

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences & Technologie

Filière : Génie Mécanique

Parcours : Master

Option : Énergétique

THÈME

**Amélioration des performances thermiques dans les
panneaux photovoltaïques avec PCM**

Préparé par:

***M^{elle}* MILOUDI Asmaa**
***M^{elle}* DELLAOUI Nedjma**

Devant le Jury :

| Nom et prénoms | Grade | Lieu d'exercice | Qualité |
|-----------------------|--------------|------------------------|------------------|
| ABED | MAA | UIK Tiaret | Président |
| CHAIB Khaled | MCB | UIK Tiaret | Examineur |
| KHALDI Sabrina | MAA | UIK Tiaret | Encadreur |

PROMOTION 2017 /2018

Remerciements

Arrivé au terme de ce mémoire, je voudrais exprimer toute ma reconnaissance aux personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Je voudrais d'abord exprimer toute ma gratitude à : Mme. **KHALDI Sabrina**, Maître assistant à l'Université de Tiaret d'avoir accepté de diriger ce mémoire. Sa compétence et sa constante attention ne pourront être oubliées, je lui en suis très reconnaissant.

Je tiens également à remercier les membres de jury pour avoir bien voulu évaluer ce travail : Mr. MEKROUSSI Said Maître de conférence à l'Université d'Ibn Khaldoun Mr. BELKACEM Abed, Maître d'assistant à l'Université d'Ibn Khaldoun,

Je voudrais enfin remercier mes enseignants qui m'ont formé et toutes ma famille qui m'a soutenu tout au long de mes études et Je remercie également tous les enseignants du département du Génie mécanique, pour leur disponibilité et leurs précieux conseils.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail particulièrement à mes chères parents qui m'ont appris le sens de la vie, m'ont encouragé, m'ont soutenue durant mes études

A mes frères : mohammed, youcef, islam, smail

A mes sœurs : Souad et leurs enfants « Chamsou et liliane », Fatima, Wahida.

Mes amies : Nedjma, khadra, khaldia, iman .G, khadija.

A toute la famille MILOUDI

Je tiens à remercier tout(tes) mes chères amis(es) qui m'ont aidée de loin ou de près de la réalisation de ce travail.

A tous ce que j'aime et qui m'aiment

A tout mes collègues d'étude surtout ceux D'Energétique.

Asmaa.

Dédicaces

Avant tous, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir

Donné le courage et la patience pour réaliser

Ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail :

*A mes très chers parents, Aucune dédicace ne saurait être assez
éloquente pour exprimer ce que vous méritez pour tous les sacrifices que
vous n'avez cessé de me donner depuis ma naissance*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour,
L'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous.*

« Que dieu vous garde et vous Protège »

A mon cher frère Benaïssa

A mes chères sœurs Karima Bouchra Safaa

A toute la famille Dellaoui

Aux chères amies et surtout Wahida Asmaa

A tous ce que j'aime et qui m'aiment

A tous mes collègues d'études surtout ceux D'énergétique.

Nedjma

SOMMAIRE

Sommaire :

| | |
|-----------------------------|-----|
| Remerciement | I |
| Dédicace..... | II |
| Sommaire | III |
| Liste des figures | VII |
| Liste de tableaux | IX |
| Nomenclature | X |
| Introduction générale | 1 |

Chapitre I : Etude bibliographique, notion de base sur les panneaux photovoltaïques

| | |
|--|----|
| I.1.Etude bibliographique..... | 3 |
| I.2. Définition et Historique du photovoltaïque..... | 5 |
| I.3. Energie solaire | 6 |
| I.4 Notions sur la Nature du rayonnement solaire | 6 |
| I.4.1. Rayonnement direct | 6 |
| I.4.2. Rayonnement diffus | 7 |
| I.4.3. Rayonnement réfléchi | 7 |
| I.4.4 Rayonnement globale..... | 7 |
| I.5 L'effet photovoltaïque..... | 7 |
| I.6 La cellule photovoltaïque | 7 |
| I.6.1.Principe de fonctionnement | 8 |
| I.6.2. Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque) | 10 |
| a. Les cellules monocristallines :..... | 10 |
| b. Les cellules poly cristallines..... | 10 |
| c. Les cellules amorphes | 10 |

SOMMAIRE

| | |
|--|----|
| I.7 Paramètres des cellules photovoltaïques | 11 |
| I.8 Les panneaux photovoltaïques..... | 12 |
| I.8.1 Les type des panneaux photovoltaïques | 13 |
| I.8.1.1Panneaux photovoltaïques orientables..... | 13 |
| I.8.1.2Panneaux photovoltaïques fixes..... | 13 |
| I.8.1.3Panneaux photovoltaïques mobiles | 14 |
| I.9 Module photovoltaïque..... | 14 |
| I.10 L'influence de paramètres sur les caractéristiques des cellules photovoltaïques | 14 |
| I.10.1 Influence de la résistance série | 15 |
| I.10.2Influence de la résistance parallèle R_p | 15 |
| I.10.3 Influence de l'association mixte (Série +Parallèle) des cellules PV..... | 15 |
| I.10.4 Influence de la température | 15 |
| Conclusion: | 17 |

Chapitre II : généralité sur les MCP

| | |
|--|----|
| II.1. Introduction..... | 18 |
| II.2. Définition d'un matériau à changement de phase(MCP)..... | 18 |
| II.3. Principe de changement de phase ; chaleur sensible et chaleur latente..... | 19 |
| II.3.1 Le transfère thermique par chaleur sensible..... | 20 |
| II.3.2 Le transfert thermique par chaleur latente..... | 20 |
| II.4 Comparaison des différents types de stockage d'énergie thermique | 21 |
| II.5 Les transferts thermiques | 22 |
| II.5.1 Transfert thermique par convection | 22 |
| A. La différence entre la convection naturelle et convection forcée | 23 |
| II.5.2 Transfer thermique par conduction..... | 23 |
| II.5.3 Transfert thermique par rayonnement | 24 |
| II.6 Types des matériaux à changement de phase (MCP) | 24 |

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| II.6.1 Les MCP Organiques..... | 24 |
| II.6.2 Les MCP Inorganiques | 24 |
| II.6.3 Les MCP Eutectiques..... | 25 |
| II.7 Classes de MCP | 27 |
| II.7.1 Matériaux changement de phase RT..... | 27 |
| II.7.2 Matériaux changement de phase SP..... | 28 |
| II.8 Propriétés des matériaux à changement de phase | 28 |
| II.8.1 Critères thermodynamiques..... | 28 |
| II.9 Les fonctionnalités..... | 29 |
| II.10 Les applications des MCP | 29 |
| II.10.1 Le stockage de l'énergie thermique..... | 29 |
| II.11 Les problèmes liés au changement de phase..... | 30 |
| II.11.1 La surfusion..... | 30 |
| II.11.2 La corrosion..... | 31 |
| II.11.3 La ségrégation..... | 31 |
| II.12 Transfert thermique dans le système PV / PCM..... | 32 |
| II.13 La relation entre le panneau photovoltaïque et les matériaux à changement de phase (MCP)..... | 34 |
| II.14 Conclusion..... | 35 |

Chapitre III : Présentation du code FLUENT

| | |
|---|----|
| III.1 Introduction..... | 36 |
| III.2. Outil de simulation Gambit et fluent | 36 |
| III.2.1. L'outil Gambit..... | 36 |
| III.2.2. Construction d'un maillage..... | 37 |
| III.2.3. Notice d'utilisation de gambit | 37 |
| III.2.4. Démarrage de Gambit..... | 38 |

SOMMAIRE

| | |
|--|----|
| III.2.5. Construction de la géométrie..... | 38 |
| III.2.6. Commandes pour la construction de la géométrie..... | 40 |
| III.2.7. Commandes d'un point..... | 40 |
| III.2.8. Commandes relatives à une face..... | 41 |
| III.3 Maillage..... | 42 |
| III.3.1 Maillage structuré (quadra/hexa)..... | 42 |
| III.3.2 Maillage non structuré (tri/tétra.)..... | 42 |
| III.3.3 Maillage hybride..... | 43 |
| III.3.4 Définition des frontières..... | 43 |
| III.3.5 Exportation du maillage de gambit..... | 44 |
| III.4 L'outil Fluent | 44 |
| III.4.1 Importation de la géométrie (*.msh)..... | 45 |
| III.4.2 Choix du modèle de solidification et fusion | 49 |
| III.4.3 Définition des caractéristiques du fluide..... | 50 |
| III.4.4 Conditions d'opération..... | 50 |
| III.4.5 Conditions aux limites..... | 50 |
| III.4.6 Choix d'ordre des équations et l'algorithme..... | 52 |
| III.4.7 Initialization..... | 52 |
| III.4.8 Choix des critères de convergence..... | 53 |
| III.4.9 Lancement du calcul..... | 53 |

Chapitre IV : Résultats et discussions

| | |
|---|----|
| IV.1. Introduction : | 54 |
| IV.2. Mise en équations de la convection..... | 54 |
| IV.3. Principes des codes CFD..... | 55 |

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| IV.4. Etude comparative entre des différentes géométries à l'aide de code de champs Fluent..... | 56 |
| IV.5. Cas de la géométrie simple..... | 56 |
| IV.6 Description du phénomène | 56 |
| IV.7 Les paramètres Géométriques..... | 57 |
| IV.8 Les conditions aux limites..... | 57 |
| IV.8.1 Conditions initiales..... | 58 |
| IV.8.2. Les propriétés thermo-physique de ‘‘RT25’’ et l’Aluminium | 58 |
| IV.9. Géométries et maillage sous Gambit | 58 |
| IV.10 Comparaison des résultats..... | 59 |
| IV.11 la variation de température en fonction du temps..... | 60 |
| IV.12 Contours de température dans le panneau photovoltaïque de rayon 40mm pour plusieurs valeurs de flux en fonction de temps | 60 |
| Conclusion..... | 65 |
| CONCLUSION GENERALE | 66 |

Bibliographique

Résumé

Listes des figures et des tableaux

Chapitre I :

| | |
|--|----|
| Figure I.1 : Cellule photovoltaïque | 08 |
| Figure I.2 : Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque | 09 |
| Figure I.3 : Cellule en silicium poly cristallin | 10 |
| Figure I.4 : Cellule silicium amorphe | 11 |
| Figure I.5 : Panneau photovoltaïque | 13 |
| Figure I.6 : La caractéristique de $I=f(V)$ en fonction de température | 16 |
| Figure I.17 : La caractéristique de $P= f(V)$ en fonction de température | 16 |

Chapitre II :

| | |
|---|----|
| Figure II.1 : Quelques matériau a changement de phase pochettes, sphères tubes, Plaquettes | 19 |
| Figure II.2 : profil de changement de phase pour le stockage par chaleur latente | 19 |
| Figure II.3 : les trois modes de transfert thermique | 22 |
| Figure II.4 : matériau a changement de phase classe RT | 27 |
| Figure II.5 : matériau a changement de phase classe SP | 28 |
| Figure II.6 : accumulateur de chaleur solaire développée | 30 |
| Figure II.7 : évolution théorique de Température en fonction du temps | 30 |
| Figure II.8: schéma descriptif d'un système de refroidissement PV/PCM avec les conditions aux limites | 32 |

Chapitre III :

| | |
|---|----|
| Figure III.1 : Lancement du Gambit | 38 |
| Figure III.2 : Les opérations pour construire une géométrie | 39 |
| Figure III.3 : Maillage structuré et non structuré | 43 |
| Figure III.4 : Définition des frontières | 43 |
| Figure III.5 : Exportation du maillage | 44 |
| Figure III.6 : Importation de la géométrie | 46 |

| | |
|---|----|
| Figure III.7 : vérification du maillage sous fluent | 46 |
| Figure III.8 : vérification des unités de la première simulation | 47 |
| Figure III.9 : choix du solveur sous fluent | 47 |
| Figure III.10 : affichage de la grille et vérification des conditions | 48 |
| Figure III.11 : la géométrie de panneau photovoltaïque avec MCP | 48 |
| Figure III.12 : établir les équations de l'énergie | 49 |
| Figure III.13 : choix du modèle de turbulence | 49 |
| Figure III.14 : Définition des caractéristiques du fluide | 50 |
| Figure III.15 : Choix de la pression de référence | 50 |
| Figure III.16 : Valeurs des conditions aux limites | 51 |
| Figure III.18 : Paroi orientée vers le nord | 51 |
| Figure III.19 : Choix d'ordre des équations et l'algorithme | 52 |
| Figure III.20: Initialisation du calcul | 52 |
| Figure III.21 : Choix des critères de convergence | 53 |
| Figure III.22 : Choix du nombre des itérations | 54 |
| Chapitre IV : | |
| Figure IV.1 : schéma descriptif d'un système de refroidissement PV/MCP | 58 |
| Figure IV.2 : Maillage utilisé pour le système PV/MCP dans notre étude | 60 |
| Figure IV.3: Comparaison entre nos résultats numériques actuels et ceux de [22]. | |
| La température le long de la surface de PV en fonction du temps | 61 |
| Figure IV.4 : Variation de température en fonction du temps pour des flux différents dans un panneau photovoltaïque de 40 mm | 62 |
| Figure IV.5 : la variation de la température dans le panneau photovoltaïque de rayon 40mm pour plusieurs valeurs de flux en fonction de temps | 63 |

Figure IV.6 : la variation de la température dans le panneau photovoltaïque de différents rayons pour un flux constant en fonction de temps 65

Liste des tableaux :

Chapitre I :

Tableau I.1 : avantages et inconvénients des différents types de PV 11

Chapitre II :

Tableau II.1 : Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur 21

Tableau II.2 : Avantages et inconvénients des MCP 26

Tableau II.3 : Propriétés thermiques de certains MCP 27

Chapitre IV :

Tableau IV.1 : Représente la configuration géométrique d'un système PV/PCM 58

Tableau IV.2 : Les propriétés thermo-physique de "RT25" et l'Aluminium 59

Nomenclature

PV : panneau photovoltaïque

MCP: matériau à changement de phase

BV : bande de valence

BC : bande de conduction

SI : silicium

GE : le germanium

SE : le sélénium

CdTe : le tellure de cadmium

GaAs : l'arséniure de gallium

EPH : les photons d'énergie

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

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

FF: Le facteur de forme

Isc: Le courant de court-circuit(A)

η : Le Rendement énergétique

Voc : La tension en circuit ouvert.(V)

R_s : la résistance série

R_p : la résistance parallèle

M : la masse du matériau [kg] ;

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

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

T_i : la température initiale [°k] ;

T_f : la température finale [°k] ;

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

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

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

T_f : la température de solidification théorique

T_{amb} : Température ambiante

I_T : L'énergie incidente

T_{PV} : Température du panneau photovoltaïque

Δt : Variation du temps

h_1, h_2 : Les coefficients de transfert de chaleur

T_m : Température moyen

β : Le coefficient de dilatation thermique

ρ_0 : La masse volumique de référence

Al : Aluminium.

2D : bidimensionnel

3D : trois dimensions

CFD : Computational Fluid Dynamics

Introduction générale :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique cette conversion d'énergie s'effectue par l'ensemble des cellules dites photovoltaïques(PV). Basée sur un phénomène physique appelle l'effet photovoltaïque, qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposé de la lumière (une énergie suffisante) .la tension générer peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule .l'association de plusieurs cellules (PV) en série/parallèle donne lieu à un module photovoltaïque. Bien que l'énergie photovoltaïque soit connue depuis de nombreuses années comme source pouvant produire de l'énergie électrique allant de quelques milliwatts au mégawatt, il est solution attrayante comme remplacement ou complément des sources conventionnelles d'approvisionnement en électricité en raison de ses nombreux avantages :

- La production de cette électricité renouvelable n'émet pas de gaz à effet de serre, il faut cependant réduire l'impact environnemental de la fabrication du système.
- La lumière du soleil étant disponible partout et quasi-inépuisable, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne, dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville, et aussi bien au sud que dans le nord.
- L'électricité photovoltaïque peut être produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur, ce qui la rend accessible à une grande partie de la population mondiale.

Plusieurs recherches ont été faites dans ce domaine, notamment par convection naturelle ou forcée pour le refroidissement du PV en utilisant un conduit derrière le PV qui permet plus de transfert de chaleur par la circulation d'air pour diminuer la température PV, alors qu'une forme de le conduit peut améliorer le refroidissement de PV dû au vent qui augmente le transfert de chaleur, ainsi réduire la température du PV selon Brinkworth [2], ceci a constaté plus tard que le rapport de 20 pour la longueur au diamètre hydraulique des conduits donne le meilleur refroidissement du PV [3], ce paramètre n'est pas influencé par l'inclinaison du module PV.

- Tripanagnostopoulos et al [4] ont utilisé quatre configurations hybrides PV / thermique PV / EAU, PV / AIR, PV / FREE et PV / ISOLATION pour améliorer la thermique et l'efficacité du panneau PV, ils ont constaté que la température PV du PV

/EAU augmentation du système de 55 ° C à 38 ° C et de 40 ° C pour le système PV / AIR parce que l'eau extrait plus de chaleur du PV que de l'air, mais ils ont conclu que le coût de l'unité supplémentaire de PV / T est plus cher que l'énergie obtenue en refroidissant le PV. Ces techniques sont coûteuses et nécessitent beaucoup d'entretien.

➤ Récemment, le MCP est utilisé comme moyen passif de refroidissement du panneau PV; il aide à absorber l'énergie excédentaire comme chaleur latente jusqu'à ce qu'il soit complètement fondu. Dans ce cas, le MCP est utilisé comme une couche liée à un panneau photovoltaïque (PV) afin de diminuer sa température par la température de transition de MCP, qui est dans la gamme constante pendant la fusion.

➤ De nombreux chercheurs ont utilisé une technologie hybride pour contrôler la régulation thermique dans plusieurs applications, comme l'ont montré Setoh et al [5] et Khateeb et al [6]. Ils ont développé un modèle de transfert de chaleur pour étudier la limitation de la hausse de température pour les appareils électroniques et le refroidissement des murs du bâtiment par intégrer un MCP dans la brique constructive et dans les paquets de l'appareil . Castell et al [7] ont trouvé que l'utilisation de MCP intégré à une brique constructive réduisait la température de construction d'environ 15% puis d'une autre sans MCP. De même Setoh et al [5] ont constaté que l'incorporation de MCP à un téléphone mobile stabilise sa température pendant une longue période d'utilisation.

➤ Le but de ce travail est d'améliorer les performances thermiques dans un panneau photovoltaïque par utilisation d'un matériau à changement de phase (MCP).

La rédaction de notre mémoire se compose de quatre chapitres :

➤ Dans le premier chapitre, nous avons présenté une revue bibliographique sur les panneaux photovoltaïque, construction des cellules photovoltaïques, l'effet photovoltaïque et principe de fonctionnement. Sont également détaillés

➤ Dans le deuxième chapitre, nous avons rappelé quelques données de base concernant le matériau à changement de phase (MCP) Et sa relation avec les panneaux photovoltaïques et leur application au niveau de ce dernier.

➤ Dans le troisième chapitre, une présentation générale sur le code de calcul **Fluent** que nous avons utilisé pour la simulation.

➤ Dans le quatrième chapitre, nous présentons les résultats obtenues lors de la simulation des panneaux photovoltaïques avec un matériau de changement de phase (MCP).

Nous terminerons ce travail par une conclusion générale

Chapitre I

*Etude bibliographique et
notion de base sur les
panneaux photovoltaïques*

I.1 Etude bibliographique

Hasan et al [10] ont étudié expérimentalement la régulation thermique de quatre configurations différentes de bâtiments photovoltaïques intégrés au bâtiment (BIPV), à trois intensités d'insolations en utilisant cinq PCM de température de fusion différente. La température minimale obtenue était de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant 5h sous $1000\text{W} / \text{m}^2$, en plus ils ont conclu que la régulation de la température dépendait de la quantité de PCM et de la conductivité thermique du PCM et de l'enceinte. De plus, la configuration de Huang et al [8] a été traitée numériquement par Biwole [11], en utilisant un modèle d'éléments finis, où une bonne performance a été obtenue.

Cellura et al [12] ont étudié un système PV / PCM en utilisant la méthode des éléments finis, ils ont considéré le PCM comme pur et sa température de fusion comme constante, mais ces propriétés ne sont pas valides car les PCM sont des mélanges de paraffines changement de gamme, ils ont augmenté les performances du système PV / PCM d'environ 20%.

Castell et al [7] ont trouvé que l'utilisation de PCM intégré à une brique réduisait constructivement la température de construction d'environ 15% puis d'une autre sans PCM. De même Setoh et al [5] ont constaté que l'incorporation de PCM à un téléphone mobile stabilise sa température pendant une longue période d'utilisation. Khateeb et al [6] ont étudié expérimentalement et numériquement le refroidissement du dispositif électronique par l'inclusion du PCM dans ses puits thermiques. Où, ils ont constaté que cette technique peut améliorer le refroidissement de l'emballage électronique par rapport à un autre sans PCM.

Huang et al [8] ont étudié numériquement et expérimentalement le refroidissement d'une unité photovoltaïque en utilisant le PCM dans une enceinte rectangulaire derrière la PV. Ils ont réussi à maintenir la température de la face avant à $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant 80 min, avec un PCM ayant une température de fusion de $32\text{ }^{\circ}\text{C}$, pour les cellules PV caractérisées à $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $1000\text{W} / \text{m}^2$.

Compte tenu de la faible conductivité thermique du PCM, des ailettes internes ont été utilisées pour répartir la charge thermique dans le PCM afin de réduire l'augmentation de la température du PV. Un travail expérimental pour le même problème a été mené par Huang

et al [9], en utilisant deux PCM (RT25, GR40) avec des températures de fusion de 26.6°C et 43°C respectivement. Le RT25 a été bien utilisé pour contrôler l'élévation de température du PV dont la température de fusion est proche de la température ambiante par rapport au GR40. Pour contrôler l'élévation de température sur la surface frontale du système PV / PCM, Huang et al [13] ont utilisé des ailettes internes à travers le PCM avec plusieurs espacements pour diminuer l'énergie excédentaire du système PV / PCM et diminuer la formation de la solidification. Ils ont constaté que l'utilisation d'ailettes améliore la répartition de la température et la stabilité du système PV / PCM. Ici, l'utilisation de RT27 PCM avec ailettes internes a contribué à réduire l'élévation de température du PV et l'a maintenu sous 30°C pendant 150 min dans ce cas. Karunesh et al [14] ont réalisé une étude de simulation numérique de système PV / PCM en utilisant le code commercial de Comsol Multiphysics.

L'effet des mécanismes de transfert de chaleur (convection ou conduction), la vitesse du vent et l'angle d'inclinaison du panneau PV ont été étudiés. Lorsque seule la conduction est considérée, la température de fonctionnement a diminué d'environ 3°C et l'efficacité solaire améliorée de 5%, en plus de la vitesse du vent et l'angle d'inclinaison plus élevé permet un bon refroidissement des panneaux PV.

Stropnik et al [15] ont étudié un système PV / PCM numériquement avec le logiciel TRNSYS et expérimentalement, la génération électrique par le module PV a été améliorée jusqu'à 7% pendant un an. Hagar Elarga et al [16] ont développé un modèle physique pour simuler l'incorporation d'une couche PCM à un panneau PV dans une façade à double peau à trois climats différents, qui a montré que la double peau du PCM pouvait améliorer l'efficacité de conversion de l'énergie solaire et quel que soit le climat, l'utilisation de PCM peut également augmenter le refroidissement du bâtiment de plus de 20% par mois.

De nos jours, en plus du type d'avion à panneau solaire photovoltaïque, il existe un système hybride, qui combine le panneau solaire à concentration (CSP) avec le panneau PV pour former une nouvelle technologie connue sous le nom de miroir PV. Lorsque le panneau PV placé derrière le système de réflecteur CSP comme panneau PV courbe [17], ou plusieurs panneaux PV disposés à l'arrière du miroir pour prendre la forme de courbure [18]. Ce système parabolique fait avec des cellules solaires spéciales qui concentre la grande partie de la lumière du soleil dans un récepteur positionné au point focal du réflecteur.

D'après les recherches ci-dessus sur le refroidissement des dispositifs PV, tous les chercheurs tentent de contrôler la hausse de température sur un panneau PV plat, mais n'ont jamais considéré l'effet de la courbure du panneau au meilleur de nos connaissances. Un modèle numérique de transfert de chaleur a été développé pour traiter un petit prototype de système PV / PCM 132x50 (mm), en utilisant la méthode des volumes finis.

I.2 Définition et Historique du photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque », souvent abrégé par les lettres PV, a été formé à partir des mots « photo », un mot grec signifiant lumière, et « Volta », le nom du physicien italien Alessandro Volta, qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque, c'est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité. Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité. Cette conversion, appelée effet photovoltaïque [1].

L'histoire du PV remonte en 1839, lorsque le physicien français Antoine César Becquerel Découvrait le principe photovoltaïque. L'effet photovoltaïque en tant que tel a été découvert en 1887 par le physicien allemand Heinrich Rudolf Hertz [2] [3].

C'est Albert Einstein, qui le premier, a pu expliquer le principe du photovoltaïque en 1923.

En 1955, des chercheurs américains (Chapin, Fuller, Pearson et Prince) travaillant pour les laboratoires Bell Téléphone, développèrent une cellule photovoltaïque à haut rendement de 6 %.

En 1959, le premier satellite alimenté par des piles PV fut lancé. La première maison avec au vu le jour en 1973 à l'université de Delaware aux Etats-Unis d'Amérique.

Alors, en 1983, la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcouru 4000 Kilomètres en Australie [4] [5].

Aujourd'hui, avec l'amélioration du rendement de conversion et la réduction des coûts de Production, le marché photovoltaïque s'est considérablement développé. Durant ces vingt Dernières années, il a progressé de 20 % à 25 % par an atteignant 427 MW en 2002. Néanmoins, le photovoltaïque représente moins de 0,1 % de toute la production énergétique mondiale [3].ne installation photovoltaïque

I.3. Energie solaire

L'énergie solaire est l'énergie que dégage le soleil sous forme de rayonnement, direct ou diffus. Sur terre l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau et du vent, le règne végétal dont dépend le règne animal, l'utilise également en la transformant en énergie chimique par la photosynthèse. Grâce aux diverses exécutions, elle peut être transformée en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine, notamment en chaleur, en électricité ou en biomasse. Par extension, l'expression « énergie solaire » est souvent employée pour désigner l'électricité ou l'énergie thermique obtenue à partir du rayonnement solaire. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés:

L'énergie solaire thermique : qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux solaires. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la Chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.

L'énergie solaire photovoltaïque : qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est Déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne Disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon [6].

I.4 Notions sur la Nature du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ($0.2\mu\text{m}$) à l'infrarouge lointain ($2.5\mu\text{m}$). On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise. Pour tenir compte de la distance traversée par les rayons, il est nécessaire d'introduire une notion de masse d'air (AM) elle correspond à la longueur relative du parcours à travers l'atmosphère terrestre traversée par le rayonnement solaire direct. Au niveau du sol le rayonnement global reçue par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales [6]

I.4.1. Rayonnement direct

Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant de disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère [6].

I.4.2. Rayonnement diffus

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère [6].

I.4.3. Rayonnement réfléchi

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de sol appelé Albédo (ε) $0 \leq \varepsilon \leq 1$ [6]

I.4.4 Rayonnement globale

Plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct diffus et réfléchi [6]

I.5 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque (ou photoélectrique), c'est la production d'électricité directement de la lumière, qui repose principalement sur trois grands principes dont l'action conjuguée de manière quasi simultanée engendre la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique :

- L'absorption de photons
- La conversion de l'énergie absorbée en charges électriques libres
- La collection de ces charges dans un circuit électrique extérieur [7] [8]

I.6 La cellule photovoltaïque

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées de plusieurs couches :

- un cristal semi-conducteur dope de type P (compose de silicium dope par un élément contenant un nombre inférieur d'électrons qu'une couche de silicium pur),
- celui-ci recouvert d'une couche très mince (d'épaisseur égale à quelques millièmes de millimètres) d'un semi-conducteur dope de type N (compose de silicium
- dope par un élément contenant un nombre supérieur d'électrons qu'une couche de silicium pur),

- une jonction j située entre ces deux zones permettant le passage d'électrons d'une zone

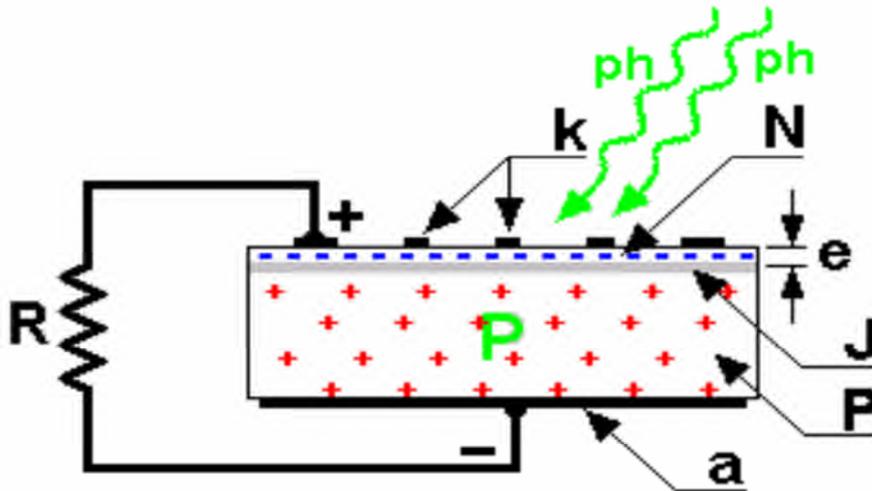


Figure I.1. Cellule photovoltaïque

La couche N est recouverte d'une grille métallique correspondant à la cathode K (pôle positif) et la couche P, d'une plaque métallique représentant l'anode A (pôle négatif). L'épaisseur finale du cristal est de l'ordre du millimètre. Lorsqu'un rayon lumineux frappe le module photovoltaïque, il peut pénétrer dans le cristal et ainsi créer un apport d'énergie venant arracher un électron de la couche N pour le placer dans la couche P. Les charges à l'intérieur de la cellule sont alors modifiées et créent une différence de potentiel électrique appelée tension. Celle-ci forme alors un courant électrique.

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [10].

I.6.1. Principe de fonctionnement

Il existe différentes techniques permettant la conversion directe de la lumière solaire en électricité, la plus connue est la conversion photovoltaïque effectuée à l'aide de matériaux semi-conducteurs tel que le silicium (Si), le germanium (Ge), le sélénium (Se) ou les composés semi-conducteurs tel que l'arséniure de gallium (GaAs), le tellure de cadmium (CdTe). Les cellules solaires de type GaAs sont très coûteuses dans leur fabrication, leur utilisation est aujourd'hui essentiellement limitée aux applications spatiales. La majorité des

cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir du silicium cristallin, car il possède la caractéristique d'être non toxique contrairement au cadmium ou au sélénium, en plus, il permet d'atteindre des efficacités de conversion remarquables, il constitue environ 28% de l'écorce terrestre sous forme de composés (silicates, silice), ce qui en fait une source quasi inépuisable.

La cellule solaire à semi-conducteur est un dispositif permettant de débiter un courant électrique dans une charge externe lorsque celui-ci est exposé à la lumière. Son principe de fonctionnement se résume comme suit:

Lorsque la cellule est exposée au rayonnement solaire, les photons d'énergie E_{ph} pénétrant dans la cellule solaire transmettent leur énergie aux atomes de la jonction. Si cette énergie est suffisamment élevée, elle peut faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction «trou »

Les électrons (charges N) et les trous (charges P), sont alors maintenus séparés par un champ électrique qui constitue une barrière de potentiel .Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel et un courant électrique circule.

Figure (I -2)[11]

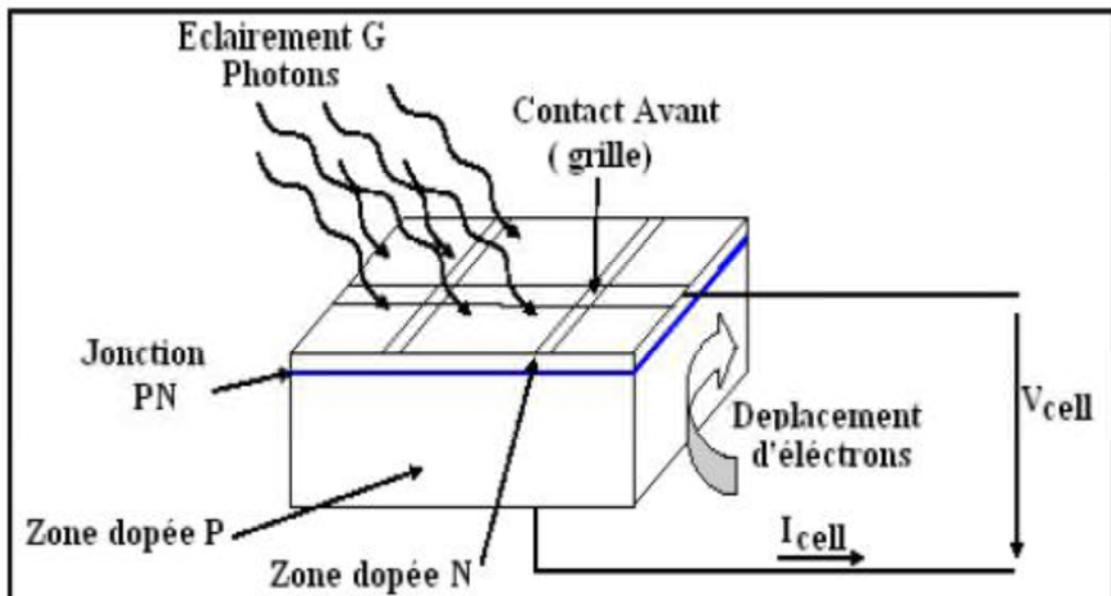


Figure I.2 Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Les cellules les plus répandus actuellement sont à base de silicium (différence de potentiel de 0.6 V) [7].

I.6.2. Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque)

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par a un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules [12]

a. Les cellules monocristallines :

Elles ont le meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu'24% en laboratoire) Cependant, elles coûtent trop chers dues à leur fabrication complexe.

b. Les cellules poly cristallines

Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important. Cependant leur rendement est plus faible (de 11% à 15% voir jusqu'à19.8 en laboratoire

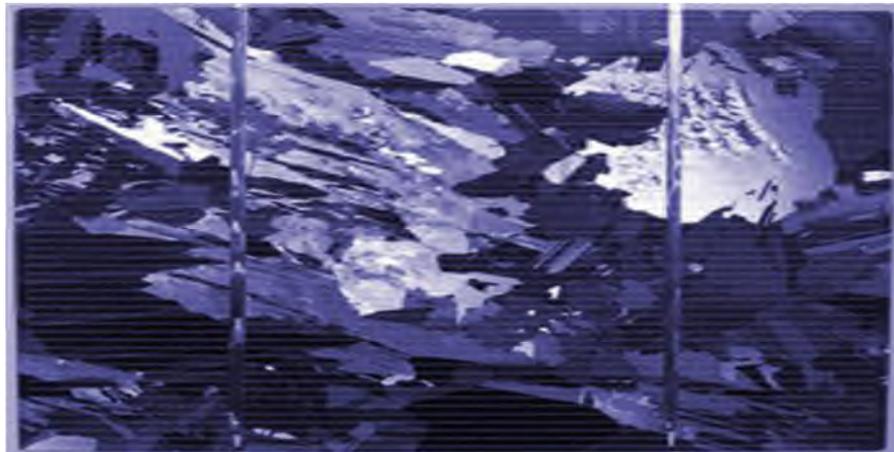


Figure I .3.Cellule en silicium poly cristallin

c. Les cellules amorphes

Elles ont un faible rendement (de 5% à 8% voir jusqu'13% en laboratoire) , mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé . Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices

solaires ou encore des montres. L'avantage de ce dernier type est le fonctionnement avec un éclairage faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment



Figure I.4 Cellule silicium amorphe [19]

Tableau I.1 : avantages et inconvénients des différents types de PV

| Type | Silicium mono cristallin | Silicium poly cristallin | Amorphe |
|----------------------|--|---|---|
| Durée de vie | 35ans | 35 ans | <10ans |
| Avantages | bon rendement en soleil direct | bon rendement en soleil direct (moins que le monocristallin mais plus que amorphe | Souplesse prix moins élevé que les cristallins Bon rendement en diffus |
| Inconvénients | Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...) prix élevé | Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux ...) prix élevé | Mauvais rendement en plein soleil |

I.7 Paramètres des cellules photovoltaïques

Une cellule solaire est constituée par une jonction PN, cette dernière réalisée à partir de matériaux sensibles à la lumière, elle présente la particularité de pouvoir fonctionner en Générateur photovoltaïque. Ce comportement en statique peut être décrit par l'équation (I.3) définissant le comportement d'une diode sous éclairage [10] [24]. Cette relation entre les

trois grandeurs, I , I_{ph} et I_{obs} (V) représente la caractéristique courant tension idéale permettant de déterminer les grandeurs caractéristiques principales du fonctionnement des cellules solaires:

- **I_{sc}**: Le courant de court-circuit.
- **V_{oc}**: La tension en circuit ouvert.
- **P_{max}**: Puissance maximale débitée par la photodiode.
- **FF**: Le facteur de forme.
- **η** : le rendement de conversion d'énergie.

Rendement :

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est le rapport de la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique qui est égal au rapport lumineuse en énergie électrique qui est égal au rapport de la puissance maximale de sortie sur la puissance des radiations lumineuses.[1].

I.8 Les panneaux photovoltaïques

Un panneau photovoltaïque se compose d'un certain nombre de modules qui sont constitués par l'association de cellules en série ou en parallèle. Utilisés dans les installations photovoltaïques. Ils captent les rayons du soleil pour produire un courant continu qui sera envoyé vers un onduleur qui transforme ce courant en alternatif. La mise en série et en parallèle des panneaux permet d'obtenir la tension et le courant exigés dont les performances dépendent de l'association des cellules et de la matière qui les compose. Le point de fonctionnement de cet ensemble de panneaux photovoltaïques est défini par l'intersection de sa caractéristique courant-tension avec la ligne de charge [17]



Figure I.5 Panneau photovoltaïque

I.8.1 Les type des panneaux photovoltaïques

I.8.1.1Panneaux photovoltaïques orientables

Avec des panneaux orientables, on peut modifier l'inclinaison tous les mois. Mais par facilité on peut également choisir une inclinaison pour l'été, une autre pour l'hiver, on utilise ce genre de structure pour des applications au sol ou pour des toits plats. Pour ces systèmes a inclinaison de variable il existe un angle d'inclinaison de panneaux par rapport a l'horizontal, qui permet de maximiser la production d'électricité mensuelle [18]

I.8.1.2Panneaux photovoltaïques fixes

Les panneaux photovoltaïques fixes sont installés dans une position fixe tous au long d'année (azimut et inclinaison) le rendement optimum est obtenu pour une orientation sud avec une inclinaison de 35 .dans cette position un système de puissance de'1 Kwc produit environ de 900 Kwh par an.si on s'écarte de cette position. le rendement diminue .cette diminution du rendement peut être calculée on multipliant le rendement obtenu en position optimale par le facteur de correction pour l'orientation et l'inclinaison choisie (ce qu'on appelle le facteur de transposition qui tient compte de l'orientation et l'inclinaison FT).[18]

I.8.1.3Panneaux photovoltaïques mobiles

L'objectif des panneaux photovoltaïques mobile est de pouvoir suivre le soleil tout au long de la journée .pour cela, la structure possède deux degrés de liberté. Une rotation horizontale pour régler l'azimut et une rotation verticale pour l'inclinaison. Ce système permet aux panneaux photovoltaïques de suivre continuellement la position du soleil pour assurer une production électrique maximum. Ce type de structure permet d'augmenter la production d'électricité par rapport aux panneaux fixes d'environ 25% [18]

I.9 Module photovoltaïque

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire. La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallins conne ctés en série [6].

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques.
- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur [6].

I.10 L'influence de paramètres sur les caractéristiques des cellules photovoltaïques

Le comportement électrique d'une cellule dépend de deux types de paramètres dont:

- Des paramètres internes tels que la résistance série R_s , la résistance shunt R_p .
- Des paramètres externes tels que le flux solaire et la température T [15].

I.10.1 Influence de la résistance série

Résistance série caractérise les pertes par effets Joule de la résistivité du semi-conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule.

- Les contacts semi-conducteurs-électrodes à résistance élevée abaissent appréciablement la tension et le courant de sortie ce qui va limiter le rendement de conversion.
- L'influence de la résistance série sur la caractéristique $I=f(V)$ de la cellule solaire est représentée sur la figure I-6 [19][15]

I.10.2 Influence de la résistance parallèle R_p

La résistance parallèle (ou shunt) caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structuraux du matériau épaisseurs des régions N et P et de la zone de charge d'espace.

L'existence de fissures et de défaut de structures complexes devient le siège de phénomène physique assimilable aussi à une résistance parallèle (R_p). Ordre de grandeur de R_p pour une cellule au Si: $R_p = 10^2$ à $10^4 \Omega$. R_p augmente avec le groupement série de cellules solaires et diminue avec une connexion parallèle. L'influence de la résistance parallèle sur la caractéristique de la cellule solaire est représentée sur la figure I-7 [19].

I.10.3 Influence de l'association mixte (Série +Parallèle) des cellules PV

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est-à-dire Série-Parallèle [19]

I.10.4 Influence de la température

L'influence de la température sur la caractéristique I-V et P-V de la cellule solaire est représentée sur la figure I-9, pour un éclairement fixe $G=1000\text{W/m}^2$

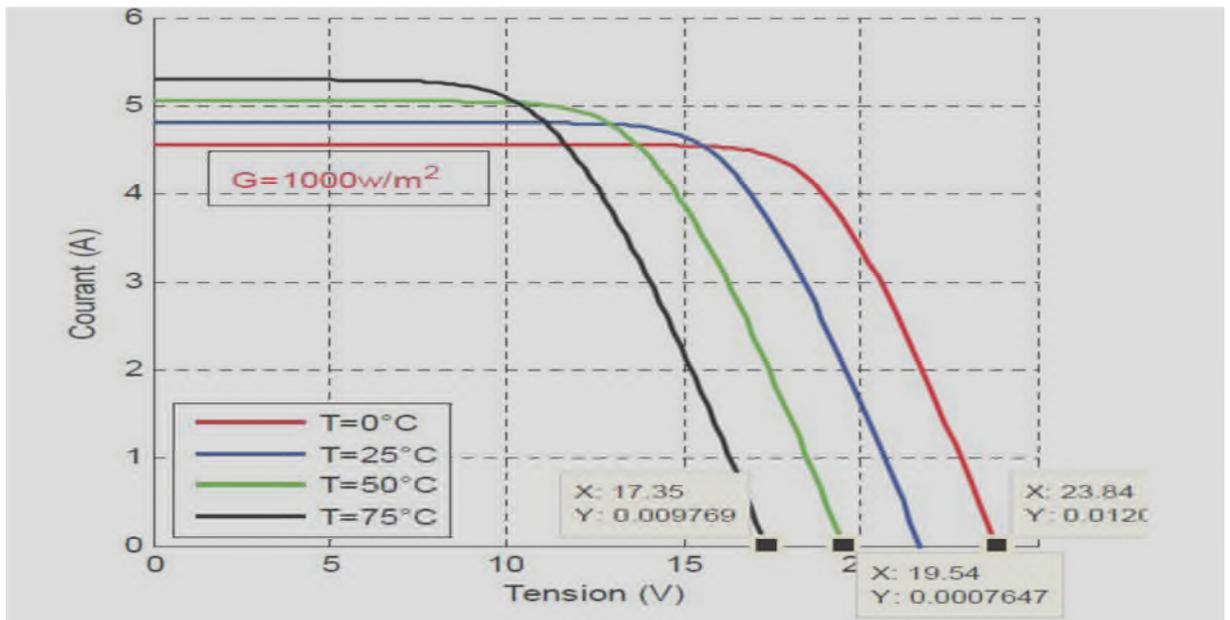


Figure I.6. La caractéristique de $I=f(V)$ en fonction de température [11].

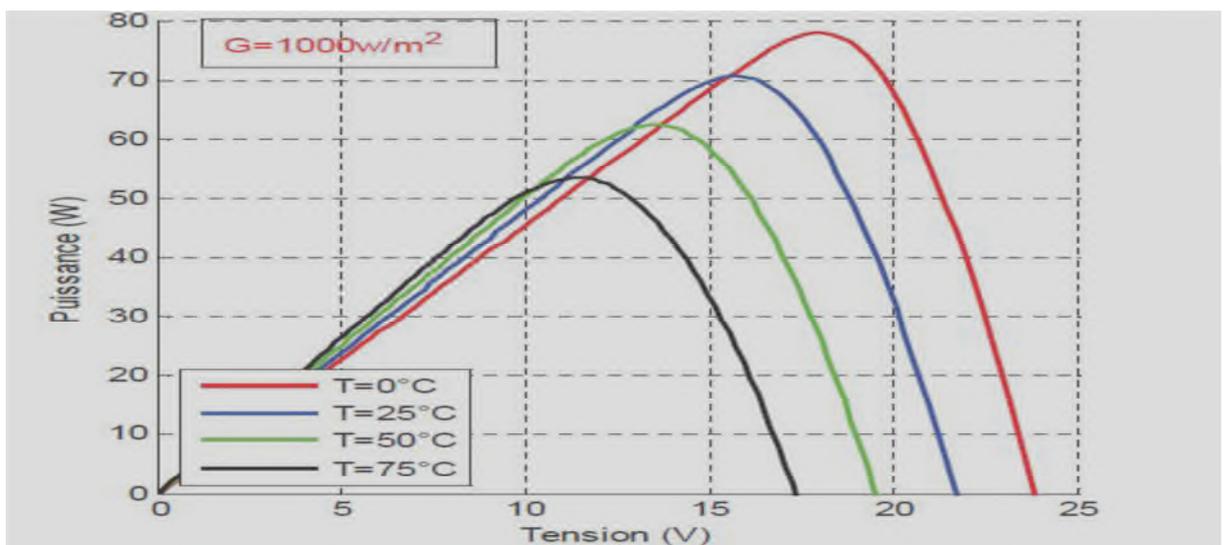


Figure I.7. La caractéristique de $P=f(V)$ en fonction de température [11].

Pour la figure (I.6) Nous remarquons que le courant dépend de la température puisque le Courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, on constate que la Température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Et par contre la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente figure (I.7).

Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension du sujet. Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, leurs différents types et leur application dans le domaine photovoltaïque, nous avons ensuite parler sur les panneaux photovoltaïques & expliqué l'effet photovoltaïque et le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres limitant, Nous avons rappelé aussi les modules photovoltaïques et leurs associations.

Chapitre II

Généralité sur les MCP

II.1 Introduction

L'énergie solaire reste la forme la plus exploitée dans le domaine du stockage. Il peut s'effectuer sous diverses formes, surtout sous forme de chaleur sensible (eau, huile, béton, céramique, etc.) Ou sous forme de chaleur latente (eau, paraffines, sels, etc.). Le stockage d'énergie sous forme de chaleur est beaucoup moins coûteux que sous forme électrique. Donc, vue l'importance d'énergie solaire, la place qu'elle peut occuper dans l'énergétique future, son stockage thermique économe et efficace, il est amplement justifié de concentrer les efforts de recherche pour améliorer le rendement du stockage des systèmes actuels et de chercher de nouvelles technologies de stockage.

La nature intermittente de l'énergie solaire pose des problèmes de stockage. Il est nécessaire de développer des dispositifs de stockage permettant le transfert d'énergie des périodes excédentaires aux périodes déficitaires et adapter ainsi sa production à sa consommation. Ce stockage peut être sous forme de chaleur sensible ou de chaleur latente. Différents types d'unités de stockage ont été conçus et étudiés. Le stockage thermique par chaleur latente dans les liquides ou les solides peut être un moyen très intéressant en utilisant des matériaux à changement de phase. ces MCP présentent l'avantage de stocker une grande quantité d'énergie avec un bon rapport masse/volume.[23]

II.2 Définition d'un matériau à changement de phase (MCP)

Les matériaux à changement de phase MCP (Phase Change Material) ont pour particularité de pouvoir stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente.

La chaleur étant absorbée ou restituée lors du passage de l'état solide à l'état liquide.

Les MCP reposent sur l'application d'un principe physique simple .Au-delà d'une certaine température caractéristique de chaque matériau, ils se liquéfient en absorbant la chaleur de l'atmosphère ambiante et les restituent lorsque la température baisse .cette propriété du matériau est liée à son importante énergie de fusion par unité de volume, plus celle-ci sera grande plus les propriétés de stockage/restitution de la chaleur seront intéressantes. [24]

L'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) pour le stockage d'énergie thermique a suscité un regain d'intérêt ces dernières années. Cela est dû au fait que les MCP ont de fortes densités de stockage (quantité d'énergie stockée par unité de masse). En outre, ces matériaux peuvent être appliqués dans plusieurs domaines. [25]

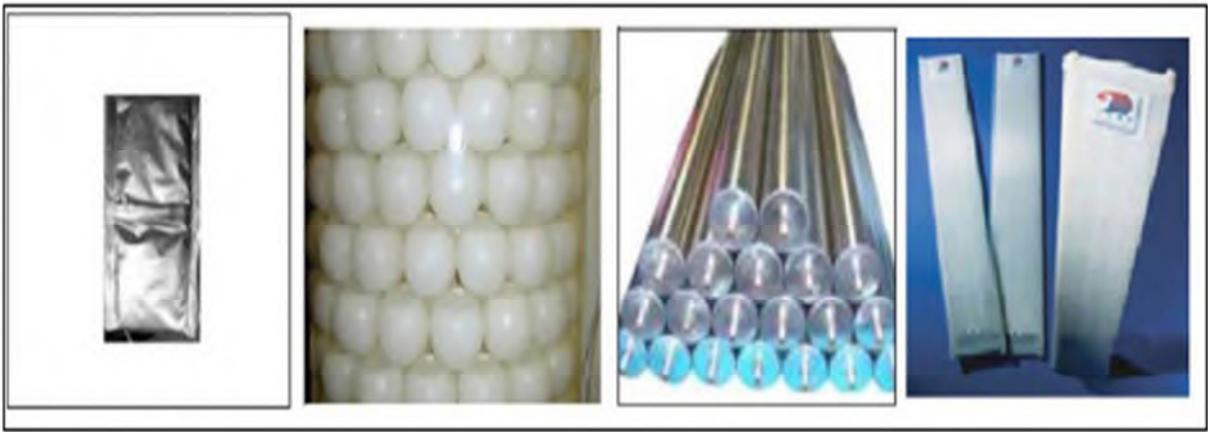


Figure II.1 : Quelques matériaux à changement de phase : pochettes, sphères, tubes, plaquettes [39]

II.3 Principe de changement de phase ; chaleur sensible et chaleur latente

On distingue deux types de stockage de chaleur (stockage thermique) à savoir par chaleur sensible et chaleur latente.

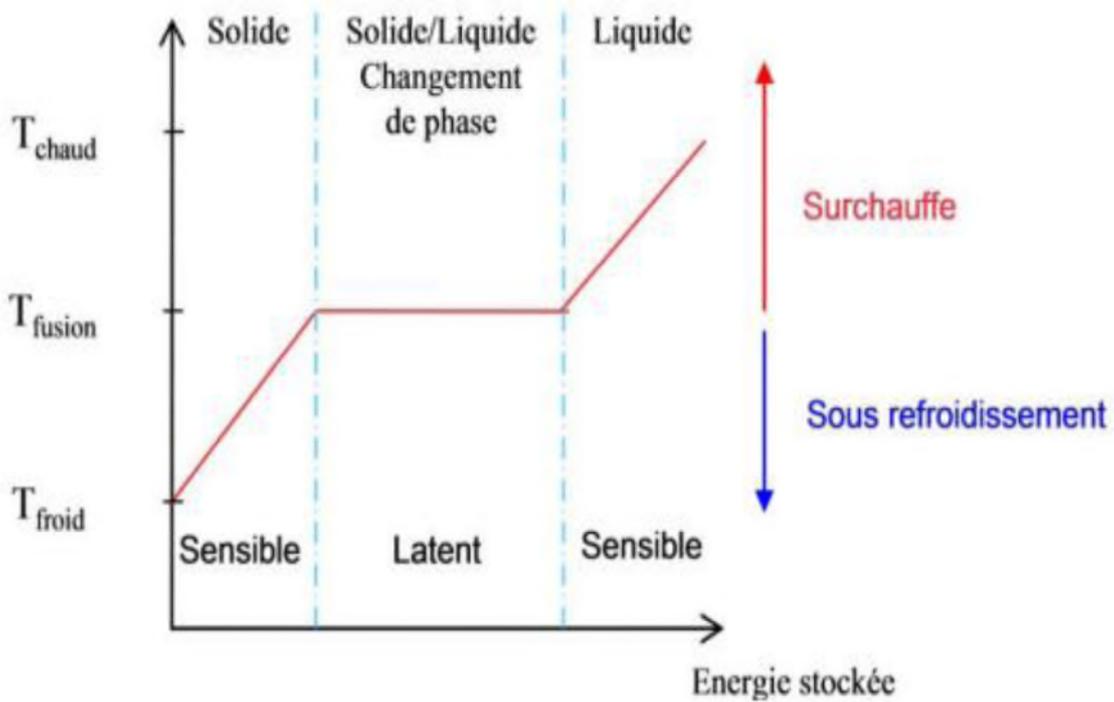


Figure II.2 : Profil de changement de phase pour le stockage par chaleur latente (solide/liquide).[33]

II.3.1 Le transfère thermique par chaleur sensible

dans ce cas l'énergie thermique transférée fait varier la température de matériau. 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 est : $Q = m(h_f - h_i) = mC_p(T_f - T_i)$.

m : la masse du matériau [kg] ;

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

h_f : l'enthalpie massique finale [j/kg] ;

T_i : la température initiale [°k] ;

T_f : la température finale [°k] ;

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

II.3.2 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 chaleur latente échangée par un matériau est la chaleur latente de changement de phase notée L_f (f : fusion) pour un changement de phase Liquide/Solide, et L_v (v : vaporisation) pour un changement de phase Liquide /Vapeur.

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.

Lors du changement de phase, le MCP 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 MCP. Cela signifie qu'il faut plus de temps pour stocker ou déstocker une même quantité d'énergie en latent qu'en sensible. [26]

II.4 Comparaison des différents types de stockage d'énergie thermique

Le Tableau II- 1 répertorie les caractéristiques des trois systèmes de stockage d'énergie thermique présentés. Six paramètres fondamentaux ont été choisis : la densité énergétique, la température de stockage, la durée de stockage, le transport de l'énergie, la maturité du système et la complexité de mise en œuvre du système.

Tableau II.1 : Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur [33]

| | | Stockage par chaleur sensible | Stockage par chaleur latente | Stockage par voie thermochimique |
|-------------------------|--------------|---|---------------------------------------|--|
| Densité énergétique | volumétrique | Faible~15-60 kWh.m ⁻³ | Moyenne~50-100kWh.m ⁻³ | Elevée~100-500kWh.m ⁻³ |
| | massique | Faible~0.02-0.03kWh.kg ⁻¹ | Moyenne~0.05-0.1kWh.kg ⁻¹ | Haute~0.5-1 kWh.kg ⁻¹ |
| Température de stockage | | Température de l'étape de charge | Température de l'étape de charge | Température de l'étape de charge ou température ambiante |
| Durée de stockage | | Limitée (Pertes thermiques) | Limitée (pertes thermiques) | Théoriquement illimitée |
| Transport de l'énergie | | Faible distance | Faible distance | Distance théoriquement illimitée (Kato & al. 2006) |
| Maturité | | Echelle industrielle (20MW _e) | Echelle pilote (100kW _{th}) | Echelle laboratoire (1-5 kW _{th}) |
| Technologie | | Simple | Moyenne | Complexe |

Les différents types de stockage ont été comparés grâce au calcul des volumes de stockage nécessaires pour emmagasiner une énergie. Dans le stockage par chaleur sensible, la capacité de stockage de l'énergie thermique des MCP est plus grande donc nécessite moins de volume (15-60kWh.m⁻³) par contre dans le stockage par chaleur latente nécessite un volume un peut plus

élevée (50-100kWh.m³) .En effet, les stockages par chaleur sensible et latente sont réversibles mais leurs densités de stockage sont inférieures à celles des stockages thermochimique

II.5 Les transferts thermiques [27] : Il existe plusieurs types de transmission de chaleur :

- Le transfert thermique par convection
- Le transfert thermique par conduction
- Le transfert thermique par rayonnement

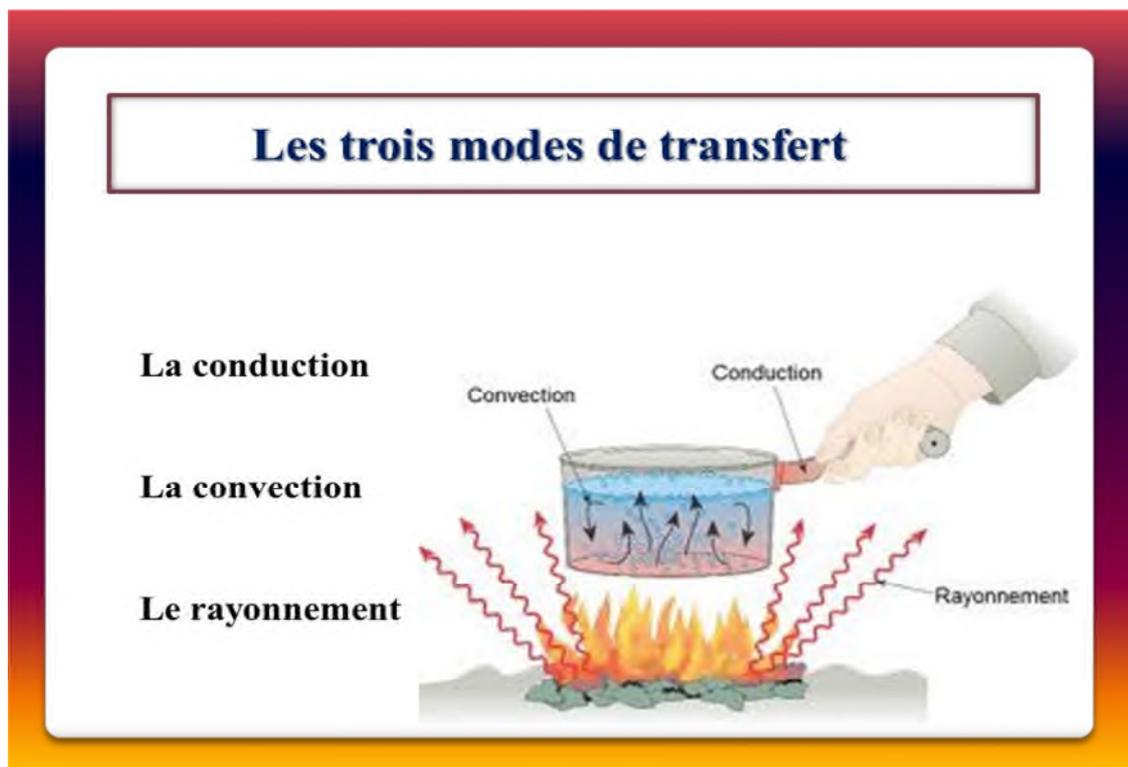


Figure II.3 les trois modes de transfert thermique.

II.5.1 Transfert thermique par convection

Il s'agit d'un transfert de chaleur qui s'effectue grâce à un mouvement de matière dans un milieu liquide ou gazeux. En effet, la circulation d'un fluide chauffe et fait circuler la chaleur. C'est donc un terme plutôt réservé aux fluides. La chaleur est propagée par déplacement de matière.

Lors de la convection les mouvements se produisent en général de manière spontanée sous l'effet d'une différence de température entre des zones d'un fluide. En effet, la densité d'une substance dépend de sa température : un gaz ou un liquide possède une densité d'autant plus faible que sa température est élevée

Par conséquent, un fluide chaud a donc tendance à s'élever et un fluide froid à descendre ce qui provoque des courants ascendants ou descendants que l'on retrouve par exemple dans l'air ou dans l'eau.

Au cours de ces mouvements, les fluides chauds transmettent de la chaleur aux fluides plus froids.

A) La différence entre la convection naturelle et la convection forcée

➤ La convection naturelle :

Se retrouve dans les phénomènes environnementaux. Quand une zone de l'atmosphère change de température et se déplace verticalement : le changement de température influe sur sa masse volumique. Il se crée un mouvement de convection à l'origine des phénomènes naturels comme par exemple les courants marins.

➤ La convection forcée : est une circulation artificielle d'un fluide.

On trouve ce système de convection forcée dans le chauffage central avec accélérateur, les chauffe-eau solaires ou même la circulation sanguine ! (les échanges thermiques entre les organes et la peau se font essentiellement par convection, assurée grâce à la circulation sanguine.)

II.5.2 Transfert thermique par conduction

La conduction correspond au transfert de chaleur direct entre des matières en contact. La conduction thermique est un terme spécifique aux solides. C'est un transfert thermique direct au sein d'un milieu matériel.

Toute matière est composée d'atomes (qui font éventuellement partie de molécules) et ces atomes ne sont jamais totalement fixes : ils vibrent et ces vibrations peuvent se transmettre de proche en proche aux atomes voisins et c'est ce phénomène qui correspond à un transfert de chaleur par conduction.

La conduction se définit par une transmission de chaleur de proche en proche dans un matériau comme le métal. En effet, les métaux sont de bons conducteurs de chaleur.

II.5.3 Transfert par rayonnement

Tout corps émet des rayonnements dont la fréquence (et donc l'énergie) dépend de la température de ce corps : ce phénomène est décrit par la loi de Wien. A température ambiante la majorité de ces rayonnements sont des infrarouges qui sont absorbés par la matière environnante et en convertis en chaleur.

Le rayonnement (de nature électromagnétique) peut se propager dans le vide. L'absorption par la matière peut ainsi donner lieu à des phénomènes thermiques. En effet, le rayonnement électromagnétique permet de chauffer les aliments par agitation thermique très grande qui donne une élévation de température.

II.6 Types des matériaux à changement de phase (MCP)

Les matériaux à changement de phase se divisent en trois types : organiques, inorganiques et eutectiques.[28]

II.6.1 Les MCP 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 MCP 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 plus part du temps et ils sont recyclables.[28]

II.6.2 Les MCP Inorganiques

Les matériaux ou les substances inorganiques ont une température ou une plage de températures de fusion comprise entre -100 °C et +1000°C. Les plus utilisés sont : l'eau (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'est-à-dire 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. [28]

II.6.3 Les MCP Eutectiques

Les MCP eutectiques sont des substances composées de plusieurs MCP purs. En général, ce sont des mélanges de MCP 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.

Tableau II.2 Avantages et inconvénients des MCP. [25]

| | Avantages | Inconvénients |
|---------------------|--|---|
| Organiques | <ul style="list-style-type: none"> -Pas de ségrégation de phase. -Sont chimiquement stables - La surfusion est négligeable. -Facilement incorporés aux systèmes de stockage de chaleur. - Sobriété écologiques. - 100% recyclables. - Peu sensible aux cycles de fusion/solidification. | <ul style="list-style-type: none"> -Faible conductivité thermique (0,18-0,25 W/m.K). -Dilatation volumique élevée. -Inflammables. -Coût élevé par rapport aux sels hydratés. |
| Inorganiques | <ul style="list-style-type: none"> -Disponibilité. -Grande chaleur de fusion. -Conductivité thermique élevée -Faible Dilatation volumique. - Bon marché. -Ininflammables. | <ul style="list-style-type: none"> -La ségrégation. -Perte d'efficacité liée aux cycles de fusion/solidification. - La surfusion. -La corrosivité. -Déshydratation liée aux cycles thermiques. |

Tableau II.3 : Propriétés thermiques de certains MCP. [28]

| Matériaux | | Température de fusion (°C) | Enthalpie de fusion (KJ/Kg) |
|------------------|--|----------------------------|-----------------------------|
| MCP Organiques | Eau | 0 | 333.6 |
| | Stéarate de butyle | 19 | 140 |
| | L'acide caprique-laurique | 21 | 143 |
| MCP Inorganiques | 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 Eutectiques | 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 |

II.7 Classes de MCP

Il y a plusieurs classes de MCP, les MCP les plus utilisés sont :

II.7.1 Matériaux à changement de phase à RT

Le stockage d'énergie thermique avec un matériau à RT absorbe une grande quantité de chaleur ; appelée chaleur latente, à une température relativement constante. Lorsque ce processus de changement de phase est inversé, c'est-à-dire du liquide à solide ; la chaleur latente précédemment stockée est libérée [29].



Figure II.4 : Matériau à changement de phase à RT.

II.7.2. Matériaux changement de phase SP

La création de la chaleur latente mêle SP a conduit d'une nouvelle et innovante Classe des MCP non inflammables. SP consiste en une composition unique d'hydrates de sel et de composés organiques qui rend vraiment le cycle stable sans détérioration au fil du temps [29].



Figure II.5 : matériau à changement de phase class SP.

II.8 Propriétés des matériaux à changement de phase

Un grand nombre de matériaux à changement de phase possède une température de fusion dans la gamme de température (0-120°C). Cependant, ils ne peuvent être utilisés comme matériaux de stockage que lorsqu'ils ont certaines propriétés thermodynamiques. [30]

II.8.1 Critères thermodynamiques

Le matériau à changement de phase doit avoir :

- Une température de fusion dans la gamme de température souhaitée;
- Une chaleur latente par unité de masse élevée (une petite quantité du matériau doit pouvoir emmagasiner une grande quantité de chaleur) ;
- Une chaleur spécifique élevée de sorte que le matériau puisse disposer d'une chaleur sensible significative ;
- Une fusion congruente ;
- Une petite augmentation de volume pendant la phase de transition. [30]

II.9 Les fonctionnalités [24]

L'utilisation des MCP s'articule principalement autour de trois fonctionnalités :

- La capacité de garder au froid
- La capacité de garder au chaud
- La capacité de stocker la chaleur

Comme nous l'avons vu, ces fonctionnalités reposent sur la faculté des MCP à stocker de l'énergie de manière latente. Lors d'une transition solide/liquide, les MCP vont utiliser la chaleur autour d'eux pour changer de phase, laissant la température stable aux alentours. Les forces des MCP et d'être disponibles dans de larges gammes de températures en fonction de l'application visée.

Exemple de l'eau :

Le changement de phase de l'eau a besoin de 333J/g et s'effectue de 0°C à 0°C. L'eau produite reste ainsi à 0°C tant que toute la glace n'a pas fondu, c'est le même principe qui est mis en œuvre pour les MCP. [24]

II.10 Les applications des MCP

Parmi les applications principales des matériaux à changement de phase [24] :

II.10.1 Le stockage de l'énergie thermique

Les MCP stockent l'énergie en changeant de phase solide à liquide, puis ils restituent la chaleur par le changement de phase liquide à solide. Le choix de MCP le plus approprié est fondé sur un certain nombre de facteurs, incluant le prix, la chaleur latente et la conductivité thermique tant sur les phases liquides que solides. Le MCP connu pour cette application est l'acétate de sodium tri-hydraté. Les cellules thermiques latentes utilisées pour stocker l'énergie sont également réalisées à partir de matériaux à changement de phase.



Figure II.6 accumulateur de chaleur solaire développé.

II .11 Les problèmes liés au changement de phase

II.11.1 La surfusion

Le graphe ci-après illustre l'évolution théorique de la température pendant le changement d'état lors de la décharge thermique.

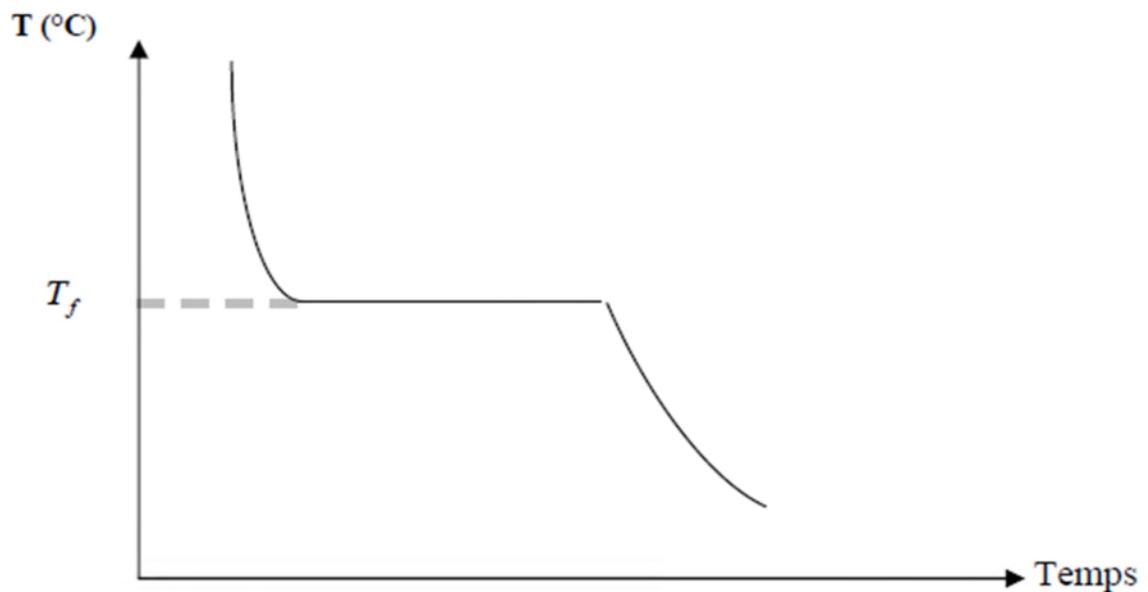


Figure II.7 Evolution théorique de T en fonction du temps. [25]

Dans la réalité, les courbes de solidification des corps ont souvent des allures plus ou moins différentes de cette courbe théorique du fait de la surfusion des composés utilisés.

Ce phénomène de surfusion est intimement lié à la cristallisation, c'est l'une des difficultés majeures affectant le stockage à chaleur latente. Physiquement, comprendre la surfusion revient

à comprendre les mécanismes qui font que lors du refroidissement d'un liquide, la solidification se fait en général en dessous de la température de changement de phase : le matériau peut rester liquide jusqu'à plusieurs dizaines de degrés en dessous de la température de fusion dans certains cas. Par contre, on n'observe jamais un solide pur au delà de la température de fusion. Il peut même arriver pour certains matériaux que la fusion se déclenche à une température T inférieure à T_f (T très proche de T_f); c'est le cas de certains matériaux comme les sels purs à fusion congruente. Dans ce cas, pour cristalliser sous une pression atmosphérique (pression constante), la température d'un matériau à changement de phase doit être abaissée jusqu'à une température inférieure à la température de solidification théorique T_f .

II.11.2 La corrosion

Le manque de stabilité à long-terme du système MCP-container a longtemps limité l'expansion de l'utilisation des stockages à chaleur à latente. Ce phénomène peut être dû à deux facteurs : le manque de stabilité chimique du matériau lui-même, et/ou la corrosion entre le MCP et le container. A ce sujet, les paraffines sont réputées pour la conservation de leurs propriétés thermiques au fil des cycles charge/décharge. En revanche, la nature ionique des sels hydratés cause des problèmes de corrosion avec les containers métalliques. [32]

II.11.3 La ségrégation

C'est un phénomène observé dans la plupart des matériaux à changement de phase. Dans le cas des sels hydratés à fusion non congruente (c'est à dire que la phase liquide est de la même composition que la phase solide), la solidification s'accompagne de la formation de deux phases (liquide et solide). La phase la plus dense, en général le solide, se dépose au fond du récipient: c'est la ségrégation des phases. Cette dernière rend difficile l'utilisation de ces composés pour un stockage à chaleur latente. Diverses méthodes peuvent être utilisées pour minimiser la ségrégation et stabiliser les composés.

- L'agitation : elle permet de rendre homogène le liquide de départ avant la solidification, elle n'est pas très pratique car c'est une méthode de laboratoire.
- La diminution des dimensions du récipient dans lequel le matériau est encapsulé car ceci confère au matériau une vitesse de refroidissement supérieure à la vitesse de décantation. L'application de cette méthode n'est cependant pas très réaliste dans le bâtiment. [25]

II.12 Transfert thermique dans le système PV / MCP

Le transfert de chaleur externe au système PV / MCP est présenté à la Fig. 1.

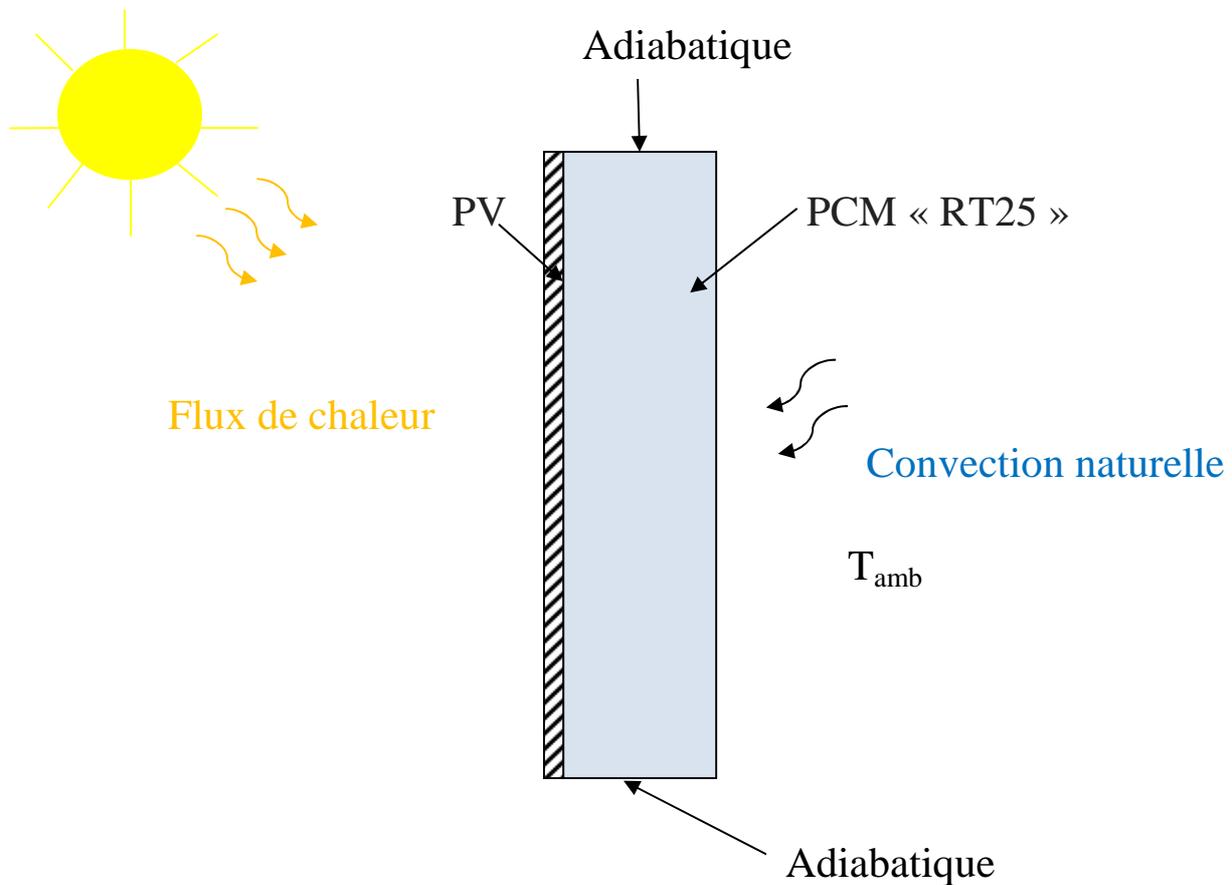


Figure II.8 schéma descriptif d'un système de refroidissement PV/MCP avec les conditions aux limites

L'énergie incidente I_T absorbée par le PV est transformée en chaleur peut être transférée au MCP dans le système PV / MCP. En supposant que la température initiale du PV : T_{PV} est la même que celle du MCP, et les coefficients de transfert de chaleur de l'avant et les surfaces arrière ont les valeurs fixes h_1 et h_2 , ainsi que dans le temps Δt le changement de température dans le MCP est de $T_{PV,t}$ à $T_{PV,t+\Delta t}$ et il n'y a pas de perte de chaleur de les limites adiabatique supérieure et inférieure du système. Le bilan énergétique d'un système lorsque le calcul température $T_{PV,t+\Delta t}$ est inférieur à la température de fusion de T_m est :

$$AI_T\Delta t = A(h_1 + h_2)(T_{PV,t} - T_{amb})\Delta t + (T_{PV,t+\Delta t} - T_{PV,t})\rho c_p \Delta x A \quad \text{II.1}$$

Où A est la surface, T_{amb} est la température ambiante. Lorsque la température calculée $T_{PV,t+\Delta t}$ est supérieur à T_m , l'énergie thermique est utilisée pour le changement de phase et la température dans le MCP reste constante à T_m jusqu'à ce que le changement de phase soit terminé *, c'est-à-dire l'énergie dans le MCP est plus grande que la chaleur latente de fusion H . Le temps total pour le changement de phase est $\sum \Delta t$. Le bilan énergétique pour le la transition de phase est :

$$* A I_T \sum \Delta t = A (h_1 + h_2)(T_m - T_{amb}) \sum \Delta t + H \Delta x A \quad \text{II.2}$$

Le modèle développé peut être utilisé pour prédire la distribution de la température transitoire et fluide champ d'écoulement dans une région bidimensionnelle dans le système PV / MCP pour différentes insolation, températures ambiantes, limite de transfert de chaleur convective et radiative conditions [42,43]. Les équations gouvernantes utilisées pour le système PV / MCP [44] avec l'incorporation de l'équation de continuité qui permet de conserver la quantité de masse : $\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$ II.3

Dans un système de coordonnées cartésiennes sont Les équations de quantité de mouvement: (équations de Navier-Stokes)

Suivant (ox)

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = \nabla(\mu \nabla u) - \frac{\partial p}{\partial x} + \beta(T - T_m) \quad \text{II.4}$$

Suivant (oy)

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = \nabla(\mu \nabla v) - \frac{\partial p}{\partial y} - \rho g \quad \text{II.5}$$

Avec : $\mu = \mu_s = \infty, \rho = \rho_s$ dans les régions solides du MCP

Et : $\mu = \mu_L, \rho = \rho_L$ dans les régions liquide du MCP

Le coefficient de dilatation thermique β pour inclure la flottabilité terme de force, selon l'approximation de Boussinesq:

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_m)] \quad \text{II.6}$$

Où ρ_0 est la masse volumique de référence et T_m est la fusion ou température de congélation.

Substituer ρ au dernier terme de l'équation (4) rendements

$$-\rho g = \rho_0 g [\beta(T - T_m) - 1] \quad \text{II.7}$$

L'équation de l'énergie :

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho u T - K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho v T - K \frac{\partial T}{\partial y} \right) = S \quad \text{II.8}$$

II.13 La relation entre le panneau photovoltaïque et les matériaux à changement de phase (MCP)

L'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) en vue du refroidissement des panneaux voltaïques a été l'une des importantes applications pour ces matériaux.

L'augmentation de la température des cellules photovoltaïques (PV) réduit leur efficacité, mais l'utilisation d'un matériau à changement de phase (MCP) intégré aux modules PV peut maintenir leurs températures proches de l'ambiance. Ce mémoire consiste à étudier l'utilisation d'un MCP dans la régulation thermique des modules PV et la variation de rayon dans chaque panneau photovoltaïque de 0 jusqu'à 40mm. Un modèle bidimensionnel de transfert de chaleur dans un système composé d'un MCP dans une enceinte rectangulaire attachée à un panneau PV a été utilisé pour résoudre les équations de Navier –Stokes et de l'énergie .

La régulation de la montée en température des PV basé sur l'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP), qui absorbent de l'énergie sous forme de chaleur latente à une température de transition de phase constante a été développée et utilisée récemment. Les MCP en phase de transition de phase solide-liquide à ou près de 26 °C peuvent absorber l'énergie thermique excédentaire au cours de changement de phase, qui, autrement, fait augmenter la température de fonctionnement du PV, et peuvent maintenir la température de fonctionnement de PV à ou près de 26 °C. [26]

II.14 Conclusion

Finalement on peut dire que l'étude du comportement énergétique et thermique de systèmes intégrant des MCP passe par la connaissance fine du processus de transition de phase. Il est donc indispensable de déterminer avec précision les caractéristiques thermo physiques. Les méthodes employées couramment, notamment la calorimétrie, n'étant pas toujours suffisamment exactes, nous travaillons à la caractérisation des MCP par des méthodes d'identification donnant des résultats plus conformes à la physique des changements de phases.

Le système de refroidissement ainsi proposé permet de dissiper la puissance générée par les sources de chaleur en l'emmagasinant dans le MCP. Cette chaleur stockée est transmise au MCP.

Chapitre III

Présentation de code de calculFluent 6.3

III.1 Introduction

La simulation se définit comme l'utilisation ou la résolution de modèles correspondant à un système donné pour étudier le comportement de ce dernier dans un contexte précis. Elle est la suite logique de la modélisation qui est la première approche d'une simulation.

La modélisation et la simulation interviennent pour :

- La compréhension de la structure et des interactions à l'intérieur d'un système (déterminer le rendement, la performance...)
- L'étude du comportement du système par rapport à son environnement extérieur (consommation énergétique/cout...)
- La prédiction du comportement d'un système pour des situations nouvelles ou extrêmes.
- La conception de nouveaux dispositifs / composants, étude de système (composant) avant la création de prototype et mise en œuvre de procédés nouveaux (stratégies et algorithmes de contrôle).
- L'optimisation des solutions lors de la conception.

La simulation se présente presque toujours sous forme d'un programme ou d'outils informatique.

III.2 Outil de simulation Gambit et fluent

III.2.1 L'outil Gambit

Gambit est un logiciel qui permet de créer des maillages pouvant être utilisés en particulier sous **Fluent**.

Le mailleur est un prétraitement au logiciel de simulation. Il permet de générer un maillage structuré ou non structuré en coordonnées cartésiennes, polaires, cylindriques ou axisymétriques. Il peut réaliser des maillages complexes en deux ou trois dimensions avec des mailles de type rectangle ou triangle.

III.2.2 Construction d'un maillage

Pour construire un maillage, il est bon de suivre la démarche suivante:

- définir la géométrie.
- réaliser le maillage.
- définir les paramètres des zones de calcul.

La géométrie comprend les positions physiques de points caractéristiques définissent la zone que l'on a à mailler: coordonnées spatiales des quatre sommets d'un carré; du point de départ et du point d'arrivée d'une ligne; du centre et de l'ouverture angulaire d'un arc de cercle. Il faut pouvoir représenter la zone à étudier par un ensemble de figures géométriques simples raccordées les unes aux autres.

Pour des maillages structurés, on peut faire la liaison entre la géométrie et le maillage, Aussi, avant de réaliser le maillage, il faut spécifier par écrit d'une part la géométrie adoptée pour définir la zone à mailler, d'autre part les numéros des mailles correspondant aux points caractéristiques de la géométrie. Un nœud pourra alors être repéré par ces coordonnées physiques x et y ou indices I et J.

Par ailleurs, il peut être avantageux de définir des points intermédiaires qui ne sont pas indispensables à la définition de la géométrie mais qui permettent de délimiter les zones dans lesquelles les mailles seront adaptées pour raffiner le maillage près des parois par exemple ou bien pour épouser au mieux la forme des obstacles, parois ou autres...

III.2.3 Notice d'utilisation de gambit

Ce logiciel est utilisé pour définir et créer le modèle d'étude (surface ou volume) et de le mailler suivant le bon vouloir de l'utilisateur. Les différentes étapes d'utilisation de GAMBIT sont définies dans la notice suivante. [37]

III.2.4 Démarrage de Gambit

Le chemin de l'application de Gambit est le suivant :

: /Fluent.Inc/ntbin/ntx86/Gambit.exe

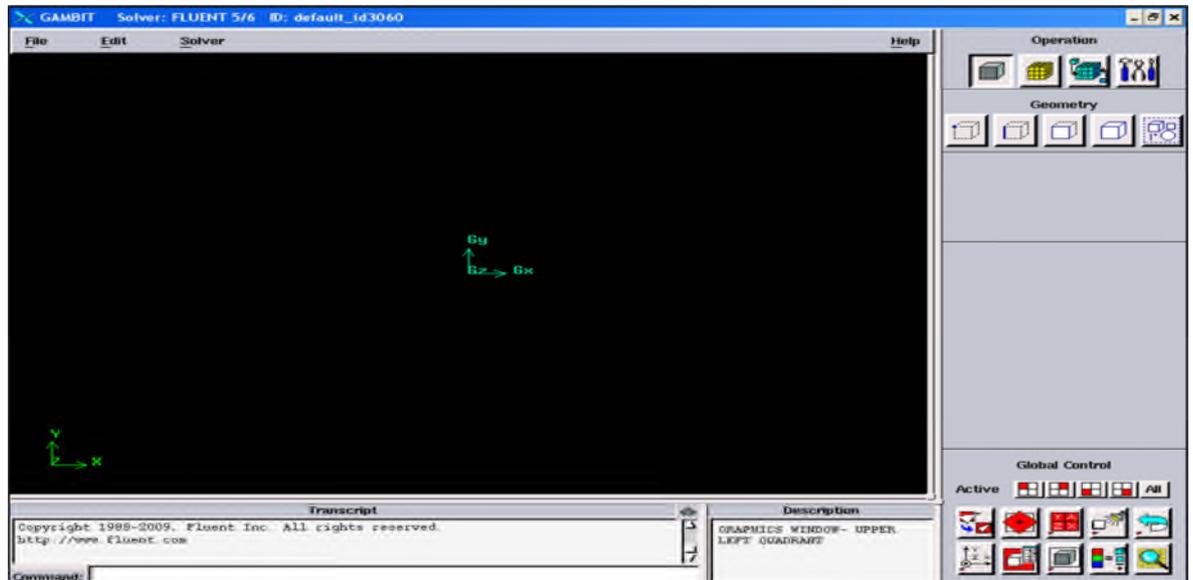


Figure III.1 Lancement du Gambit

Astuce : La première chose à faire quand on entre sur Gambit est de nommer le système qu'on va construire de telle manière de ne pas le perdre bêtement.

L'utilisation de Gambit est simple : principalement il faut prendre les menus en haut à droite et effectuer les tâches en partant du menu de gauche pour aller jusqu'à celui de droite (où normalement on doit avoir fini notre maillage).

III.2.5 Construction de la géométrie

La finalité de la construction de la géométrie est de définir les domaines de calcul qui seront des faces dans un problème 2D et des volumes dans un problème 3D.

Vient maintenant le moment de créer la géométrie à étudier.

Deux possibilités se présentent :

- Créer point par point (extrémités) le système, ligne, face, volume (conseillé pour des géométries complexes) ce qui est notre cas.

- Créer des surfaces simples existantes (cube, cylindre, sphère...) puis extruder pour obtenir les volumes ou les surfaces voulus.

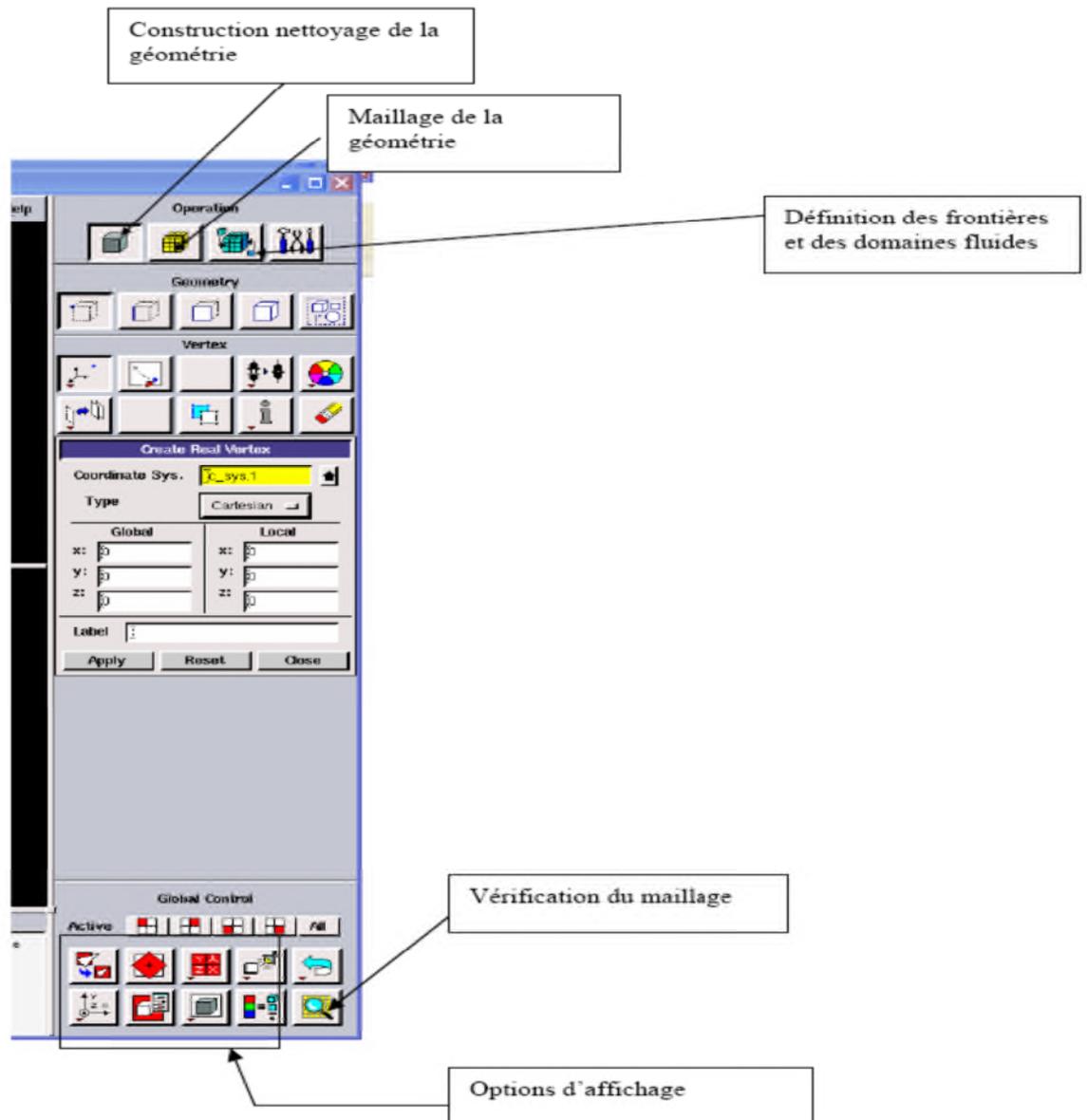
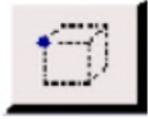
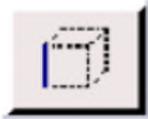
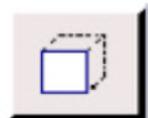
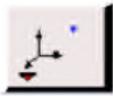
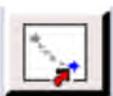
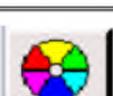


Figure III.2 Les opérations pour construire une géométrie

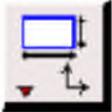
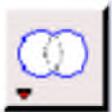
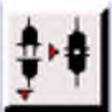
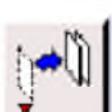
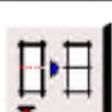
III.2.6 Commandes pour la construction de la géométrie

| <i>Symbole</i> | <i>Commande</i> |
|--|-----------------|
|  | Point |
|  | Segment |
|  | Face |
|  | Volume |
|  | Group |

III.2.7 Commandes d'un point

| <i>Symboles</i> | <i>Commande</i> | <i>Description</i> |
|---|--------------------------------|--|
|  | Créer point | Crée un point réel aux coordonnées spécifiées |
|  | Glisser un point virtuel | Change la position d'un point virtuel au long d'un segment ou d'une face |
|  | Connecter / séparer des points | Connecte des point réels ou virtuels/ sépare des points qui sont communs à deux ou plus d'une entités. |
|  | Modifier la couleur d'un point | Change la couleur d'un point |
|  | Déplacer/Copier un point | Déplace et/ou copie des points |

III.2.8 Commandes relatives à une face

| <i>Symboles</i> | <i>Commande</i> | <i>Description</i> |
|---|--|---|
|  | Former une face | Crée une face réelle à partir de segments existants |
|  | V. Créer une face | Créer une face à partir d'une forme primitive |
|  | Opérations booléennes | Union, soustraction et intersection de faces |
|  | Connecter / séparer des faces | Connecte des face réelles ou virtuelles/ sépare des faces qui sont communes à deux ou plus d'entités. |
|  | Modifier la couleur d'une face | Change la couleur d'une face |
|  | Déplacer/Copier une face | Déplace et/ou copie des faces |
|  | Split faces Merge faces | Fractionner ou merger des faces |
|  | Convertir des faces | Convertit les faces non réelles en faces réelles |
|  | Récapituler Contrôler des faces Rechercher des faces | Affiche les informations d'une face |
|  | Supprimer une face | Supprimer une face réelle ou virtuelle |

III.3 Maillage

La génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante dans une analyse CFD, vu l'influence de ses paramètres sur la solution calculée. Ce menu permet de mailler en particulier une ligne de la géométrie, à savoir disposer les nœuds avec des conditions particulière (utilisation d'un ratio pour modifier la pondération du maillage, application de formes différentes de maillage).[37]

III .3.1 Maillage structuré (quadra/hexa)

Il est beaucoup plus facile de le générer en utilisant une géométrie à multi bloc, il présente les avantages suivants :

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

Les inconvénients sont :

- Difficile à le générer dans le cas d'une géométrie complexe.
- Difficile d'obtenir une bonne qualité de maillage pour certaines géométries complexes.

III .3.2 Maillage non structuré (tri/tétra.)

Les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte quant à leur disposition.

Ses avantages :

- Peut être généré sur une géométrie complexe tout en gardant une bonne qualité des éléments.
- Les algorithmes de génération de ce type de maillage (tri/tétra) sont très automatisés.

Les inconvénients sont :

- Très gourmand en nombre de mailles comparativement au maillage structuré.
- Engendre des erreurs numériques (fausse diffusion) qui peuvent être plus importante si l'on compare avec le maillage structuré.

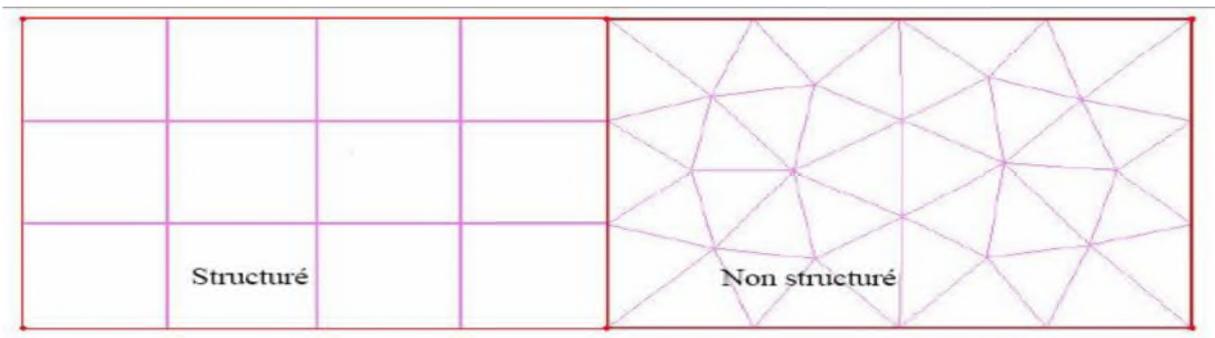


Figure III.3 : Maillage structuré et non structuré

III.3.3 Maillage hybride

Maillage généré par un mélange d'éléments de différents types, triangulaires ou quadrilatéraux en 2D, tétraédriques, prismatiques, ou pyramidaux en 3D.

Ses avantages :

- Combine entre les avantages du maillage structuré et ceux du maillage non structuré.

Pour notre étude, le maillage du domaine de calcul est un maillage structuré

III .3.4 Définition des frontières

Sélectionner dans le menu « Solver » le type du solveur « FLUENT6.3» puis définir les frontières.

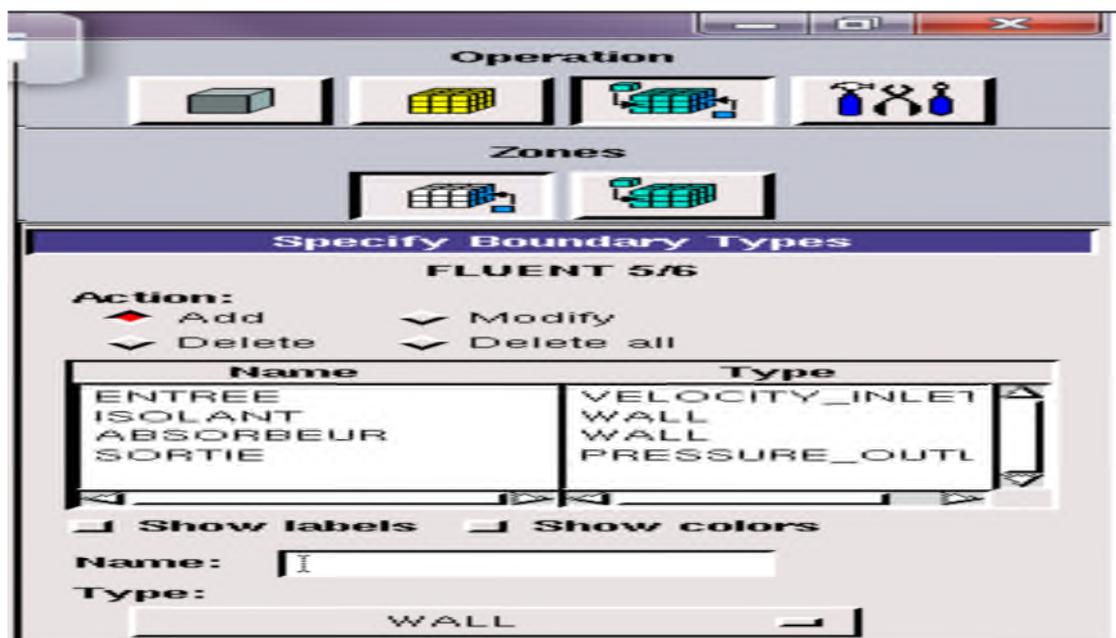


Figure III.4 Définition des frontières

III.3.5 Exportation du maillage de gambit

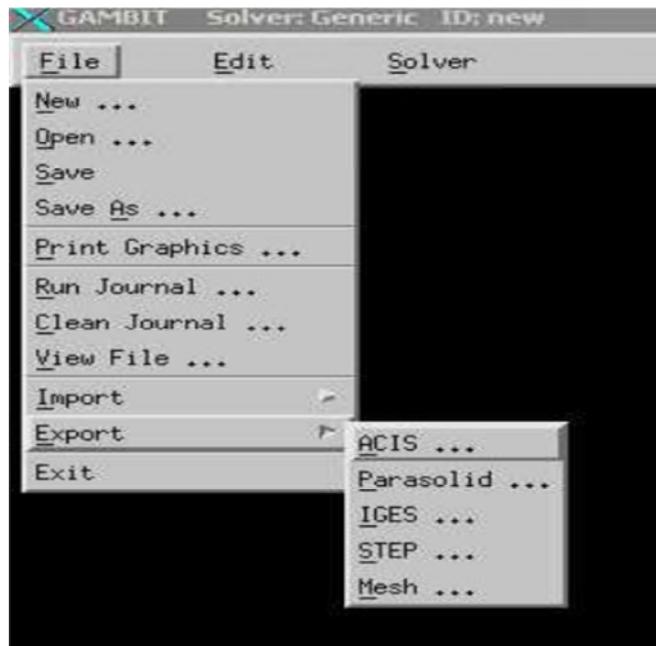


Figure III.5 Exportation du maillage.

Une fois que la géométrie a été créée, que les conditions aux limites ont été définies, il faut exporter le maillage, en point .msh (mesh = maillage en anglais) pour que Fluent soit capable de le lire et de l'utiliser.

On peut ensuite fermer Gambit en sauvegardant la session (si on souhaite l'ouvrir) et lancer Fluent.

III.4 L'outil Fluent

Il existe un certain nombre de codes industriels, aux maillages performants, permettant la prédiction d'écoulements de fluides comme le code (FLUENT)

La simulation en Mécanique des Fluides Numérique (Computational Fluid Dynamics : CFD), est utilisée pour la modélisation, la visualisation et l'analyse des écoulements fluides et transferts thermiques. Elle permet aux utilisateurs d'optimiser les performances des nouveaux concepts, tout en réduisant le cycle de commercialisation, les risques associés et les coûts. [38]

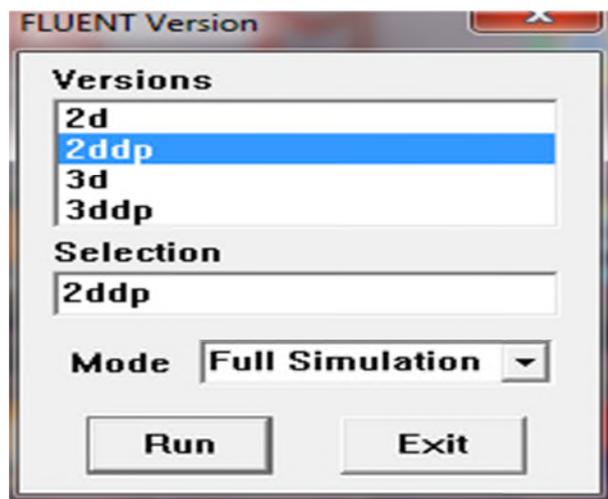
Depuis plus de 10 ans, Fluent, leader mondial en Simulation numérique des écoulements Fluides logiciels et services. S'emploie à offrir la solution de simulation la plus adaptée, que ce soit pour l'ensemble de l'industrie, la recherche ou la formation des

ingénieurs de demain. Cette solution passe par des services d'assistance technique, d'études à façon, et par des formations personnalisées.

au fur et à mesure. Nous trouvons donc l'option Models qui se décompose aussi en un autre menu. solver permet de choisir le type de solver que l'on souhaite utiliser (implicite, explicite, stationnaire, 2D...). viscous permet de choisir le modèle de turbulence que l'on va prendre pour résoudre le problème (laminaire, k- ϵ , k- ω , LES...). Energy permet de choisir si oui ou non on doit faire intervenir l'équation de l'énergie dans la résolution du système (dès qu'un gradient de température intervient dans les phénomènes il faut utiliser cette équation pour d'une part observer une solution réaliste mais aussi souvent pour faciliter la convergence).

III .4.1 Importation de la géométrie (*.msh)

A. Ouvrir la version de Fluent :



Pour commencer la simulation il faut importer le fichier (*.msh) généré sous Gambit.

File → Read → Cas

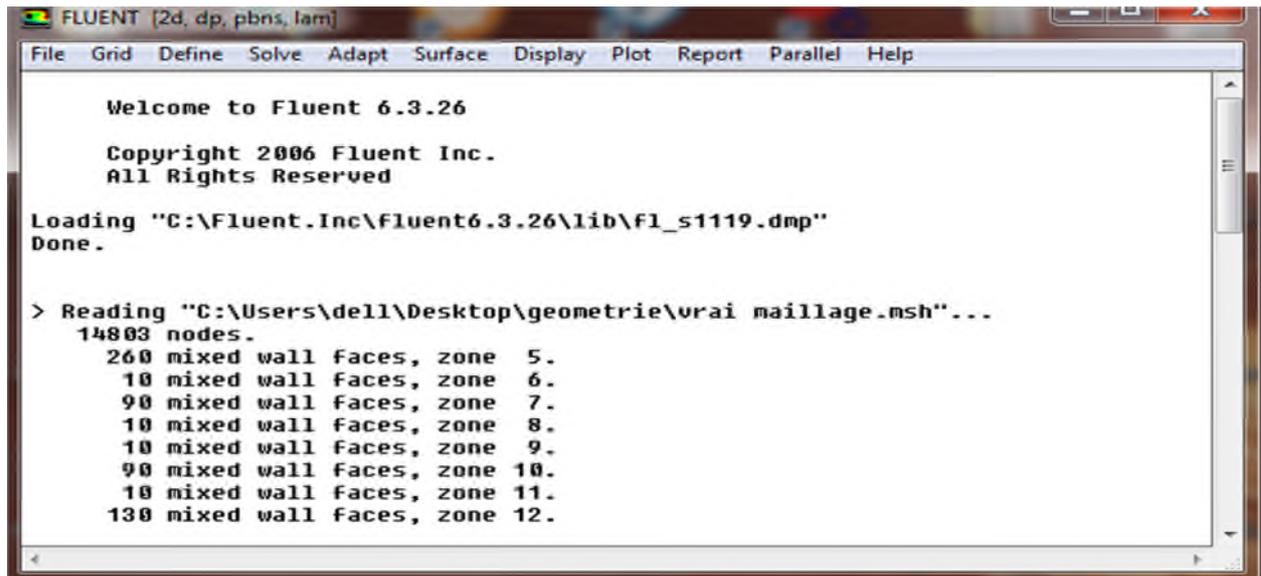


Figure III.6 Importation de la géométrie

B. Vérification du maillage importé :

Grid → Check

Ceci permet de vérifier si le maillage importé ne contient pas d'erreurs ou de volumes négatifs.

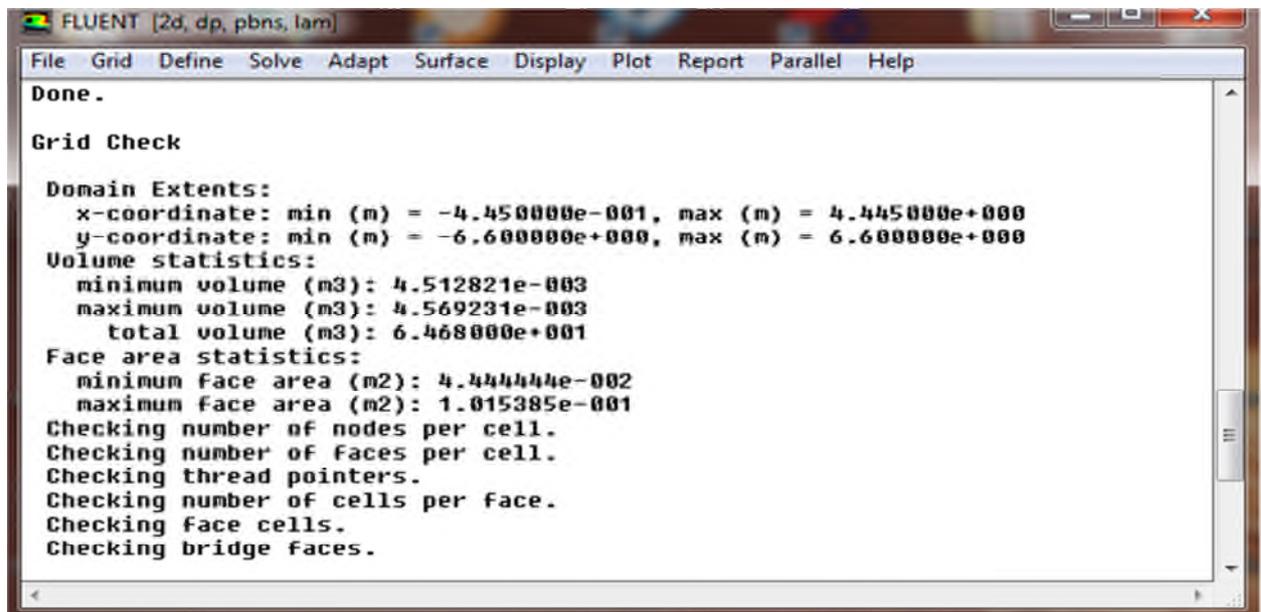


Figure III.7 Vérification du maillage sous Fluent

C. Vérification de l'échelle :

Grid → Scale

Il faut toujours vérifier que les dimensions affichées correspondent aux dimensions physiques du problème.

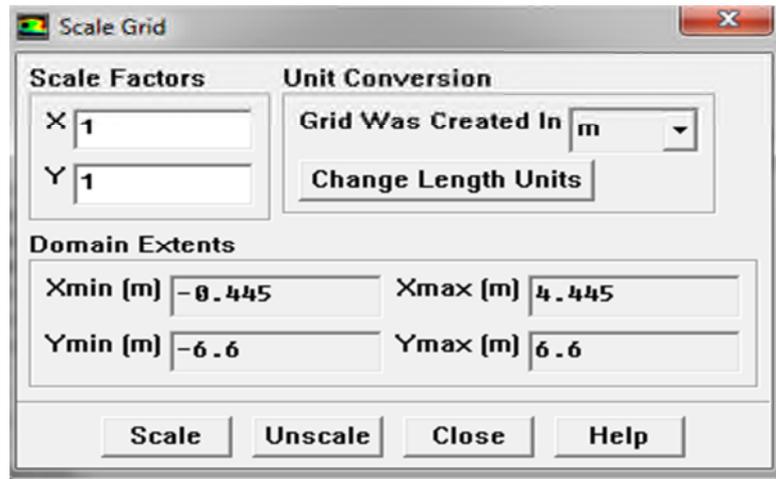


Figure III.8 Vérification des unités de la première simulation

D-Choix du solveur

Define → Models → solver...

- Segregated Solver : est le plus approprié pour les écoulements incompressibles (ventilateurs, pompes...)
- Coupled Solvers, les solveurs « coupled implicit » et « coupled explicit », sont plutôt réservés aux écoulements compressibles à grande vitesse.

C'est là aussi qu'on choisit le régime d'écoulement ; permanent ou instationnaire.

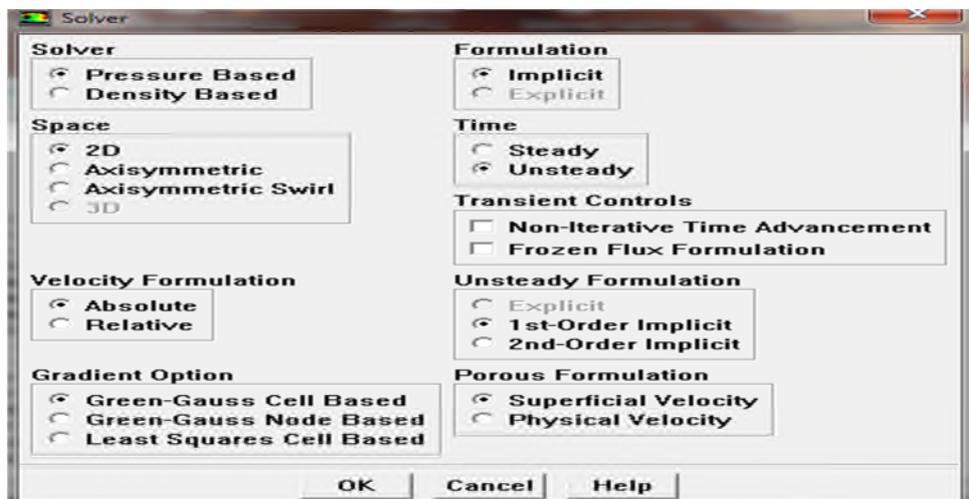


Figure III.9 Choix du solveur sous Fluent

E. Affichage de la grille

Display → Grid

Vous pouvez afficher le maillage et il est très judicieux de vérifier les conditions aux limites définies au préalable dans Gambit.

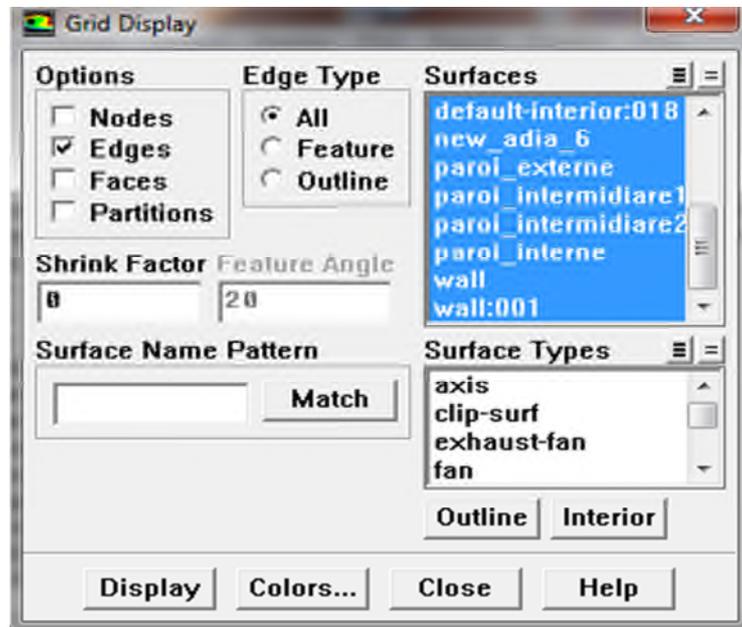


Figure III.10 Affichage de la grille et vérification des conditions.

Display → Grid → Display

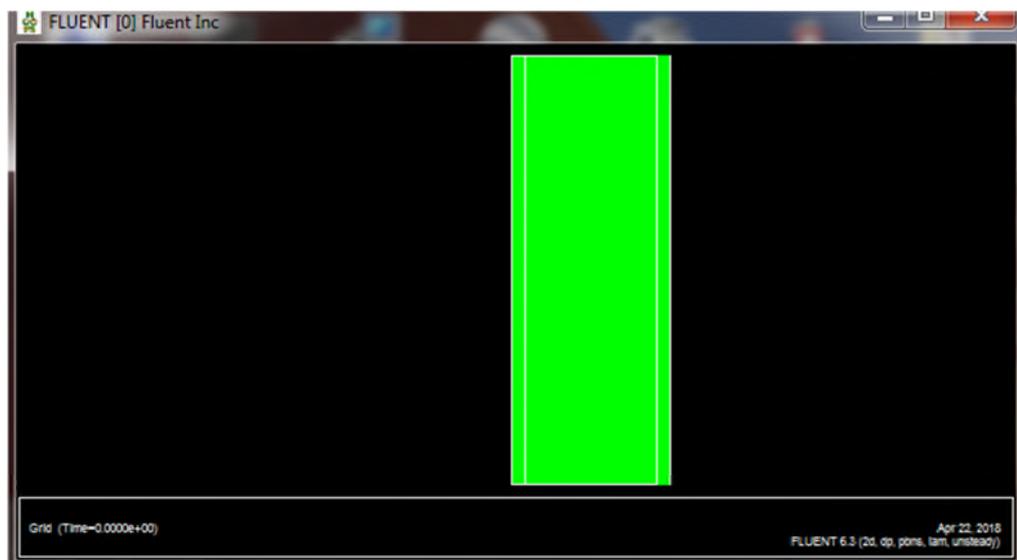


Figure III.11 La géométrie de panneau photovoltaïque avec le MCP

Definie → Models → energy

L'instruction énergie doit être activée pour l'étude du champ thermique.

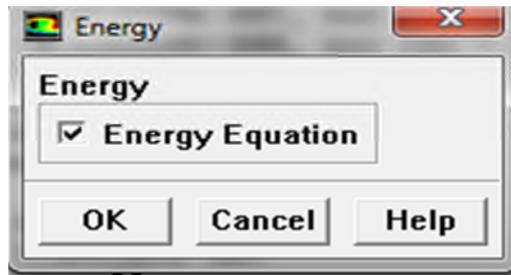


Figure III.12 établir les équations de l'énergie.

III.4.2 Choix du modèle de solidification et fusion

Definie → Models → Viscous

Fluent propose différentes modélisations de l'écoulement turbulent. Parmi lesquels les écoulements non visqueux, laminaires, turbulents ... etc.

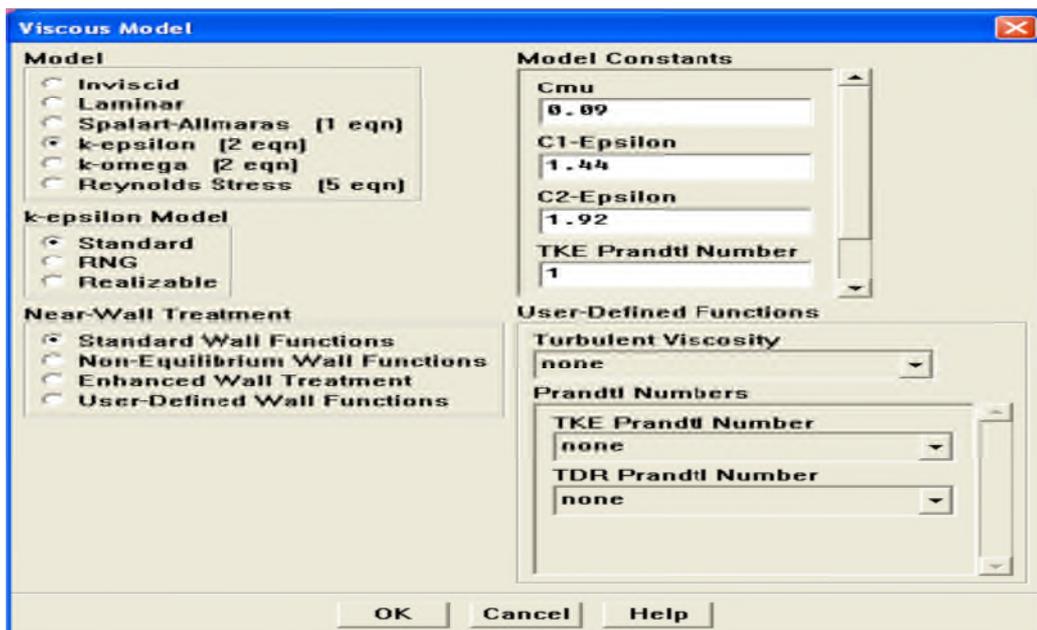


Figure III.13 Choix du modèle de turbulence

III.4.3 Définition des caractéristiques du fluide

Define → Materials

Les caractéristiques du fluide sont chargées à partir de la bibliothèque de données de Fluent.

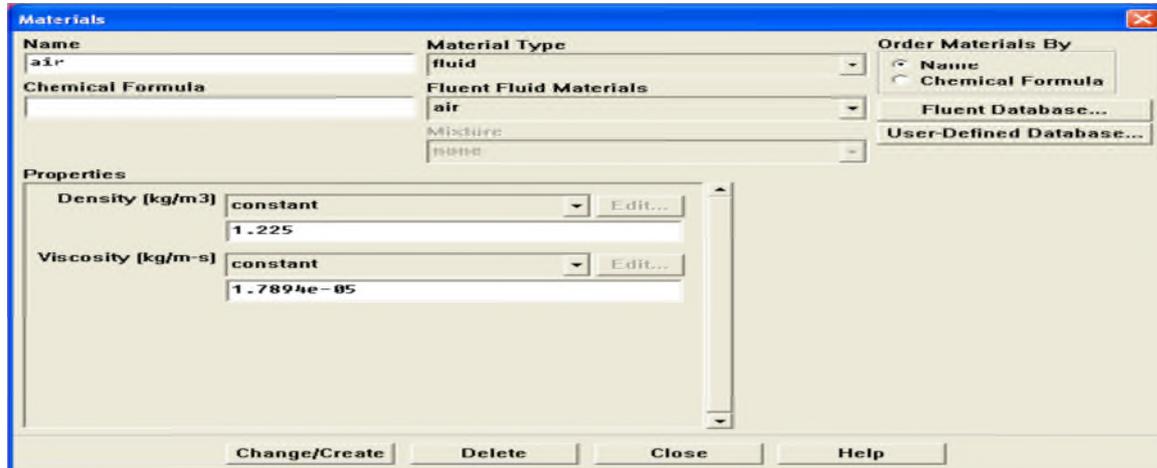


Figure III.14 Définition des caractéristiques du fluide

III.4.4 Conditions d'opération

Define → Operating conditions

Avant de choisir les conditions aux limites, il faut choisir d'abord la valeur de la pression de référence « operating conditions ».

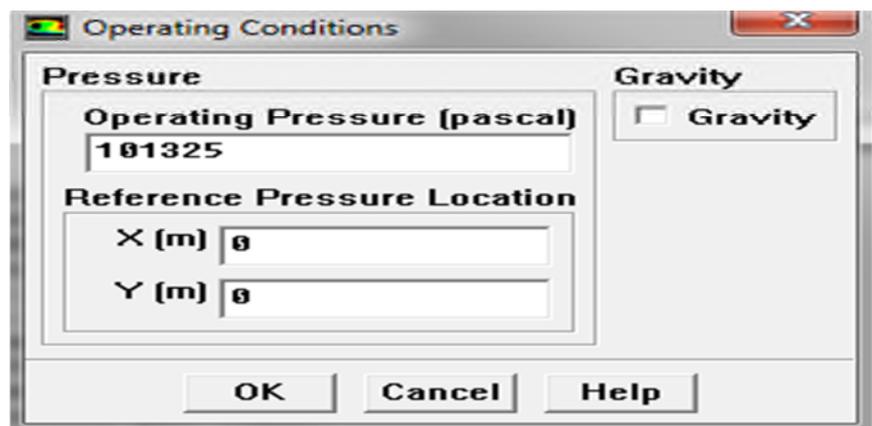


Figure III.15 Choix de la pression de référence

III.4.5 Conditions aux limites

Define → Boundary Conditions

Ensuite, il faut fixer les valeurs des conditions aux limites :

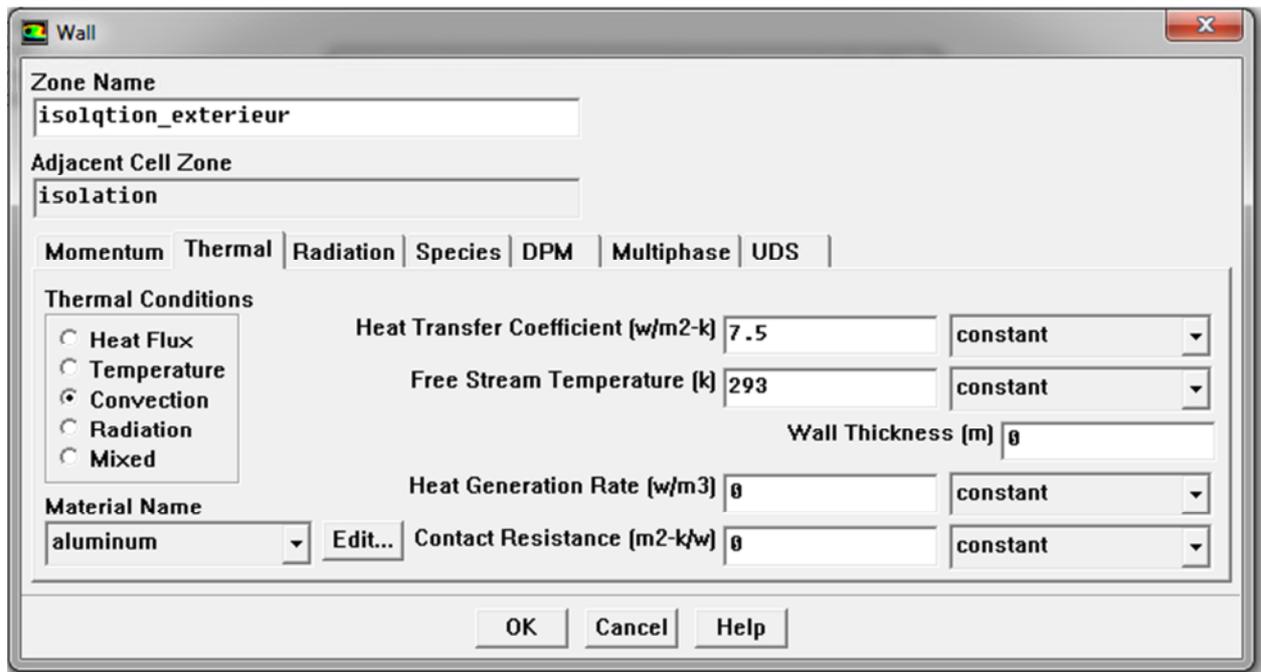


Figure III.16 Valeurs des conditions aux limites

Wall

Il est utilisé pour délimiter les régions solides des régions fluides.

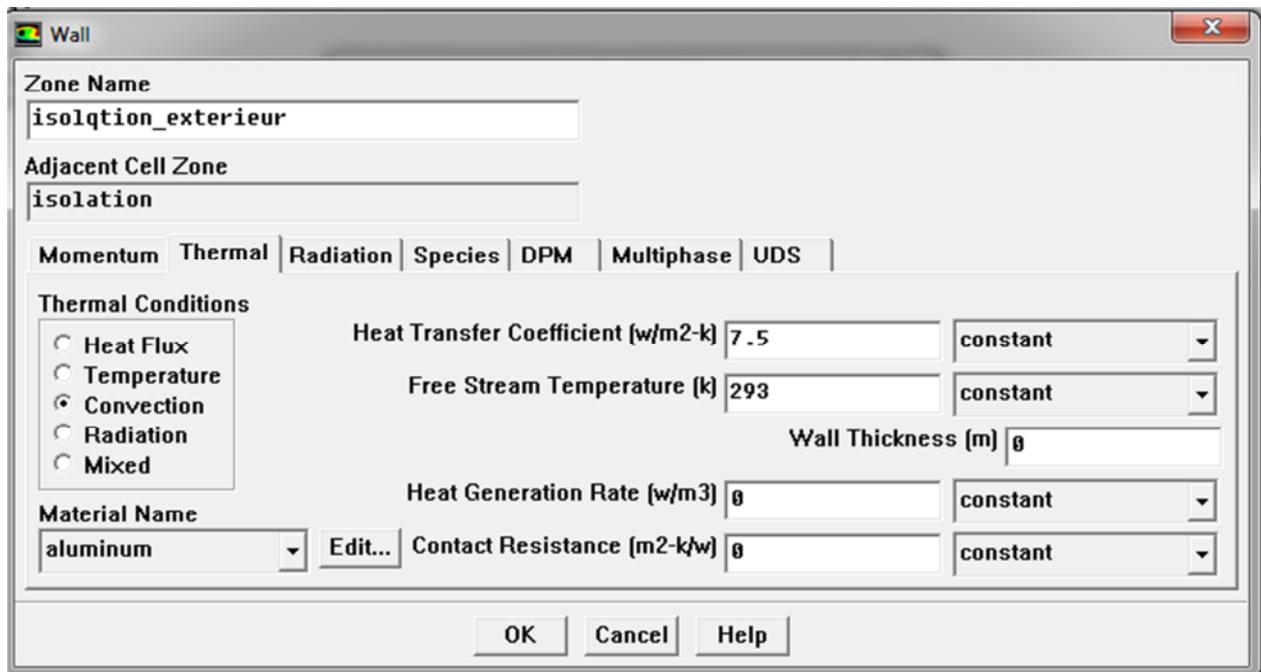


Figure III.18 Paroi orientée vers le nord

III.4.6 Choix d'ordre des équations et l'algorithme

Solve → Controls → Solution...

Ceci permet de spécifier le degré d'ordre des équations à résoudre, ainsi l'algorithme.

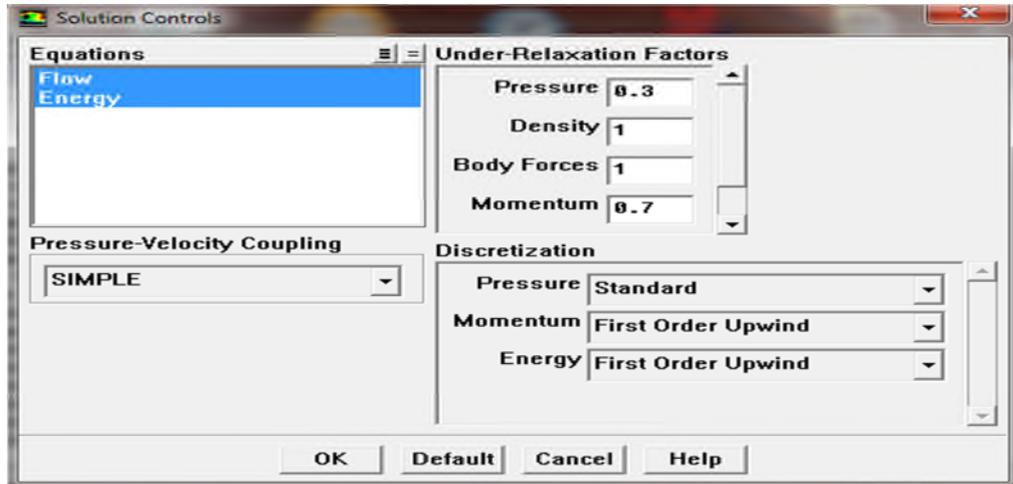


Figure III.19 Choix d'ordre des équations et l'algorithme

III .4.7 Initialization

Solve → Initialize → Initialize...

Cette fonction permet d'initialisé le calcul.

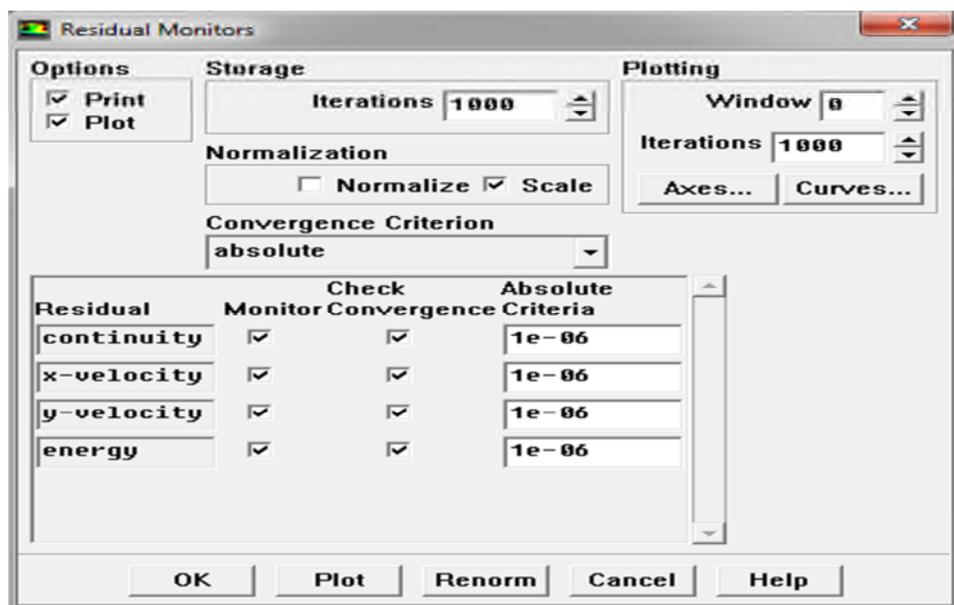


Figure III.20 Initialisation du calcul

III.4.8 Choix des critères de convergence

Solve → Monitors → Residual...

Il s'agit ici de choisir les critères qui doivent être vérifiés pour que les calculs de la simulation s'arrêtent.

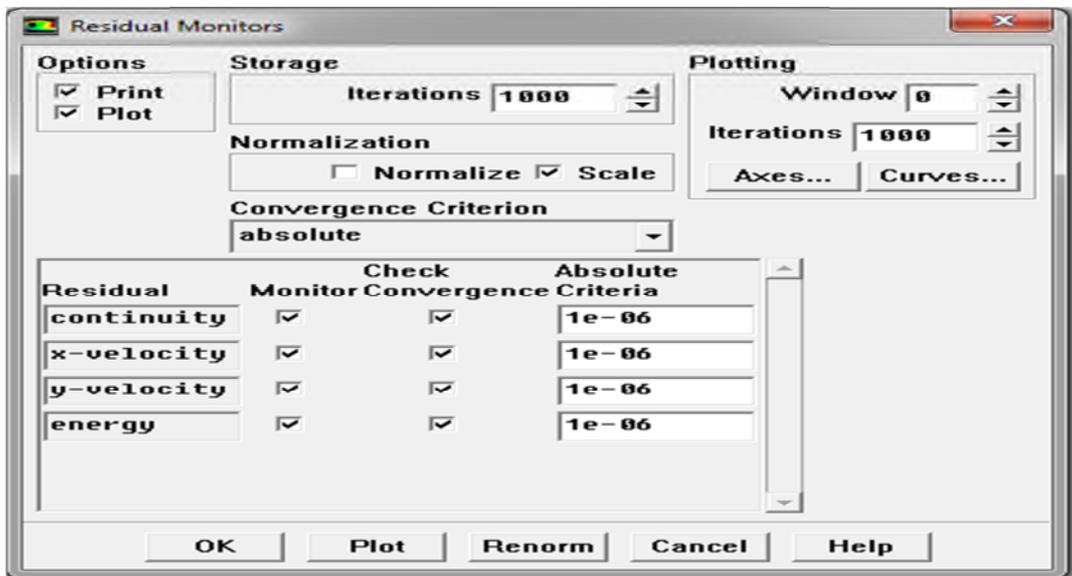


Figure III.21 Choix des critères de convergence

Pour afficher la convergence à l'écran pendant les calculs sous forme d'un graphe, il faut activer l'option Plot. Il est possible de désactiver certains critères d'arrêt de la simulation en décochant la case de convergence.

III.4.9 Lancement du calcul

Solve → Iterate...

Pour commencer les calculs il faut d'abord choisir le nombre des itérations.

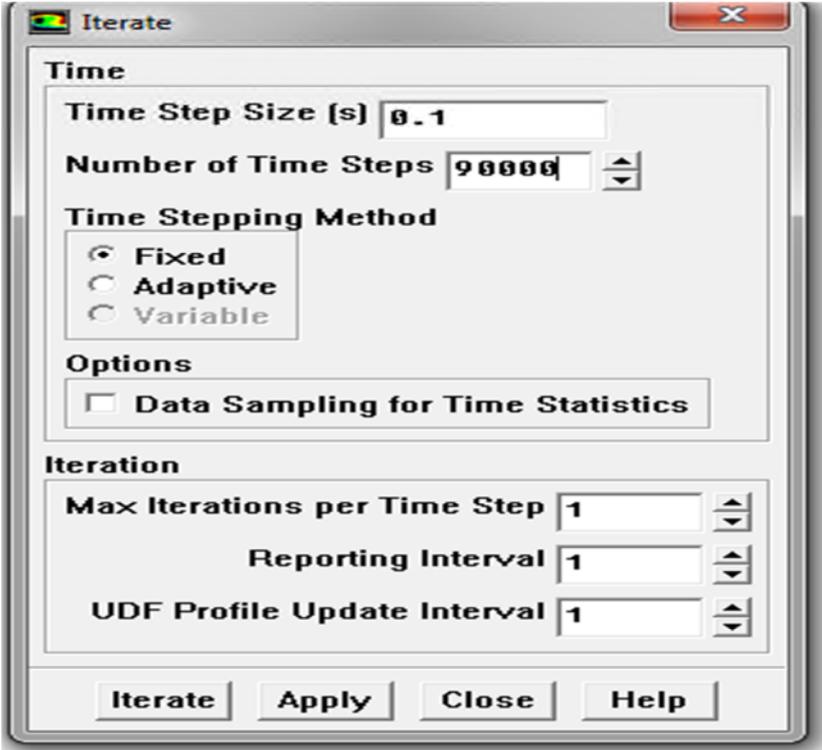


Figure III.22 Choix du nombre des itérations

Chapitre IV

Résultats et discussion

IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre notre travail consiste à simuler un panneau photovoltaïque (PV) rempli avec un matériau (MCP) sous le code de calcul Fluent. Le logiciel Fluent bien réputé et connu pour sa précision a donc été choisie pour faire l'étude numérique au sein d'un panneau photovoltaïque avec un matériaux à changement de phase qui ont le même maillage. la déférence entre eux c'est qu'ils n' ont pas la même géométrie, dimension, et conditions initiales et aux limites. Les résultats exposés dans ce chapitre sont issues de plusieurs simulations réalisées, représentant une étude complète de leurs comportements thermique pendant les déférentes phases de fonctionnement du système photovoltaïque.

La simulation numérique de la convection naturelle est réalisée dans une cavité bidimensionnelle remplie avec le MCP, à parois verticale d'un panneau photovoltaïque porté à la température 20°C ; les deux parois horizontales sont adiabatiques. Cette simulation, est réalisée à l'aide du code de calcul Fluent. La construction des géométries et leurs maillages sont faits à l'aide du logiciel Gambit. Les principaux résultats obtenus reflétant le comportement des champs dynamiques et thermiques dans la cavité, sont exposés dans ce chapitre.

IV.2 Mise en équations de la convection

Dans un processus de transfert de chaleur par convection, la résolution du problème passe d'abord par celle du phénomène du mouvement du fluide ; c'est pourquoi, le processus physique s'exprime du point de vue mathématique par un système d'équations relatives à l'écoulement (**équation de continuité**, de **Navier-Stockes** et d'**énergie**).

Dans le cas général, sous forme cartésienne, nous avons :

Equation de Continuité :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U) = 0 \quad \text{IV.1}$$

Equations d énergie :

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho u T - K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho v T - K \frac{\partial T}{\partial y} \right) = S \quad \text{IV.2}$$

Equation de Navier-Stokes :

Suivant (ox)

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = \nabla(\mu \nabla u) - \frac{\partial p}{\partial x} + \beta(T - T_m) \quad \text{IV.3}$$

Suivant (oy)

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = \nabla(\mu \nabla v) - \frac{\partial p}{\partial x} - \rho g \quad \text{IV.4}$$

L'approximation de Boussinesq:

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_m)] \quad \text{IV.5}$$

IV.3 Principes des codes CFD

Les codes **CFD (Computational Fluid Dynamics)**, permettent de résoudre numériquement les équations régissant les mouvements d'un fluide c'est-à-dire les équations, traduisent la conservation de la masse et de la quantité de mouvement du fluide (équations de Navier-Stokes), ainsi que la conservation de son enthalpie. Certains codes permettent également de décrire le transport de polluant ou les réactions chimiques au sein d'un fluide. Il existe un grand nombre de codes **CFD** disponibles, pour notre travail, nous avons choisi le code CFD **Fluent** (commercialisé par **Fluent Incorporated, version 6.3**), ce dernier permet en effet de répondre à nos besoins de calcul.

Pour construire, un modèle **CFD**, il y a plusieurs étapes :

- La construction de la géométrie
- La construction du maillage
- La sélection des modèles physiques: en fait, ce sont rarement les équations exactes de **Navier-Stokes** qui sont à l'origine des modèles **CFD** parce que la résolution des équations exactes serait trop coûteuse en temps de calcul comme c'est le cas pour la turbulence. Ce sont donc des équations approchées qui sont proposées pour décrire les phénomènes physiques et l'ensemble de ces équations constitue un 'modèle'.
 - La prescription des conditions aux limites.
 - La sélection de méthodes numériques pour obtenir une solution approchée
 - Le traitement des résultats.

IV.4 Etude comparative entre des différentes géométries à l'aide de code de champs Fluent

Nous avons effectué dans un premier temps une étude comparative entre les résultats numériques obtenus à l'aide du code CFD **Fluent** avec des différentes géométries obtenus.

IV.5 Cas de la géométrie simple

On va étudier la distribution de la température dans un panneau photovoltaïque avec un matériau à changement de phase (MCP) orienté dans le nord, une paroi extérieure menée d'une source de chaleur (soleil). Il s'agit d'étudier le transfert de chaleur par convection naturelle dans ce panneau. L'objectif de cette étude est la prédiction de la distribution de température dans un panneau à géométrie simple. Le choix de ce cas, est motivé par l'existence des données numériques permettant la validation des résultats obtenus dans notre travail.

IV.6 Description du phénomène

La configuration dans ce cas est un panneau photovoltaïque vertical en Aluminium avec un matériau de changement de phase à l'intérieur. Les phénomènes intervenant dans la thermique du panneau sont :

Les échanges convectifs:

- entre les parois et l'air intérieur, et entre les parois à et l'air extérieur.
- La réception du flux solaire incident.

Pour ce cas, nous avons une enceinte, de largeur $D = 40$ mm, et la hauteur $H = 132$ mm
L'épaisseur de Aluminium $x=4.5$ mm

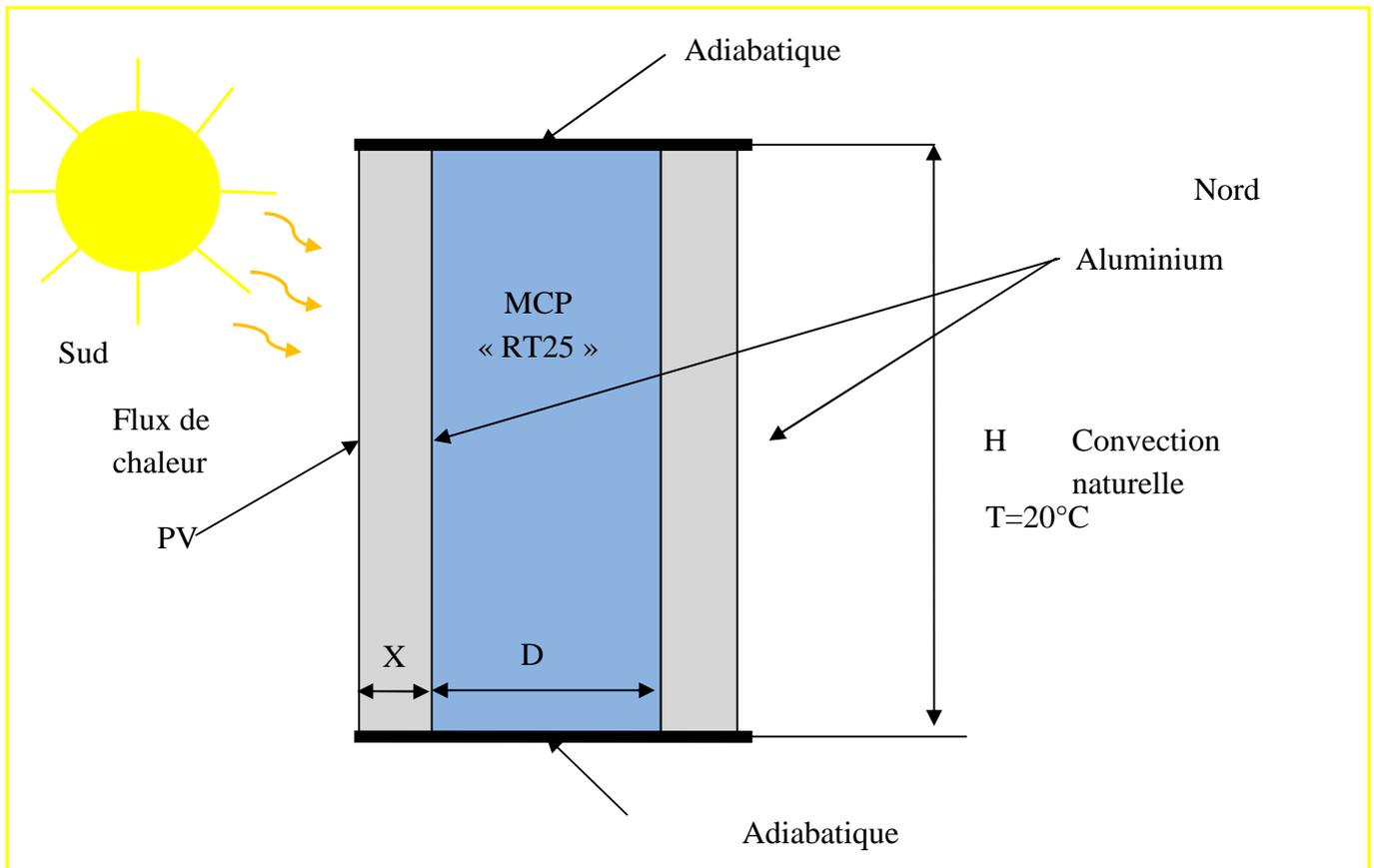


Figure IV. 1 schéma descriptif d'un système de refroidissement PV/MCP

IV.7 Les paramètres Géométriques

Tableau IV.1 Représente la configuration géométrique d'un système PV/PCM

| Système | Rayon d'incurvation R (mm) | Hauteur h (mm) | largeur D (mm) | L'épaisseur de l'Aluminium X (mm) |
|---------|----------------------------|----------------|----------------|-----------------------------------|
| PV/PCM | 0-20-40 | 132 | 40 | 4.5 |

IV.8 Les conditions aux limites

La résolution du système d'équations obtenu nécessite l'incorporation des conditions aux limites pour chaque variable dépendante. Les conditions de températures sont connues sur les parois de panneau. La paroi (Al) situé dans le coté de nord sont soumis à la convection naturelle avec le milieu extérieur. La paroi orientée vers le sud est considéré comme un isolant. La condition adiabatique est adoptée pour les parois inférieure et supérieure.

IV.8.1 Conditions initiales

Les conditions initiales sont choisies comme suit :

La température ambiante $T_{\text{amb}} = 293\text{k}$

La pression ambiante $P = 1 \text{ bar}$

La gravité $g = 9.81 \text{ m.s}^{-2}$

IV.8.2 Les propriétés thermo-physique de “RT25” et l’Aluminium

Les caractéristiques du fluide sont chargées à partir de la bibliothèque de données de Fluent.

Tableau IV.2 Les propriétés thermo-physique de “RT25” et l’Aluminium

| Propriété | Densité (Kg.m ⁻³) | La capacité thermique spécifique (J.m ⁻³ .K ⁻¹) | La conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹) | Température de fusion | La chaleur latente de fusion (J.Kg ⁻¹) | Facteur de dilatation |
|-----------|----------------------------------|---|--|-----------------------------|---|-----------------------------|
| MCP“RT25“ | 749 | 1,797,600 | 0.18 | 26.6 | 232,000 | 0 ,001 |
| Aluminium | 2675 | 2,415,525 | 211 | / | / | 0,001 |

IV.9 Géométries et maillage sous Gambit

Ce logiciel est utilisé pour définir et créer le domaine d’étude (surface ou volume) et de le mailler suivant le bon vouloir de l’utilisateur. La référence ^[45] donne plus de détails sur le **Gambit** et son utilisation. Dans ce chapitre, nous allons utiliser le code CFD **Fluent**, dans deux cas de configurations différentes. Dans chaque cas, nous allons détailler la géométrie du local, en suite le maillage de cette dernière, et puis citer les différentes conditions aux limites. L’une de ces configurations est donnée sur la Figure IV.

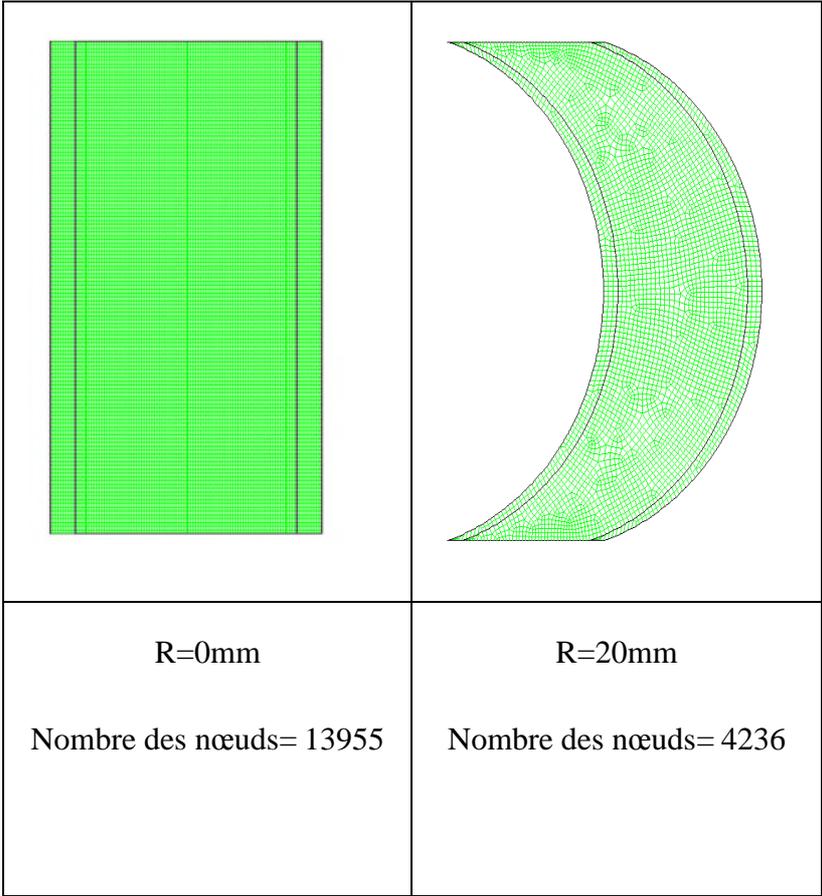


Figure IV.2 Maillage utilisé pour le système PV/MCP dans notre étude.

IV. 10 Comparaison des résultats

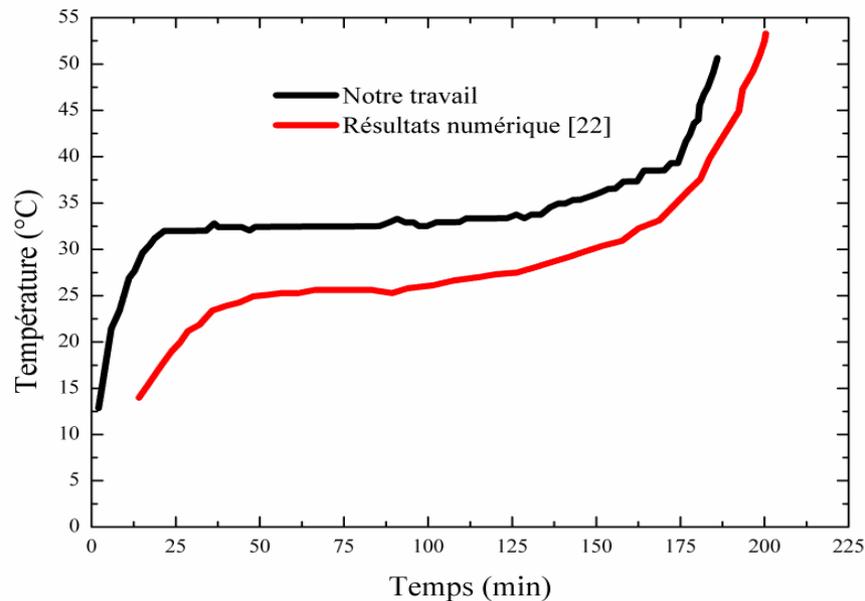


Figure IV. 3 : Comparaison entre nos résultats numériques actuels et ceux de [22] la température le long de la surface de PV en fonction du temps.

Nous avons renforcé notre simulation en la comparant avec celle de Belakam [22] on a tracé l'évolution temporelle de la température locale au niveau de la surface de PV sur la même échelle et le même graphique, telle qu'elle illustré dans la figure IV.3 on remarque que nos résultats montre un bon accord et que les deux graphes ont la même allure qui nous permettent de faire confiance à notre modèle numérique pour contribuer dans ce domaine.

IV.11 la variation de température en fonction du temps

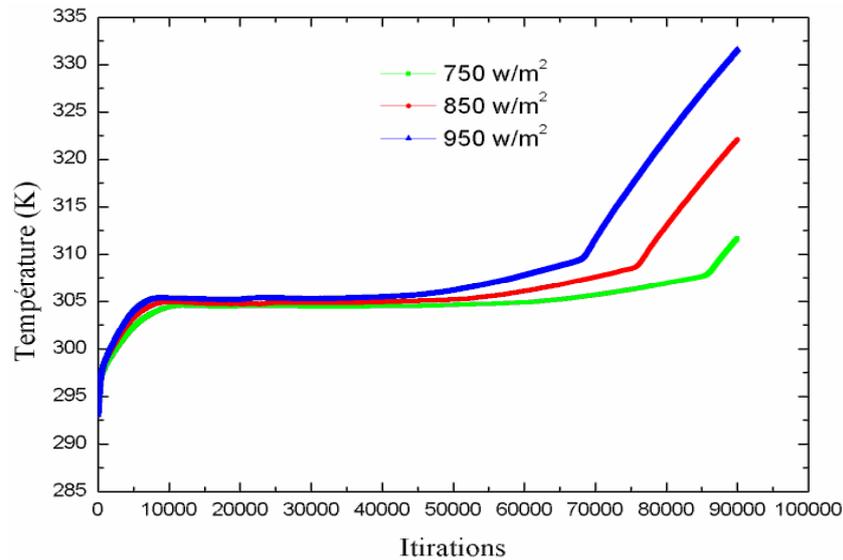
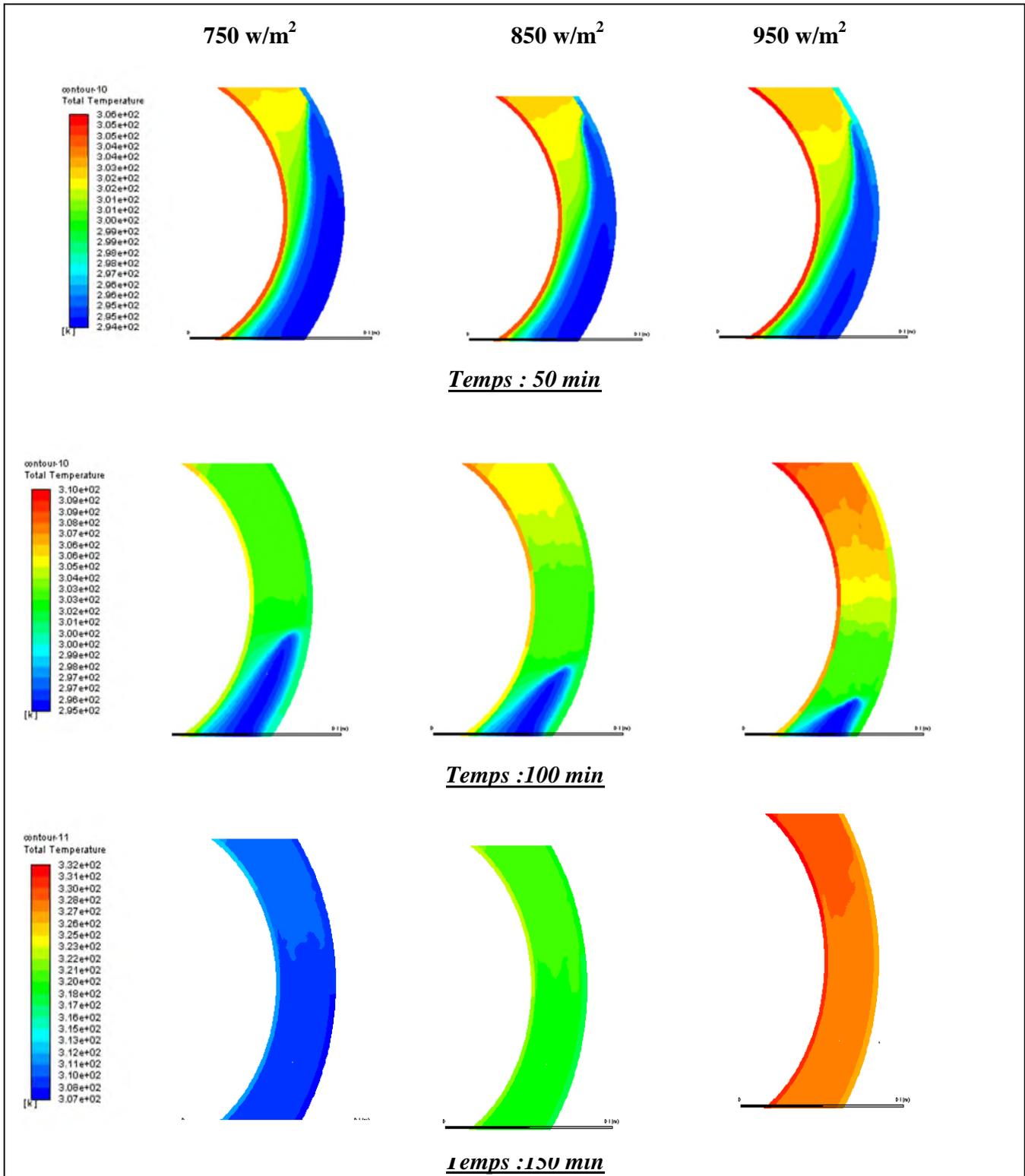


Figure IV.4 : Variation de température en fonction du temps pour des flux différents dans un panneau photovoltaïque de 40 mm.

La figure IV.4 montre la variation de la température en fonction du temps dans un panneau photovoltaïque de R=40 mm de courbure pour différentes valeurs de flux. On remarque que la température augmente rapidement pour les trois valeurs aux premiers temps qui est influé par l'augmentation de la température de MCP qui nous montre que la chaleur sensible a été absorbé par le MCP jusqu'à où le MCP atteint la température de fusion puis on remarque que la température est presque constante, le MCP commence à changer de son état physique (Chaleur Latente) pour une durée presque de 100 min où le fluide est fondu totalement et la figure nous montre que le PV qui est exposé au flux de 950 w/m² s'échauffe plus tôt que les autres qui nous explique que la fusion de MCP se faite rapidement et on remarque aussi un bon décalage de temps de fusion de MCP entre 950w/m² et 750 w/m² où l'intervalle de temps est de 30 min. Après la température augmente qui montre l'existence de la chaleur sensible.

IV.12 Contours de température dans le panneau photovoltaïque de rayon 40mm pour plusieurs valeurs de flux en fonction de temps



Figures IV.5 la variation de la température dans le panneau photovoltaïque de rayon 40mm pour plusieurs valeurs de flux en fonction de temps

La figure IV.5 montre la variation de la température dans le panneau photovoltaïque de rayon 40 mm pour plusieurs valeurs de flux en fonction de temps. On remarque que la température maximale située à la surface de PV et on remarque que la température varié de la haute zone de panneau vers la base zone, tel que la figure nous illustre que la température de PV est influe par l'état et la température de PCM et elle nous indique que le PCM se fond progressivement en fonction du temps où le PCM fondu se monte vers le haut.

Quand on augment le flux de chaleur on remarque que les zones chaudes augmente et les zones froides diminue.

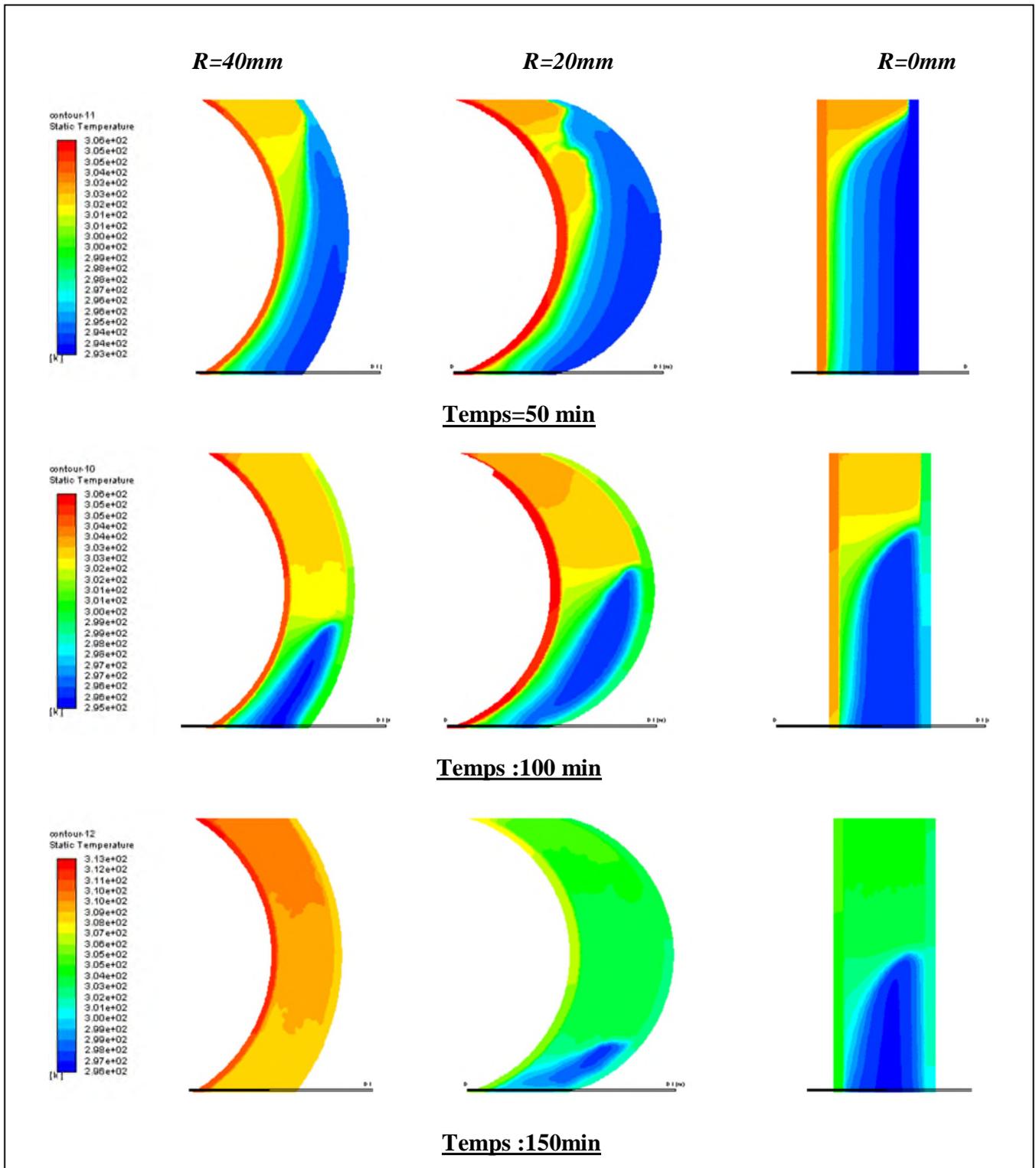


Figure IV. 6 la variation de la température dans le panneau photovoltaïque de différents rayons pour un flux constant en fonction de temps

La figure IV.6 montre les contours de la température dans des panneaux photovoltaïques de différents rayons de courbure pour un flux constant 750w/m^2 .

On remarque que les zones chaudes se localisent en haut ce que nous explique que la convection naturelle est dominante où le PCM moins dense se flotte.

La figure nous montre que le rayon de courbure influencé sur le champ de température où on voit que l'aire de la surface froide augmente lorsqu'on diminue le rayon de courbure pour les trois phases du temps, ainsi que on peut constater que la diminution des zones froides est en fonction du temps .

Conclusion générale :

Dans l'ensemble, l'élévation de la température des cellules photovoltaïques réduit l'efficacité de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, de sorte que de nombreuses recherches tentent de résoudre ce problème par plusieurs techniques. L'utilisation de panneaux photovoltaïques équipés de MCP est l'une des solutions prometteuses dans le futur, qui peut maintenir sa température pendant le changement de phase et améliorer son efficacité.

Un modèle bidimensionnel de transfert de chaleur a été développé avec succès en utilisant le code commercial FLUENT 6.3 pour étudier l'effet de la couche MCP sur la régulation thermique d'un panneau PV incurvé dans des conditions limites réalistes. Les simulations sont réalisées en faisant varier le rayon de la courbure du système PV / MCP comme mentionné ci-dessus. A la température ambiante de 20 ° C et sous l'ensoleillement de 750, 850, 950 W / m² la température de la face avant de toutes les configurations de systèmes PV / MCP a été maintenue inférieure à 20 ° C.

Les résultats obtenus par ailleurs montrent que la température des cellules PV augmente rapidement pour la forte courbure avec un rayon de 40 mm, en raison du taux de changement de phase très important. En outre, la forte courbure du panneau PV améliore l'absorption thermique et le transfert de chaleur a été dominé par la convection due à la grande quantité de MCP liquide. De tous les cas étudiés, nous remarquons que lorsque le MCP commence à fondre, le transfert de chaleur est dominé par la conduction. Dans le même temps, le MCP liquide proche de la surface frontale agit comme un matériau isolant en raison de sa faible conductivité thermique ($\lambda_{PCM} \approx 0,2 \text{ W/m.K}$). Nous remarquons que la température du panneau PV sur le dessus était plus élevée que le fond en raison de la distribution irrégulière de la température, donc pour un meilleur refroidissement du panneau PV, nous devons augmenter le transfert de chaleur par conduction à travers le MCP pour permettre à la surface de PV de perdre plus de chaleur.

Perceptives

Pour améliorer le refroidissement de PV on peut faire :

- Choisir un bon matériau à changement de phase PCM qui convient à la température donnée.
- Augmenter la quantité de PCM donc on augmente la largeur de l'espace où se trouve le PCM donc on peut jouer sur la largeur.
- Augmenter le transfert de chaleur par convection entre le PCM et l'ambiant qui va favoriser le refroidissement de PCM.

*Références
bibliographiques*

Les références bibliographiques

[1] : **K. Touafek**, « Etude d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique », mémoire de magister, école nationale polytechnique, Alger, 2005

[2] : **N. Oleksiy**, « Simulation, fabrication et analyse des cellules photovoltaïques à contacts arrières inter digités », thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005

[3]: **S. Alem-Boudjemline**, « Réalisation et caractérisation des cellules Photovoltaïques plastiques », thèse de doctorat, université d'Angers, 2004

[4]: **Z. Bendjellouli**, « Contribution a la modélisation d'une cellule solaire », mémoire de magister, université de Bechar, 2009

[5]: **S. Berson**, « Synthèse, caractérisation et nano structuration de dérivés du photo ,Poly thiophène pour des applications en cellules photovoltaïques organiques », thèse de doctorat, l'université Joseph Fourier – Grenoble I, 2007

[6] : **M.N.Mchalikh** et **CH.Hmada** « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque, en fonctionnement autonome et connecté au réseau » Mémoire de Master Université Kasdi Merbah–Ouargla 2013.

[7] : www.ryounes.net/cours/chapitre%203%20RN.pdf (dernier accès le 01/10/2010)

[8] : **P. Cheynet**, « Etude de la robustesse du contrôle intelligent face aux fautes induites par les radiations », thèse de doctorat, l'institut national polytechnique de Grenoble, 1999

[9] : **M. Y. Ammar**, « Mise en œuvre de réseaux de neurones pour la modélisation de, Cinétiques réactionnelles en vue de la transposition batch/continu », thèse de doctorat, L'institut national polytechnique de Toulouse, 2007

[10] : **M.Blhadj** « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome » Mémoire de Magister Centre Universitaire de Bechar 2007-2008.

[11]: **I.Bendjamaa** « Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque »

Mémoire de Magister Université Abou-Baker Blkaid-Tlemcen 2011/2012

[12]: **M.L.Louazane** « Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque Sur le site de Ouargla »Mémoire de Magister Université El Hadj Lakhdar-Batna 16/06/2008

[13]: **N. Kabouch**, « Optimisation d'un système photovoltaïque application a la protection cathodique », mémoire de magister, université de la science et de la technologie Hourii Boumediene (USTHB), Alger, 2009

[14]: **T. Desrus**, « Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière », thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2009

[15]: **F. Boukhtouche Cherfa**, « Etude et réalisation d'une centrale Photovoltaïque connectée au réseau de distribution électrique BT », mémoire de magister, école nationale polytechnique, Alger, 2004

[16] : **A. Labouret** et **M. Viloz**, « Energie solaire photovoltaïque », DUNOD, 3eme Edition, ISBN: 2-10-049945-9, France.

[17] : **A. Bouden**, « *Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque* », mémoire de magister, université de Constantine, 2008

[18] : www.dmseducation.com

[19] : **G. Dreyfus**, « Les réseaux de neurones », Mécanique Industrielle et Matériaux, n°51, École supérieure de physique et de chimie industrielles de la Ville de P Paris (ESPCI), Laboratoire d'électronique, Paris, 1998

[20]: **Y. Pankow**, « Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse Tension. Application au générateur photovoltaïque », thèse de doctorat, centre nationale de recherche technologique de Lille, 2004

[21]: **M. Djarallah**, « Contribution a l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couples au réseau électrique », thèse de doctorat, université de Batna, 2008

[22]: **K. Touaille** et **al.** « Simulation numérique du comportement thermique du capteur-Hybride solaire photovoltaïque thermique », Revue des Energies Renouvelables, centre de développement des énergies renouvelables (CDER), Alger, Vol. 11, N°1, pp. 153 – 165, 2008

[23]: **Bourguiba.J** et **Bekkouche.I** « simulation numérique du stockage de l'énergie solaire par chaleur latente ».Mémoire de master, Université Abou Baker Belkaid Tlemcen, 2013.

[24]: Article SB-Scirbus-PCM-EEN-V10-1

[25]: **Cheik SECK** « analyse et modélisation du comportement thermique d'un système de préchauffage d'air neuf pour l'habitat » intégrant un matériau à changement de phase, université d'Artois.

[26]: **Neheri.T** « Etude du refroidissement des cellules photovoltaïques par un matériau à changement de phase ». Thèse Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, 2016.

[27]: <https://www.abcclim.net> > Comment ça marche > Le principe du froid.

[28]: **Serge Blaise EKOMY ANGO** « Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase ». L'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2011.

[29]: **Saib Hind**, Etude de simulation des phénomènes de transfert thermique lors de la solidification d'alliages, mémoire de magister 2009.

[30]: **Amina Akrouche** « Etude de stockage et déstockage d'énergie dans un Matériau à Changement de Phase », Université de Pau des pays de l'Adour 2010_2011.

[31]: **Raj V. A. A.&Velraj R (2010)**.«Review on free cooling of buildings using phase change materials».Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.14, N°9, pp. 2819-2829

[32]: **Stéphanie HONGOIS (Ingénieur)** « Stockage de chaleur inter-saisonnier par voie thermochimique pour le chauffage solaire de la maison individuelle », L'institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1^{er} avril 2011.

[33]: **Pierre Pardo .M** « Développement d'un procédé de stockage d'énergie thermique haute température par voie thermochimique ». Thèse Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2013.

[34]: **Huang.M** « L'application de CFD pour prédire la performance thermique des matériaux à changement de phase pour le contrôle de la température des cellules photovoltaïques dans les bâtiments, Ph.D. Thèse », Université d'Ulster, Royaume-Uni, 2002

[35]: **Huang.M, P.C. Eames, B. Norton**, « L'application de la dynamique des fluides computationnelle pour prédire la performance des matériaux à changement de phase pour le contrôle de la température des cellules photovoltaïques dans les bâtiments, dans: Actes du VI^e Congrès mondial sur l'énergie renouvelable », juillet, Brighton, Royaume-Uni, 2000 -2126.

[36]: S.V. Patankar, transfert de chaleur numérique et flux de fluide, Hemisphere Publishing Corporation, London, 1980.

[37]: D.Fedala, 2007.Manuel de maillage sous Gambit et de simulation sous Fluent applications, laboratoire d'énergétique et de Mécanique des Fluides Interne ENSAM, CER de paris.

[38]: [http://my.fit.edu/itresources/manuals/fluent6.3/help/html/ug/node568.htm#se_c-hxfer theory](http://my.fit.edu/itresources/manuals/fluent6.3/help/html/ug/node568.htm#se_c-hxfer_theory).

Résumé

Résumé

Le but de ce travail était d'étudier l'utilisation d'un matériau à changement de phase (MCP) lié à un panneau photovoltaïque courbe (PV) afin d'améliorer sa performance de régulation thermique et de limiter l'élévation de température sur sa face avant, Un modèle de transfert de chaleur à volume fini implicite à deux dimensions a été utilisé pour résoudre des équations de Navier-Stokes et d'énergie instationnaires avec le code commercial FLUENT 6.3 Cependant, pour améliorer les performances thermiques de ce panneau PV incurvé, nous avons varié le rayon de courbure jusqu'à ce que le panneau PV soit aplati. Pour la validation, les contours isothermes et l'évolution temporelle de la température sont comparés aux données de la littérature.

Les résultats montrent que la température des cellules photovoltaïques augmente pour les courbures élevées mais que les plus basses n'ont plus d'influence sur celle-ci plus tard, tandis que l'ajout de MCP derrière le panneau PV peut maintenir sa température.

Mots-clés Matériau à changement de phase; Chaleur latente; Régulation thermique ; Cellule photovoltaïque

Abstract

The aim of this work was to study the use of a phase change materials (PCM) linked to a curved photovoltaic (PV) panel in order to enhance its thermal regulation performance and to limit the temperature rise on its front surface. A two-dimensional implicit finite volume heat transfer model was used to solve an unsteady Navier–Stokes and energy equations with commercial code FLUENT 6.3. However, to improve the thermal performance of this curved PV panel, we varied the radius of curvature until flattening the PV panel. For the validation, an isothermals contours and time evolution of temperature are compared with literature's data. Results show that the temperature of PV cells increase for the high curvatures but the lowest ones have no more influence on this later, while the addition of PCM behind the PV panel can maintain its temperature

Keywords Phase change material; Latent heat; Thermal regulation; Photovoltaic cell.

ملخص

كان الهدف من هذا العمل هو دراسة استخدام مواد تغيير الطور (PCM) المرتبطة بلوحة كهروضوئية منحنية من أجل تحسين أداء التنظيم الحراري والحد من ارتفاع درجة الحرارة على سطحه الأمامي. تم استخدام نموذج نقل حراري محدود الحجم ثنائي الأبعاد لحل معادلة Navier – Stokes غير المستقرة ومعادلات الطاقة مع الرمز التجاري FLUENT 6.3. ومع ذلك لتحسين الأداء الحراري لهذه اللوحة الكهروضوئية المنحنية ، قمنا بتغيير نصف قطر الانحناء حتى استواء الألواح الكهروضوئية. للتحقق من صحة ، تتم مقارنة معالم متساوية الحرارة وتطور درجة الحرارة مع بيانات الأدب. تشير النتائج إلى أن درجة حرارة الخلايا الكهروضوئية تزداد بالنسبة إلى الانحناءات العالية ، ولكن أقلها لا يكون لها تأثير إضافي على ذلك لاحقاً ، في حين أن إضافة PCM خلف اللوحة الكهروضوئية يمكن أن تحافظ على درجة حرارتها.