أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية أحد المصادر الهامة والمنتامية للطاقات المتجددة واستخداماتها اليوم. يقل ويتأثر مردود الألواح الشمسية الكهروضوئية في الظروف المناخية القاسية بسبب الحرارة، تحت إشعاع شمسي شديد ودرجات حرارة عالية للهواء المحيط. للتغلب على هذا الإشكال، يتم تبريد هذه الألواح، وهناك طرق مختلفة لتبريد هذه الألواح، على سبيل المثال عن طريق مواد تغيير الطور دراسة عددية رقمية، والتي سنستخدمها لكن رقمياً وهذا لصعوبة الحصول عليها، من خلال عمليات المحاكاة التي أجريت في برنامج Ansys Fluent[®]، وهذا لتحسين من مردود الألواح الكهروضوئية من خلال تبريدها.

الكلمات المفتاحية : الألواح الكهروضوئية، التبريد، مواد تغيير الطور، محاكاة عددية.