

---

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



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

## Conception d'un système de refroidissement pour un convertisseur électrique solaire

### Présenté Par :

- 1) IGHMOUR Zakaria
- 2) MILOUDI Mohammed Abderaouf

### Devant les jurys composés de :

Dr. BELOUFA Mohamed Amine	Président
Dr. CHERIET Nour EL Houda	Examineur
Pr. NEHARI Driss	Encadrant
Dr BEKRAOUI Hafsa	Co-Encadrante

Année Universitaire 2023/2024

---



## *Remerciement*

Avant tout développement sur cette thèse je tiens à remercier Allah le tout puissant pour la patience, l'aide et la ténacité qui ma donner et avoir permis de réaliser ce mémoire. Je tiens tout d'abord à remercier beaucoup monsieur NEHARI DRISS pour sa grande disponibilité et ses précieux conseils. J'exprime mes sincères remerciements à tous mes professeurs de l'université pour leurs conseils. Mes remerciements vont enfin à toute personne ayant Contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

## Dédicaces

*À qui puis-je dédier cet humble travail si ce n'est à ma très chère*

*Maman et Papa,*

*Dont le Sacrifice, la tendresse, l'amour, la patience, le soutien, l'aide et les  
encouragements Sont l'essence de ma réussite. Sans elle,*

*Je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui.*

*Je dédie ce travail également :*

*À mes très chères sœurs*

*À toute la famille*

*À mes chers amis*

*À mon cher ami Zakaria*

*À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste*

*Travail*

*M. Rgouf*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à*

*Mes chers parents*

*« Ma mère et mon père » qui m'ont poussé de terminer mes études qui m'ont*

*Tellement encouragé*

*À mon frère « Yasser »*

*À mes sœurs*

*À mon binôme « Raouf »*

*Et tout ma famille son exception*

*Et tous qui ma aider dans ma vie*

*J. Zakaria*

## Résumé :

La conception d'un système de refroidissement pour un convertisseur électrique solaire est cruciale pour assurer son efficacité et sa durabilité. Ce mémoire explore les différentes stratégies et technologies disponibles pour maintenir les températures de fonctionnement optimales des composants électroniques dans un environnement solaire. Il aborde des aspects tels que la dissipation thermique, le choix des matériaux, les méthodes de refroidissement actif ou passif, ainsi que les considérations de conception pour maximiser l'efficacité énergétique du système tout en assurant sa fiabilité à long terme.

---

## ملخص :

يُعد تصميم نظام تبريد لمحول كهربائي شمسي أمر بالغ الأهمية لضمان كفاءته واستدامته. تستعرض هذه المذكرة الإستراتيجيات والتقنيات المختلفة المتاحة للحفاظ على درجات الحرارة التشغيل المثلى للمكونات الإلكترونية في بيئة الطاقة الشمسية. فهي تتناول جوانب مثل التبريد الحراري، واختيار المواد، وأساليب التبريد النشط أو السلبي، بالإضافة إلى الاعتبارات التصميمية لتعظيم كفاءة النظام الطاقوية وضمان موثوقيته على المدى الطويل.

## Abstract:

Designing a cooling system for a solar electric converter is crucial to ensure its efficiency and durability over the long term. This thesis explores various strategies and technologies available to maintain optimal operating temperatures for electronic components in a solar environment. It likely covers aspects such as heat dissipation, material selection, active or passive cooling methods, as well as design considerations to maximize energy efficiency of the system while ensuring long-term reliability.

## Sommaire :

<b>Introduction Générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I :Fondements des installations photovoltaïque</b>	
I.1. Introduction : .....	3
I.2. Principe de fonctionnement d'une installation photovoltaïque : .....	3
I.2.1. Technologie des cellules photovoltaïques : .....	5
I.2.2. Le module photovoltaïque : .....	10
I.2.3. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque : .....	12
I.3. Application des systèmes photovoltaïques : .....	14
I.3.1 Installation photovoltaïque raccordée au réseau : .....	16
I.3.1.1 Classification des centrales photovoltaïques connectées au réseau : .....	17
I.3.1.2. Composition d'un système photovoltaïque raccordé réseau : .....	18
I.3.2. Installations autonomes : .....	19
I.4. Options de consommation de l'énergie photovoltaïque : .....	21
I.4.1. Exportation vers le réseau : .....	21
I.4.1.1. Installation PV raccordée au réseau avec injection totale de.....	21
I.4.2. L'autoconsommation : .....	22
I.5. Conclusion : .....	22
<b>Chapitre II : <i>Système de Refroidissement pour les convertisseurs</i></b> .....	<b>23</b>
II.1 Introduction : .....	24
II.2 Refroidissement par air .....	24
II.3 Refroidissement par liquide .....	29
II.4 Refroidissement par changement de phase .....	30
II.5 Refroidissement thermoélectrique.....	30
II.6 Considérations pour le choix de la méthode de refroidissement.....	31
Conclusion .....	31
<b>Chapitre III : <i>Formulation mathématique et Modélisation Numérique.</i></b> .....	<b>32</b>
III.1. Introduction .....	33
III.2. Description du Convertisseur étudié.....	33
III.3. Formulation mathématique .....	36
III.4. Rappels sur la turbulence .....	37
III-5- Modélisation Numérique .....	37
<b>Chapitre IV : <i>Résultats et Discussion</i></b> .....	<b>42</b>

IV.3 Résultats et Discussion .....	43
IV.3.1 Convergence de la solution.....	43
IV.3.2 Champ de vitesse .....	43
IV.3.3 Champ de Température.....	44
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	<b>48</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	<b>50</b>



# Liste de figures

## Chapitre 1 :

<b>Figure (I.1)</b> : Installation photovoltaïque.....	3
<b>Figure (I.2)</b> : principe de fonctionnement photovoltaïque.....	4
<b>Figure (I.3)</b> : Cellules solaires monocristallines.....	6
<b>Figure (I.4)</b> : Cellules solaires polycristallines.....	7
<b>Figure (I.5)</b> : Cellules solaires amorphes.....	8
<b>Figure (I.6)</b> : Les cellules multi-jonctions.....	9
<b>Figure (I.7)</b> : Principe de la cellule à multi-jonction.....	9
<b>Figure (I.8)</b> : Photovoltaïque à concentration et Schéma de principe d'un concentrateur Photovoltaïque.....	10
<b>Figure (I.9)</b> : Cellules flexibles.....	10
<b>Figure (I.10)</b> : Module photovoltaïque.....	11
<b>Figure (I.11)</b> : Schéma synoptique d'un générateur PV.....	11
<b>Figure (I.12)</b> : Caractéristique courant – tension d'une cellule photovoltaïque.....	12
<b>Figure (I.13)</b> : Caractéristique puissance-tension.....	13
<b>Figure (I.14)</b> : Structure de la chaîne hybride (éolienne, photovoltaïque).....	13
<b>Figure (I.15)</b> : Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil et avec batterie.....	14
<b>Figure (I.16)</b> : Représente un système PV connecté au réseau électrique.....	16
<b>Figure (I.17)</b> : Les constituants d'un système PV.....	18
<b>Figure (I.18)</b> : Système photovoltaïque directement relié au réseau.....	20
<b>Figure (I.19)</b> : Système photovoltaïque relié au réseau avec batterie.....	20
<b>Figure (I.20)</b> : Schéma de principe de la configuration d'injection du surplus d'énergie.....	21
<b>Figure (I.21)</b> : Schéma de principe de la configuration d'injection totale d'énergie.....	22

---

## Chapitre 2

<b>Figure II.1:</b> Dissipateur à ailettes planes .....	25
<b>Figure II.2:</b> Dissipateur avec des ailettes solides et perforées .....	26
<b>Figure II.3 :</b> Dissipateurs Thermiques à Heat Pipes.....	27
<b>Figure II.4 :</b> Dissipateur Thermiques Actif.....	27
<b>Figure II.5:</b> Ventilateur axial.....	29
<b>Figure II.6 :</b> Ventilateur radial.....	29
<b>Figure II.7 :</b> Refroidissement par immersion.....	30
<b>Figure II.8 :</b> Schéma du principe de refroidissement par changement de phase.....	30
<b>Figure II.9 :</b> Ensemble de système de refroidissement Peltier thermoélectrique.....	31

---

**Chapitre 3 :**

<b>Figure III.1 :</b> Convertisseur réalisé au niveau du LHAE-UAT et la taille des composants électroniques utilisés.....	33
<b>Figure III. 2 :</b> Représentation du convertisseur considérée en 3D.....	34
<b>Figure III. 3 :</b> Schéma de la configuration considérée en 2D.....	34
<b>Figure III.4 :</b> Exemple de saignement de maillage.....	39
<b>Figure III.5 :</b> Exemple de maillage en forme de grille O sur un ventilateur et maillage fin dans son sillage vu de dessus.....	40
<b>Figure III.6 :</b> Maillage du Convertisseur (2D).....	40
<b>Figure III.7 :</b> Maillage du Convertisseur (3D).....	41

---

**Chapitre 4 :**

<b>Figure IV.1 :</b> Historique de convergence.....	43
<b>Figure IV.2 :</b> Champ de vitesse total dans le convertisseur.....	43
<b>Figure IV.3 :</b> Champ de vitesse partielle dans le convertisseur.....	44
<b>Figure IV.4 :</b> Champ de température partielle dans le convertisseur.....	44
<b>Figure IV.5 :</b> Champ de température du noyau.....	45
<b>Figure IV.6 :</b> Champ de température du dissipateur.....	45
<b>Figure IV.7 :</b> Distribution de la température de la ligne $P_1P_2$ traversant le noyau et le dissipateur.....	46
<b>Figure IV.8 :</b> Evolution de la température au cours du temps le long d'une ligne traversant un noyau chaud et un dissipateur.....	47

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1</b> : Rendement des différentes technologies.....	8
<b>Tableau III.1</b> : Composants et leurs dimensions du convertisseur étudié matriciel.....	35
<b>Tableau II3.2</b> : Caractéristiques des composants utilisés .....	35

<b>a:</b> Décélération	(m <sup>2</sup> /s)
<b>A<sub>d</sub></b> : Surface de disque balayée par une plaquette	(mm <sup>2</sup> )
<b>A<sub>c</sub></b> : Surface de plaquette en contact avec le disque	(mm <sup>2</sup> )
<b>c:</b> Chaleur massique	(J kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )
<b>C:</b> Carbone	
<b>C<sub>p</sub></b> : Capacité thermique massique	(J/ (kg K))
<b>C<sub>x</sub></b> : Coefficient de forme	
<b>[C]</b> : Matrice de capacité thermique	(J/K)
<b>d</b> : Diamètre, ou distance	(m)
<b>E:</b> Le module d 'Young	(GPa)
<b>f<sub>h</sub></b> : Facteur de répartition de l'effort de freinage, essieu arrière	
<b>f<sub>v</sub></b> : Facteur de répartition de l'effort de freinage, essieu avant	
<b>F:</b> Force	(N)
<b>{F}</b> : Vecteur des flux nodaux	(W)
<b>F<sub>D</sub></b> : Force motrice	(N)
<b>F<sub>FH</sub></b> : Effort de freinage rapporté à l'essieu arrière	(N)
<b>F<sub>FV</sub></b> : Effort de freinage rapporté à l'essieu avant	(N)
<b>F<sub>G</sub></b> : Effort de pesanteur	(N)

<b>F<sub>P</sub></b> : Effort exercé par le conducteur	(N)
<b>F<sub>R</sub></b> : Force de frottement	(N)
<b>F<sub>RA</sub></b> : Force de résistance de l'air	(N)
<b>F<sub>RP</sub></b> : Force de résistance due à la pente	(N)
<b>F<sub>RRH</sub></b> : Force de résistance au roulement de la roue arrière	(N)
<b>F<sub>RRV</sub></b> : Force de résistance au roulement de la roue avant	(N)
<b>F<sub>QH</sub></b> : Charge statique rapportée à l'essieu arrière	(N)
<b>F<sub>QV</sub></b> : Charge statique rapportée à l'essieu avant	(N)
<b>F<sub>S</sub></b> : Effort de freinage	(N)
<b>g</b> : Accélération de la pesanteur	(ms <sup>-2</sup> )
<b>h</b> : Coefficient d'échange	(Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> )
<b>k</b> : Conductivité thermique du matériau	(Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
<b>[K]</b> : Matrice de conductivité thermique	(W/K)
<b>L</b> : Distance entre l'essieu avant et l'essieu arrière	
<b>L<sub>H</sub></b> : Distance entre l'axe du l'essieu avant et le centre de gravité du véhicule	
<b>L<sub>V</sub></b> : Distance entre l'axe du l'essieu arrière et le centre de gravité du véhicule	
<b>m</b> : Masse du véhicule	(kg)
<b>M<sub>n</sub></b> : Manganèse	
<b>M<sub>o</sub></b> : Molybdène	
<b>n</b> : Nombre de nœuds de l'élément.	
<b><math>\vec{n}</math></b> : Vecteur unitaire de la normale	
<b>P</b> : Pression hydraulique	(MPa)
<b>P</b> : Phosphore	
<b>P<sub>F</sub></b> : Puissance de freinage	(W)
<b>P<sub>FVI</sub></b> : Puissance de freinage rapporté au disque de frein	(W)
<b>P<sub>R</sub></b> : Puissance de freinage due au roulement	(W)

---

<b>Q:</b> Puissance thermique	(W)
<b>Q<sub>v</sub>:</b> Flux de chaleur	(W)
<b>Q'<sub>v</sub>:</b> Flux de chaleur par unité de surface	(W/m <sup>2</sup> )
<b>R:</b> Résistance thermique	(W <sup>-1</sup> K)
<b>R:</b> Rayon	(m)
<b>R<sub>m</sub>:</b> Résistance à la rupture	(N/mm <sup>2</sup> )
<b>S:</b> Surface	(mm <sup>2</sup> )
<b>S<sub>c</sub>:</b> L'indice de saturation du carbone	
<b>S<sub>f</sub>:</b> Surface frontale du véhicule	(mm <sup>2</sup> )
<b>Si:</b> Silicium	
<b>t:</b> Temps	(s)
<b>T:</b> Champ de température	(°C)
<b>{T}</b> : Vecteur des températures nodales	(K)
<b>T<sub>i</sub>:</b> Titane	
<b>T<sub>0</sub>:</b> Température initiale	(°C)
<b>T<sub>p</sub>:</b> Température de la surface	(°C)
<b>T<sub>∞</sub>:</b> Température du milieu environnant la surface	(°C)
<b>u<sub>m</sub>:</b> Vitesse moyenne	(m/s)
<b>v:</b> Vitesse	(m/s)
<b>v<sub>0</sub>:</b> Vitesse initiale	(m/s)
<b>V:</b> Volume	(m <sup>3</sup> )
<b>x:</b> Coordonnées cartésiennes	
<b>y:</b> Coordonnées cartésiennes	
<b>z:</b> Coordonnées cartésiennes, ou cylindriques	



# **Introduction**

## **Générale**

Les convertisseurs électriques solaires, également connus sous le nom d'onduleurs photovoltaïques, jouent un rôle crucial dans les systèmes de production d'énergie solaire. Leur fonction principale est de convertir le courant continu (CC) produit par les panneaux solaires en courant alternatif (CA) utilisable par le réseau électrique ou les appareils domestiques. Cependant, ce processus de conversion génère une quantité significative de chaleur, ce qui peut affecter l'efficacité et la longévité des convertisseurs.

Le refroidissement efficace de ces convertisseurs est donc essentiel pour assurer leur performance optimale et leur durabilité. Une gestion thermique inadéquate peut entraîner des surchauffes, des pannes prématurées et une diminution de l'efficacité énergétique globale du système photovoltaïque. Par conséquent, l'amélioration des techniques de refroidissement des convertisseurs électriques solaires représente un intérêt très important.

Ce projet de master se concentre sur l'étude et investigation du refroidissement utilisé pour les convertisseurs électriques solaires. L'objectif principal est de développer des solutions efficaces pour dissiper la chaleur générée par ces dispositifs, tout en minimisant les coûts. Pour atteindre cet objectif, diverses approches seront explorées, incluant des systèmes de refroidissement passifs et actifs, l'utilisation de matériaux à haute conductivité thermique, et l'intégration de technologies avancées telles que les refroidisseurs thermoélectriques.

Le projet inclura une revue exhaustive de la littérature existante, une analyse comparative des différentes technologies de refroidissement, et des simulations thermiques pour modéliser et optimiser les solutions proposées. Des modèles seront également développés et testés en conditions réelles pour évaluer leur performance et leur faisabilité.

En résumé, ce projet de master vise à contribuer significativement à l'amélioration de la gestion thermique des convertisseurs électriques solaires, en proposant des solutions pratiques pour accroître leur efficacité et leur fiabilité, tout en soutenant la transition vers des sources d'énergie renouvelable plus durables et efficaces.

**Chapitre I :**  
**Fondements des installations**  
**photovoltaïque**

## I.1. Introduction :

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancée sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique.

Pour définition le mot " photovoltaïque " vient de la grec " photo " qui signifie lumière et de "voltaïque" qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 - 1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la lumière électricité [4, 5].

## I.2. Principe de fonctionnement d'une installation photovoltaïque :

Le principe de fonctionnement d'une installation solaire photovoltaïque est relativement simple : il s'agit de convertir le rayonnement du soleil en électricité.

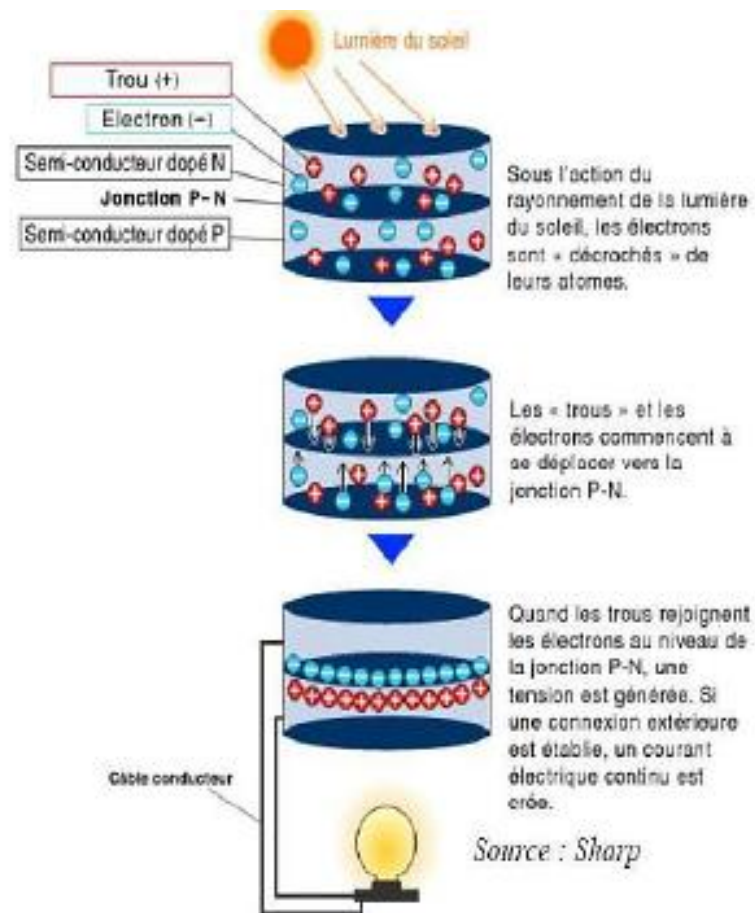


**Figure I.1 :** Installation photovoltaïque.

Cette opération repose sur un phénomène physique appelé *effet photovoltaïque*. Ce mécanisme a été découvert en 1839 par Antoine Becquerel mais il n'a été expliqué que près d'un siècle plus tard par Albert Einstein, ce qui lui a valu le Prix Nobel de physique en 1921. De façon très schématique,

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente (comme un aimant possède un champ magnétique permanent).

Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure.



**Figure I.2 :** principe de fonctionnement photovoltaïque.

Une cellule photovoltaïque est constituée d'un de ces matériaux, généralement du silicium, et conçue de telle façon que les électrons émis soient récupérés pour former un courant électrique. Les cellules sont assemblées pour créer un courant suffisamment élevé pour être exploité, cet assemblage de cellules est appelé module photovoltaïque ou, plus souvent, panneau solaire.

**a. Les avantages :**

- Energie électrique non polluante à l'utilisation et s'inscrit dans le principe de développement durable.
- Source d'énergie renouvelable car inépuisable à l'échelle humaine.
- Utilisables dans les pays en voie de développement sans réseau électrique
- Important dans des sites isolés tels qu'en montagne où il n'est pas possible de se raccorder au réseau électrique national.

**b. Les Inconvénients :**

- Coût du photovoltaïque élevé car il est issu de la haute technologie.
- Coût dépendant de la puissance de crête.
- Le rendement actuel des cellules photovoltaïques reste assez faible (environ 10% pour le grand public) et donc ne délivre qu'une faible puissance.
- Marché très limité mais en développement.
- Production d'électricité ne se fait que le jour alors que la plus forte demande chez les particuliers se fait la nuit.
- Le stockage de l'électricité est quelque chose de très difficile avec les technologies actuelles (coût écologique des batteries très élevé).
- Durée de vie : 20 à 25 ans, après le silicium "cristallisé" rend inutilisable la cellule.
- Pollution à la fabrication : certaines études prétendent que l'énergie utilisée pour la fabrication des cellules n'est jamais rentabilisée durant les 20 années de production  
Même en fin de vie, le recyclage des cellules pose des problèmes environnementaux.

**I.2.1. Technologie des cellules photovoltaïques :**

Il existe différents types de cellules solaires photovoltaïques, et chaque type de cellules à un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible : de 5 à 22% de l'énergie qu'elles reçoivent.

Les cellules solaires peuvent être réparties en trois groupes, selon le matériau de base utilisé :

- Cellules monocristallines
- Cellules polycristallines
- Cellules à couches minces

Le groupe des cellules à couche mince compte les cellules amorphes au silicium et les cellules formées à partir d'autres matériaux, comme le tellure de cadmium (Cd Te), le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS) ou l'arséniure de gallium (Ga As). Dans la pratique, les cellules en silicium ont fini par s'imposer.

#### A. Cellules solaires monocristallines :

Des blocs de silicium sont formés à partir de fonte de silicium ultra-pure. Dans un monocristal, le réseau cristallin complet est agencé de manière uniforme. Le bloc de silicium est découpé en rondelles de 200 à 300 mm d'épaisseur, appelées galettes (en anglais *wafers*). Pour permettre un usage optimal de la surface du module solaire, les cellules rondes sont découpées en éléments carrés. D'habitude, les cellules présentent une longueur d'arrêtée 152 mm La fabrication est conclue par le dopage, l'application des surfaces de contact et de la couche anti réflexion.

Possédant un rendement variant entre 15 et 18 %, les cellules monocristallines fabriquées industriellement sont les cellules ayant actuellement le rendement le plus élevé. Cependant, leur fabrication requiert plus d'énergie et de temps que celle des cellules polycristallines.

Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients :

- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.
- Une durée d'amortissement de l'investissement en énergie élevée (jusqu'à 7 ans).



**Figure I.3 :** Cellules solaires monocristallines [6].

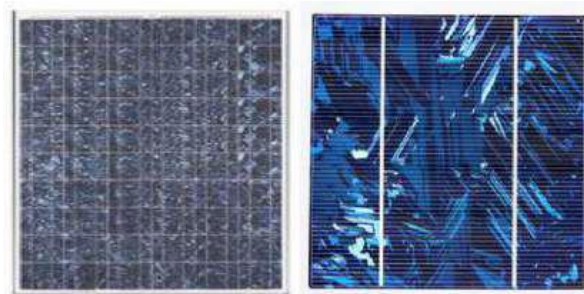
## B. Cellules solaires polycristallines :

Le matériau de base est du silicium ultra-pur qui est porté à fusion. Mais pour la fabrication de cellules solaires polycristallines, on ne cultive pas de monocristaux, mais la fonte de silicium est refroidie de façon contrôlée dans un moule carré.

Pendant le refroidissement, les cristaux s'orientent de manière irrégulière et forment la surface miroitante typique pour les cellules solaires polycristallines. Les blocs de silicium carrés sont découpés en galettes de 200 à 300 *mm* d'épaisseur. La fabrication est conclue par le dopage, l'application des surfaces de contact et de la couche anti réflexion. La couche anti-réflexion offre à la cellule solaire sa surface bleue typique, car le bleu réfléchit le moins de lumière et en absorbe la plus grosse quantité. Les cellules solaires polycristallines présentent un rendement entre 13 et 16 %.

Les cellules polycristallines sont caractérisées par :

- ✓ Coût de production moins élevée.
- ✓ Nécessite moins d'énergie.
- ✓ Rendement de 13 % et jusqu'à 20 % en labo.



**Figure I.4 :** Cellules solaires polycristallines [6].

## C. Cellules solaires amorphes :

Le terme amorphe vient du grec (a : sans, morphe : forme) et signifie qui n'a pas de forme. En physique, on appelle amorphes les éléments dont les atomes présentent des formes irrégulières. Si les atomes ont une structure ordonnée, on les appelle des cristaux.

Pour la fabrication de cellules solaires amorphes, on applique le silicium sur un matériau support, comme par exemple le verre. L'épaisseur du silicium s'élève alors à environ 0,5 à 2  $\mu\text{m}$ . Ainsi, non seulement la quantité de silicium requise est-elle assez faible, mais le découpage



fastidieux des blocs de silicium n'est-il pas nécessaire. Le degré de rendement des cellules solaires amorphes se situe seulement à 6-8 % [6].

#### Les inconvénients :

- Coût de production bien plus bas.
- Rendement de seulement 5 % par module et 14% au laboratoire.
- Fonctionne sous de très faible éclairement.



**Figure I.5 :** Cellules solaires amorphes [6].

Grâce à la technologie des nouveaux matériaux tel que le tellure de cadmium (Cd Te), l'arséniure de gallium (Ga As) ainsi que le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS) ont permis d'obtenir des photopiles ayant des rendements 38 % au laboratoire [7]

**Tableau I.1 :** Rendement des différentes technologies

Matériau de base	Rendement en %	Surface en m <sup>2</sup>
Cellule monocristalline	15-18	7-9
Cellule polycristalline	13-16	8-9
Cellule amorphe	6-8	13-20
Cellule audiséniure de cuivre et d'indium	10-12	9-11

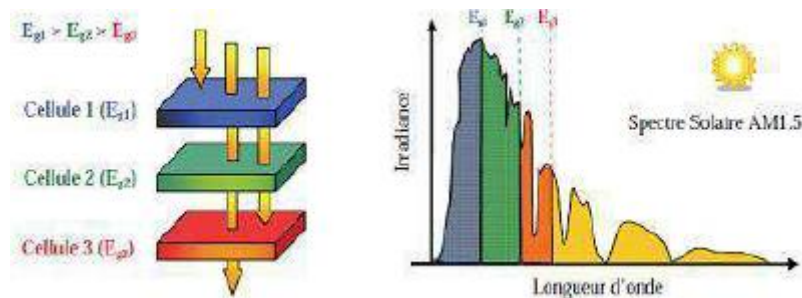
#### D. Les cellules multi-jonctions à haut rendement :

Aujourd'hui, la plupart des cellules photovoltaïques inorganiques sont constituées d'une simple jonction PN. Dans cette jonction, seuls les photons dont l'énergie est égale ou supérieure à la bande interdite du matériau (notée  $E_g$  en eV) sont capables de créer des paires électron-trou. En d'autres termes, la réponse photovoltaïque d'une cellule simple jonction est limitée à l'énergie du photon. Seule la proportion du spectre solaire dont l'énergie des photons est supérieure au gap d'absorption du matériau est utile, l'énergie des photons plus faible n'est donc pas utilisable. D'autre part, même si l'énergie des photons est suffisante, la probabilité de

rencontrer un électron est faible. Ainsi, la plupart des photons traversent le matériau sans avoir transféré leur énergie. Une première réponse pour limiter les pertes est connue de longue date du point de vue technologique, il suffit d'utiliser des systèmes à plusieurs niveaux, en empilant des jonctions possédant des gaps décroissants, (Fig. I.7). Ainsi il est possible d'exploiter le spectre solaire dans sa quasi-totalité avec des rendements de conversion très importants.



**Figure (I.6) :** Les cellules multi-jonctions [8].



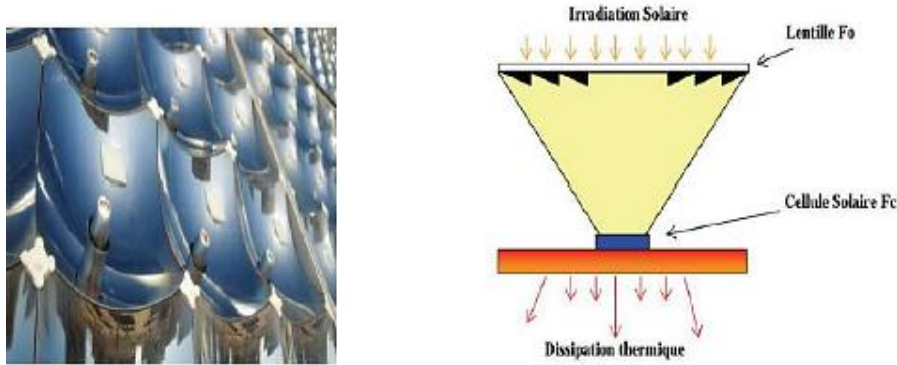
**Figure (I.7) :** Principe de la cellule à multi-jonction.

## E. Autres types de cellules :

Il existe d'autres types de technologies photovoltaïques actuellement commercialisées ou encore à l'étude, les principales étant :

### 1. Photovoltaïque à concentration :

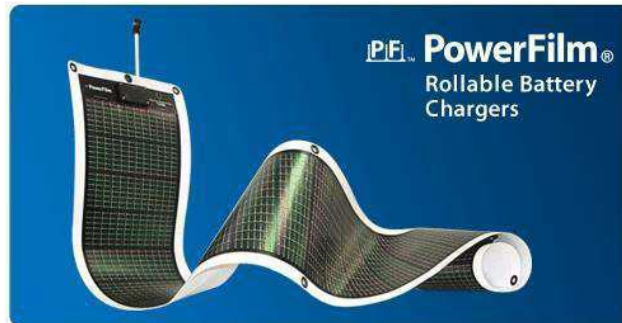
Certaines cellules sont destinées à fonctionner avec des rayons solaires concentrés. Elles sont alors placées à l'intérieur d'un collecteur qui concentre la lumière du soleil sur les cellules au moyen d'une lentille. L'idée est d'utiliser le moins possible de matériau photovoltaïque semi-conducteur, et le plus possible de la lumière du soleil. Leur rendement se situe entre 20 et 30%.



**Figure (I.8) :** Photovoltaïque à concentration et Schéma de principe d'un concentrateur photovoltaïque [9].

## 2. Cellules flexibles :

Basées sur un processus de production similaire à celui des couches minces, ces cellules sont constituées d'un dépôt de matière active sur un plastique fin, rendant le tout flexible. Cela ouvre la voie à une série d'applications, en particulier pour l'intégration aux bâtiments (toiture) et pour les applications domestiques.



**Figure (I.9) :** Cellules flexibles [6].

### I.2.2. Le module photovoltaïque :

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module figure (I.10). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène-vinyl- acétate) figure (I.10) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène [10].



Figure (I.10) : Module photovoltaïque.

Actuellement la puissance d'un module est de quelques watts crêtes à quelques dizaines de watts crêtes. Pour obtenir des puissances supérieures, il est nécessaire d'associer en série-parallel des modules Figure (I-10) pour avoir un générateur PV.

Pour des déséquilibres importants dus à l'occultation d'une ou plusieurs cellules, les modules peuvent être amenés à travailler en récepteur. Pour remédier à ces problèmes, des diodes peuvent être placées en parallèle et en série avec les modules [11, 12, 13, 14].

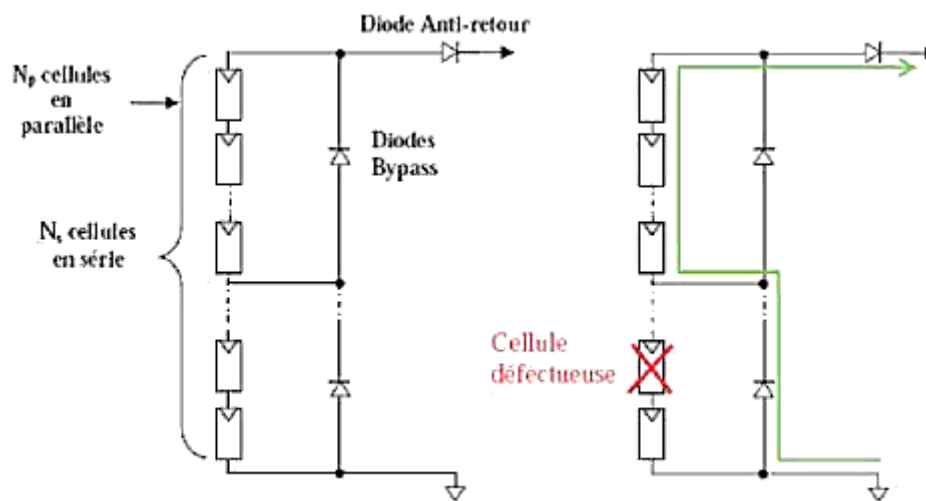


Figure (I.11) : Schéma synoptique d'un générateur PV

➤ **Les diodes en série :**

Pour empêcher la batterie de se décharger la nuit dans les cellules PV ou pour empêcher une série de modules contenant un module défaillant ou masqué de devenir réceptrice du courant fourni par les autres séries, qui ont alors une tension plus élevée qu'elle, une diode est

intégrée dans chaque série. On l'appelle aussi diode anti-retour et elle est située en série avec les modules.

➤ **Les diodes en parallèle :**

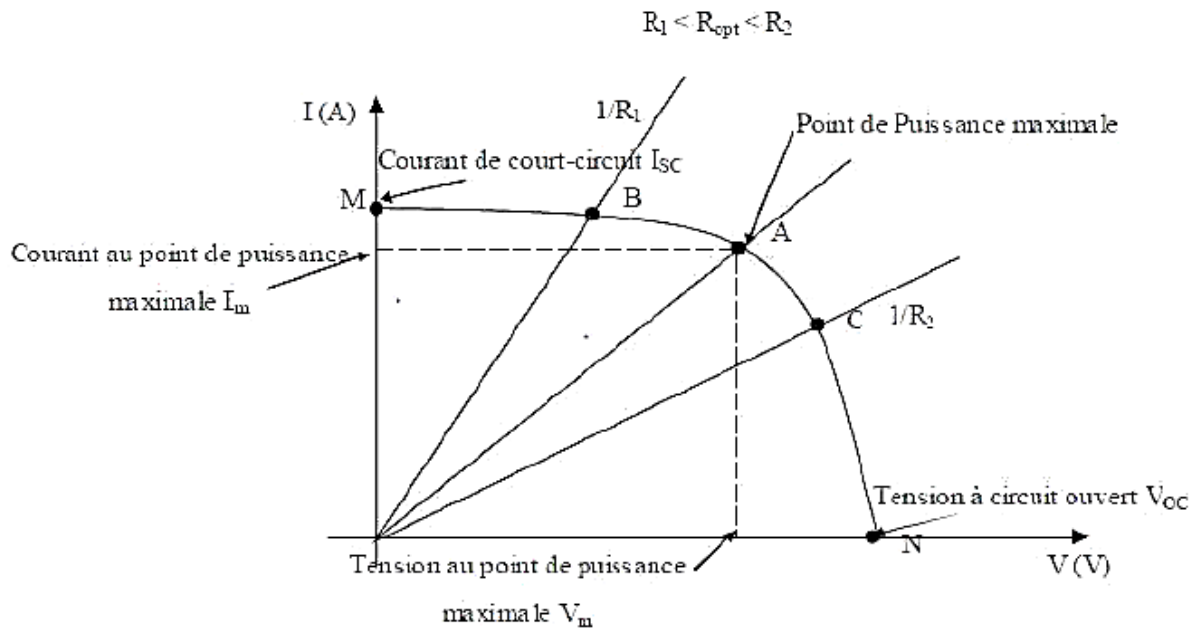
Au sein d'une série un module qui ne peut plus produire d'énergie (masque, défaillance), doit être protégé pour ne pas devenir récepteur et s'endommager irrémédiablement ; des diodes sont donc placées en parallèle sur chacun des modules du générateur. Elles permettent de dévier le courant produit par les autres modules de la série et sont placées en parallèle avec les modules [12, 15, 16].

➤ **Caractéristiques d'un module PV [17] :**

- La puissance de crête,  $P_c$  : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards ( $25^\circ\text{C}$  et un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$ ).
- La caractéristique  $I/V$  : Courbe représentant le courant  $I$  débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- Courant de court-circuit,  $I_{cc}$  : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".
- Point de fonctionnement optimum,  $(U_m, I_m)$  : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil,  $P_m = U_m * I_m$ .
- Rendement : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- Facteur de forme : Rapport entre la puissance optimale  $P_m$  et la puissance maximale que peut avoir la cellule :  $VOC * I_{cc}$ .

### **I.2.3. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque :**

➤ **Caractéristique courant – tension (I-V) d'une cellule photovoltaïque :**



**Figure (I.12) :** Caractéristique courant – tension d’une cellule photovoltaïque.

Comme nous le voyons sur la figure (1-12), la cellule solaire PV est caractérisée par la courbe  $I(V)$  non linéaire qui dépend particulièrement des conditions d’ensoleillement et de température. Cette courbe nous informe sur trois points importants : [18]

- Le point de fonctionnement optimal PPM (la puissance maximale de la cellule).
- Le point du courant maximal ( $I_{sc}$ ). Il se produit lorsque les bornes de la cellule sont courtcircuitées. Il est appelé courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ).
- Le point de la tension maximale de la cellule ( $V_{oc}$ ), (environ 0.6 V) pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ).

➤ **Caractéristique puissance-tension (P-V) :**

La puissance crête d’une cellule PV, notée  $W_c$  (Watt crête) ou  $W_p$  (Watt peak) représente la puissance électrique maximum délivrée dans les conditions suivantes dites conditions standard : [18] - éclairement solaire de  $1 \text{ kW} / \text{m}^2$  ; - température de la cellule PV égale à  $+ 25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

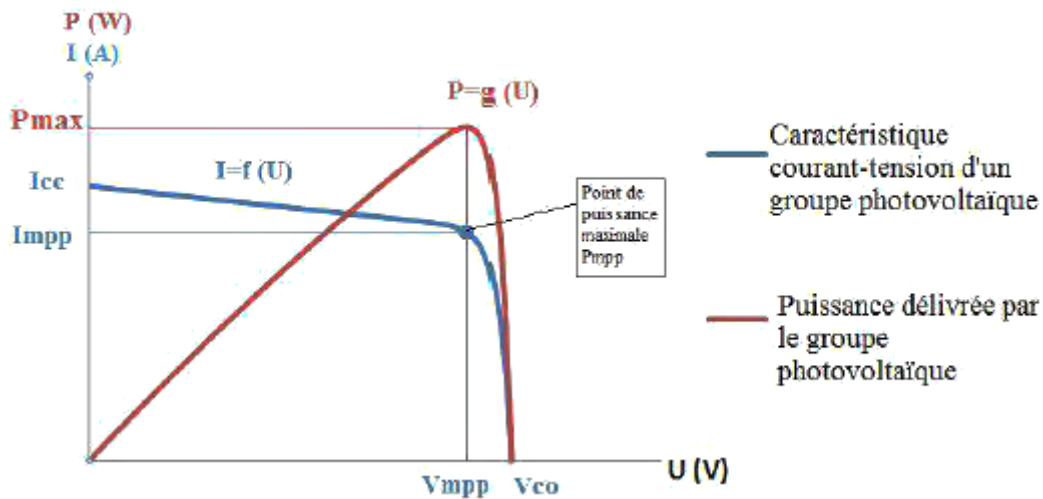


Figure (I.13) : Caractéristique puissance-tension.

### I.3. Application des systèmes photovoltaïques :

- **Electrification hybride (photovoltaïque-éolienne) :**

Ce système hybride de production d'énergie électrique est celui qui combine et exploite deux sources d'énergies renouvelables (photovoltaïque, éolienne) pour la production de l'énergie, comme représenté sur la figure (I.14).

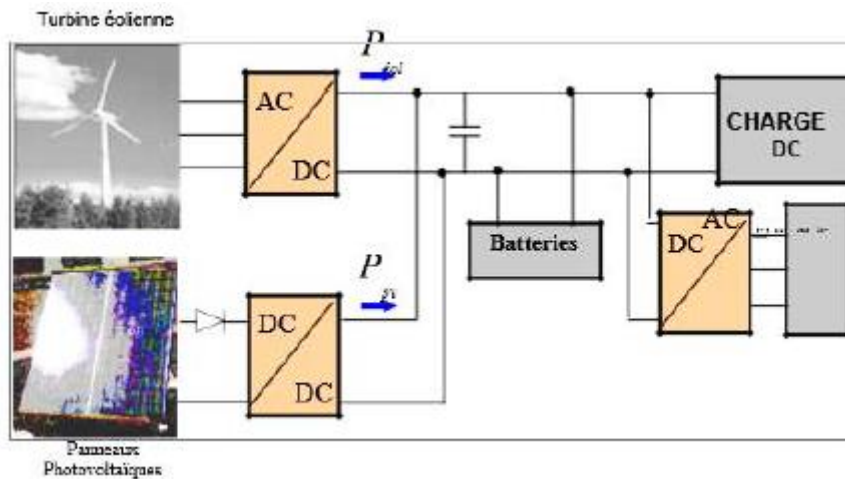
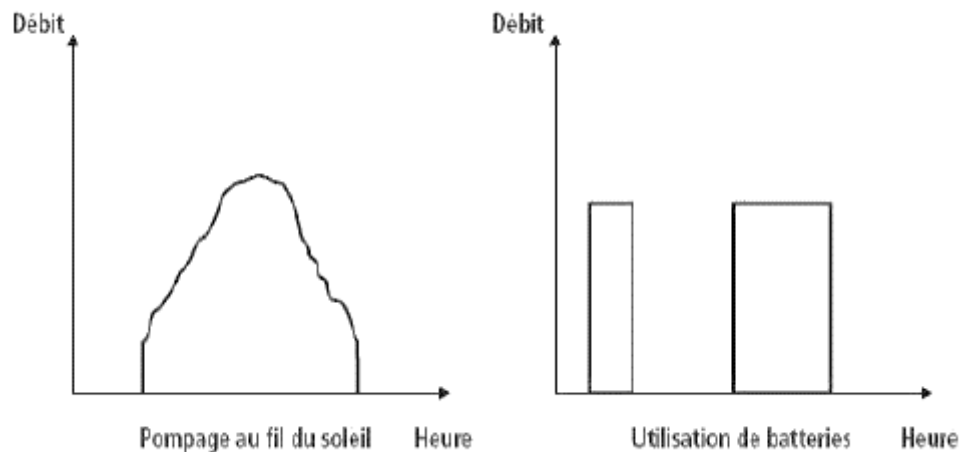


Figure (I.14) : Structure de la chaîne hybride (éolienne, photovoltaïque).

Le système hybride comprend, un sous-système photovoltaïque avec un convertisseur DC/DC qui permet de rattraper à chaque fois le point de puissance maximale. Une turbine éolienne qui assure la conversion de l'énergie du vent en électricité. Les deux sources d'énergie sont reliées à un bus continu. Le stockage est assuré par des batteries. La charge à alimenter peut-être continu ou alternative branchée à travers un onduleur.

- **Le pompage photovoltaïque :**

Pour être ramenées en surface, les eaux souterraines ont besoin d'être pompées. Par conséquent, la nécessité d'une pompe et donc d'une source fiable d'énergie comme le photovoltaïque s'impose.



**Figure (I.15) :** Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil et avec batterie.

- **Le pompage au fil du soleil :**

Le stockage se fait de manière hydraulique, l'eau étant pompée, lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement, dans un réservoir au-dessus du sol. Elle est ensuite distribuée par gravité au besoin.

- Permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, plus fiable.

- Moins coûteux qu'un système avec batterie.

- **Le pompage avec batterie :** permet de s'affranchir des aléas du soleil et des problèmes d'adaptation entre générateur photovoltaïque et motopompe.

- Le débit de pompage peut se faire à la demande, lorsque les utilisateurs en ont besoin, ou permettre un pompage régulier durant toute la journée.

- L'utilisation d'un réservoir de stockage pour l'eau sera nécessaire afin de pouvoir fournir à la demande d'eau.

- L'utilisation de batteries comporte davantage de composants qui influent sur la fiabilité et le coût global du système.



- **Le chauffe-eau solaire :**

Produire de l'eau chaude, chaque jour, grâce à l'action de la lumière du soleil et la stocker pour la journée et la nuit dans un réservoir étanche et isolé (le ballon), c'est le principe fondamental du chauffe-eau solaire. Pour cela on utilise des panneaux sur lesquels, la source primaire d'énergie, le soleil, va rayonner et faire élever la température du liquide qui circule dans ce qu'on appelle, l'absorbeur. Lorsque le fluide est plus chaud que l'eau stockée dans le ballon, le fluide va se mettre à circuler et ainsi transmettre l'énergie emmagasinée.

- **La climatisation solaire :**

La climatisation solaire désigne l'ensemble des moyens de production de froid en utilisant comme ressource énergétique primaire l'énergie solaire afin de refroidir un bâtiment. La climatisation s'effectue soit en récupérant l'énergie électrique produite par les panneaux photovoltaïques soit la chaleur solaire récupérée grâce à des capteurs solaires thermiques,

- **Dessalement de l'eau de mer :**

Une des solutions pour pallier le manque d'eau potable sont les stations de dessalement. C'est un processus qui permet de supprimer le sel de l'eau salée ou saumâtre pour le rendre potable.

### **I.3.1 Installation photovoltaïque raccordée au réseau :**

Un système photovoltaïque connecté au réseau, est un système raccordé directement au réseau électrique à l'aide de convertisseurs. Ce type de système offre beaucoup de facilités pour le (producteur/consommateur) puisque c'est le réseau qui se charge du maintien de l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité.



Figure (I.16) : représente un système PV connecté au réseau électrique.

### I.3.1.1 Classification des centrales photovoltaïques connectées au réseau :

Une première classification des (CPCR) en fonction de leur taille peut être faite de la manière suivante :

#### a. Centrales de petite taille ( $P_w=1$ à $10$ KW) :

Pour des applications sur les toits de maisons individuelles ou d'institutions publiques telles que les écoles, parkings, ... Elles se connectent au réseau basse tension [19].

#### b. Centrales de taille moyenne ( $P_w=10$ à $100$ KW) :

Ce type de système peut se trouver installé et intégré sur un édifice, sur un toit ou une façade.

Il peut être connecté à la basse ou à la moyenne tension du réseau de distribution électrique selon sa taille [19].

#### c. Centrales de grande taille ( $P_w500$ KW) :

Ce sont des systèmes centralisés et sont des propriétés de compagnies d'électricité. On peut également classer ces systèmes selon qu'ils soient munis de batteries de stockage ou non [19].

### I.3.1.2. Composition d'un système photovoltaïque raccordé réseau :

Un système PV est un ensemble complet d'équipements PV pour transformer la lumière du soleil en électricité, généralement il se compose de cinq éléments principaux : le générateur PV, la batterie, le régulateur, le convertisseur et la charge.

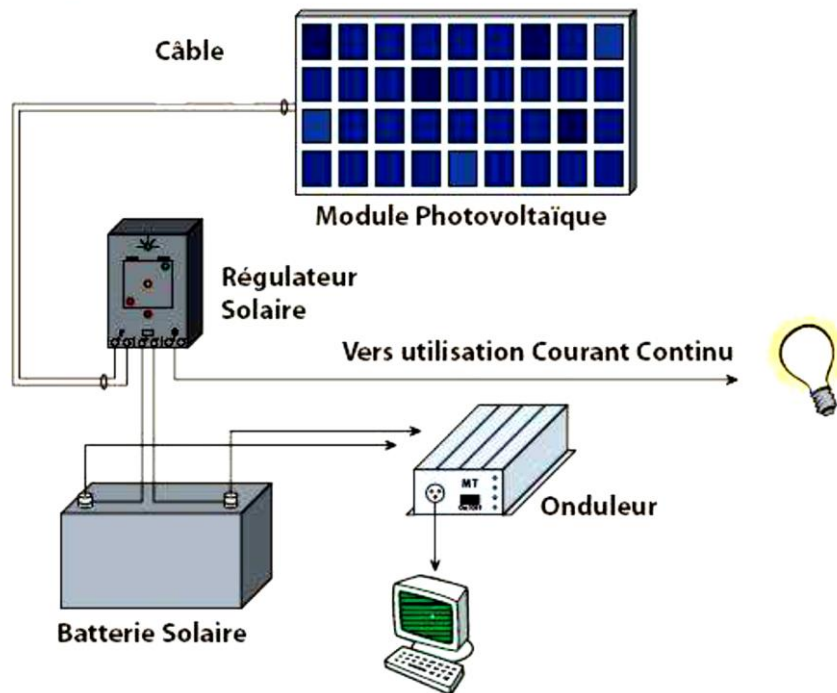


Figure (I.17) : Les constituants d'un système PV.

#### 1. Le panneau PV :

L'ensemble de cellules photovoltaïques reliées entre elles constitue le module ou le panneau PV, ce dernier est chargé de capter les rayons solaires et les convertir en électricité.

#### 2. La batterie solaire :

Elle est chargée de stocker le courant produit par le panneau pour assurer l'autonomie du système, sa durée de vie est définie par nombre de cycle (charge-décharge), elle se caractérise par :

- -Ampérage en Ampère heure (Ah).
- -Voltage en Volt.

### 3. Le régulateur (contrôleur de charge) :

Les régulateurs sont mis en place dans le souci d'assurer une longévité de système de stockage, donc de minimiser le coût d'installation.

En effet, un régulateur est chargé de :

- Contrôler la surcharge et la décharge de la batterie.
- Assurer l'optimisation du système du point de vue énergétique où il constitue un noeud de transfert d'énergie entre le module, le stockage et l'utilisation.

Pour fonctionner, un régulateur a besoin d'un indicateur qui l'informe sur l'état de charge des batteries. Il doit maintenir l'état de charge des batteries entre deux seuils : un seuil haut et un autre bas. Le choix des seuils dépend des caractéristiques des batteries et des conditions d'utilisation. Un régulateur est défini par : Ampérage en Ampère et Voltage en Volt. [20]

### 4. Le convertisseur d'énergie (onduleur) :

Il est chargé de convertir le courant continue développé par le solaire, vers un courant alternatif, et de voltage de branchement (12 V, 24 V...48V) vers 220 V, il est défini par : le voltage de branchement en volt et la puissance nominale à développer en watt.

### 5. La charge :

Elle représente l'ensemble des fonctions assurées par divers appareils reliés au système photovoltaïque. Vu les contraintes sur le rendement énergétique des systèmes photovoltaïque, il est importé de définir les critères sur lesquels s'appuiera un choix des charges à utiliser : charge continue ou alternative.

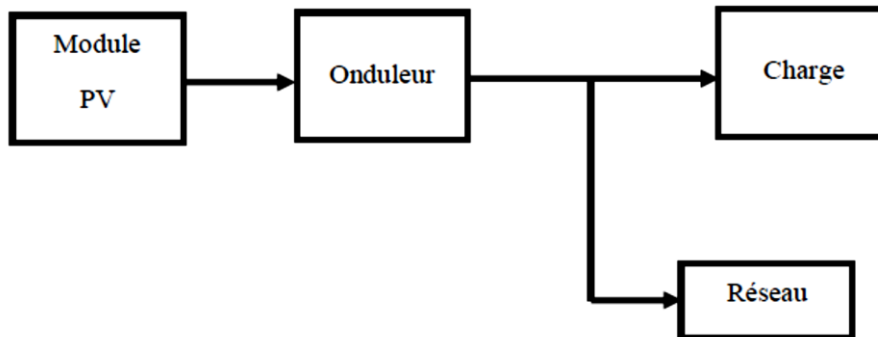
## I.3.2. Installations autonomes :

Selon le besoin, les systèmes autonomes alimentent un ou plusieurs consommateurs situés dans des zones isolées du réseau électrique. Ils sont indépendants du réseau et dépendent uniquement de l'énergie solaire pour répondre à la demande d'électricité.

Les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique. On peut classer ces systèmes en deux catégories :

- **Systèmes avec accumulateurs :**

L'excédent de l'énergie produite est stocké dans des batteries. Le schéma synoptique de la figure suivante décrit ce système.

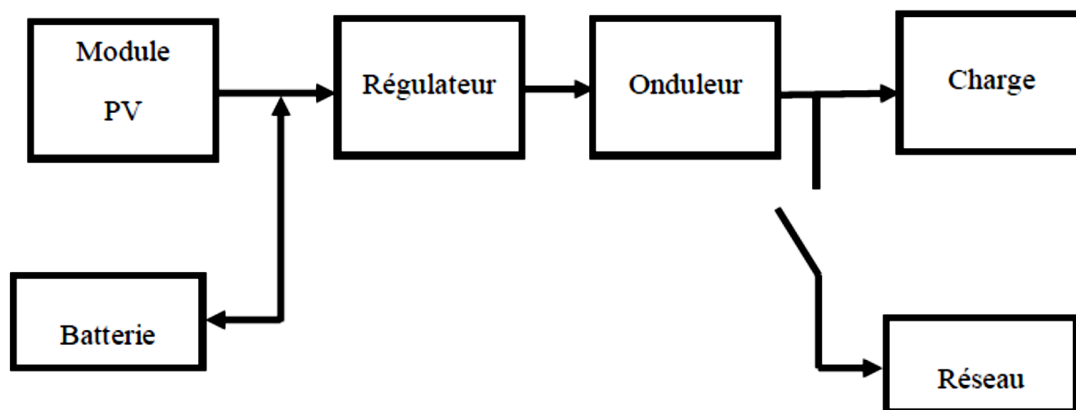


**Figure (I.18) :** Système photovoltaïque directement relié au réseau.

L'absence des batteries est un point positif, car celle-ci augmente le coût de système photovoltaïque. En plus elle doit être entretenue et changée après quelques années.

- **Systèmes photovoltaïques relié au réseau avec batterie :**

Le système peut fournir de l'énergie au réseau et prélever l'énergie d'appoint nécessaire au réseau. Le schéma d'un système PV relié au réseau avec batterie est le suivant.



**Figure (I.19) :** Système photovoltaïque relié au réseau avec batterie.

L'énergie est fournie par le module PV à la charge, l'excédent est stocké dans les batteries, dans le cas de décharge ou de surcharge de la batterie, on utilisera le réseau pour prélever ou délivrer l'énergie. [21]

## I.4. Options de consommation de l'énergie photovoltaïque :

### I.4.1. Exportation vers le réseau :

Une partie de la production est injectée au réseau lorsque la production dépasse la consommation, le client soutire aussi du réseau le manque. Cette installation est équipée de deux compteurs, l'un mesurant l'énergie soutirée du réseau lorsque la consommation excède la production (compteur de consommation), l'autre mesurant l'énergie injectée dans le réseau (compteur d'injection). Ce principe exclut le compteur réversible comme est indiqué sur la figure (I.20).

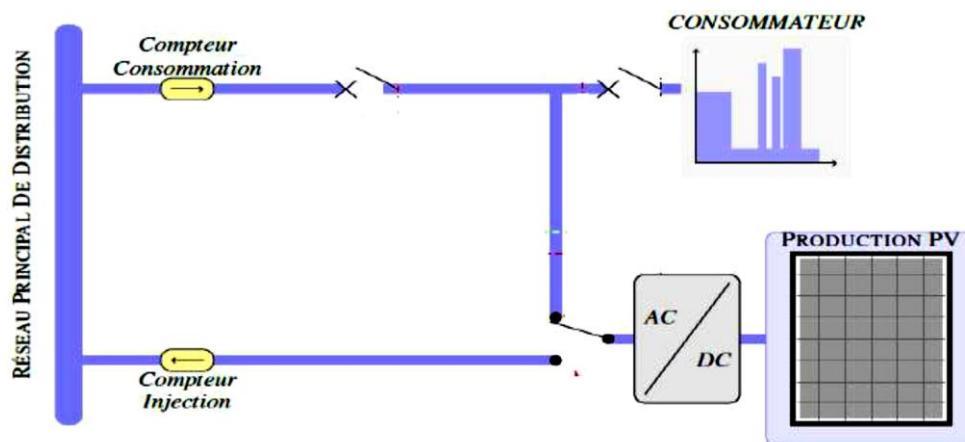


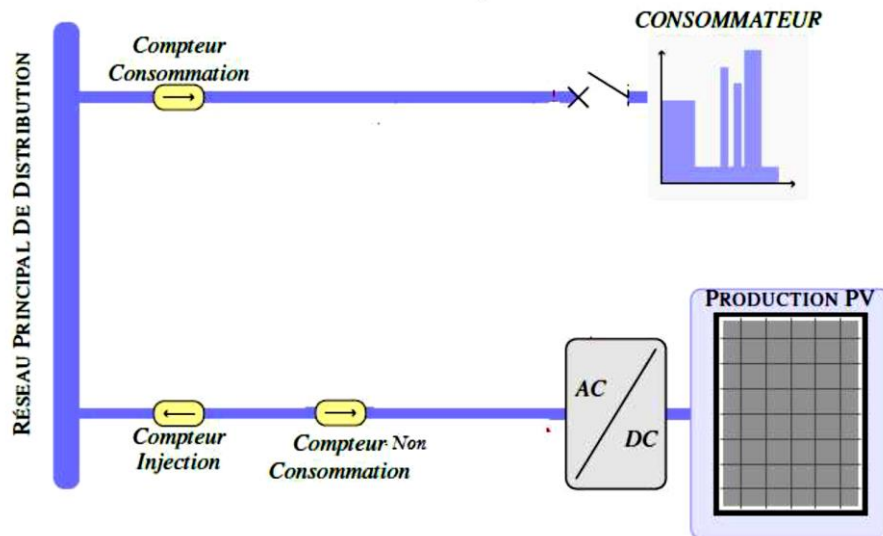
Figure (I.20) : Schéma de principe de la configuration d'injection du surplus d'énergie.

#### I.4.1.1. Installation PV raccordée au réseau avec injection totale de

##### L'énergie produite :

Le générateur de production d'origine photovoltaïque est raccordé au réseau par l'intermédiaire d'un point de livraison distinct du point de livraison utilisé pour les besoins de soutirage du producteur. Comparé à l'achat des excédents, ce type de raccordement conduit le plus souvent à des modifications plus importantes de l'installation par le gestionnaire du réseau. Le producteur injecte au réseau la totalité d'énergie produite et soutire du réseau la totalité d'énergie nécessaire à sa consommation. La séparation entre les deux points de livraison consommation et injection (production) conduit donc à étoiler le branchement en deux parties,

Avec cependant une seule liaison au réseau BT. Le branchement production comporte deux compteurs montés en tête bêche (production et consommation des dispositifs de la chaîne PV), voir figure (I.21).



**Figure (I.21) :** Schéma de principe de la configuration d'injection totale d'énergie.

#### I.4.2. L'autoconsommation :

Consommation locale de l'électricité photovoltaïque produite d'un point de vue physique, l'autoconsommation ne présente aucune différence avec la revente totale. Les centrales sont dans les deux cas raccordés au réseau public et l'électricité prend toujours le chemin le plus court. L'autoconsommation existe uniquement à travers le point de raccordement de cette centrale et son positionnement par rapport aux compteurs. Dans le cadre de l'autoconsommation, la centrale est raccordée sur le réseau côté propriétaire, donc en aval du compteur de consommation. La production est donc assimilée à une charge négative et vient diminuer la demande de puissance au réseau public. En ce sens cette technique permet alors de diminuer la consommation en provenance du réseau public et donc les factures associées. [22]

#### I.5. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté le principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par la cellule photovoltaïque, les principales caractéristiques et les technologies des éléments constitutifs d'un générateur PV, ainsi que les différentes configurations des systèmes photovoltaïques et leurs applications.

**Chapitre II :**  
*Système de*  
*Refroidissement pour les convertisseurs*



## II.1 Introduction :

La surchauffe des composants électroniques dans les convertisseurs DC-AC, qui transforment le courant continu en courant alternatif, représente un défi majeur pour la fiabilité et l'efficacité de ces systèmes. Les principaux composants concernés incluent les transistors de puissance, les MOSFETs, les IGBTs, ainsi que les diodes et les inductances. Pendant le processus de conversion, ces composants peuvent générer une chaleur importante due aux pertes de commutation et de conduction. Si cette chaleur n'est pas dissipée efficacement, elle peut entraîner une surchauffe, réduisant ainsi la performance du convertisseur et pouvant causer des défaillances prématurées. Les causes courantes de surchauffe incluent des charges excessives, une ventilation inadéquate, des dissipateurs de chaleur insuffisants, et une conception thermique sous-optimale. Pour prévenir la surchauffe, il est essentiel d'incorporer des solutions de gestion thermique telles que des dissipateurs de chaleur de grande capacité, des ventilateurs, des caloducs, et des matériaux thermiquement conducteurs. De plus, l'utilisation de techniques de surveillance thermique en temps réel et de contrôles intelligents pour ajuster les paramètres de fonctionnement peut aider à maintenir les températures des composants dans des limites sûres, assurant ainsi une performance stable et une longue durée de vie pour les convertisseurs DC-AC.

Ainsi, le refroidissement des convertisseurs électriques DC-AC (ou onduleurs) est crucial pour leur performance et leur longévité. Voici un aperçu des méthodes courantes de refroidissement pour ces dispositifs :

## II.2 Refroidissement par air

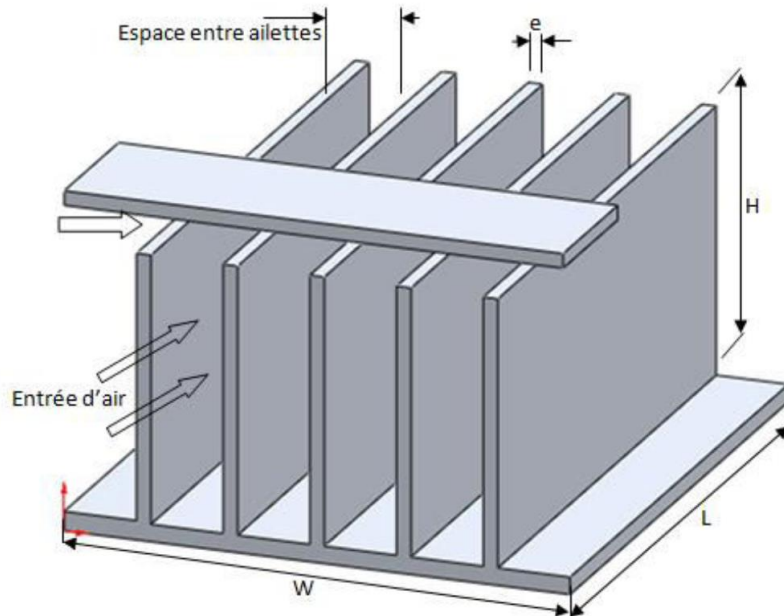
Suite à sa simplicité, sa facilité de mise en œuvre et son faible coût, la convection forcée et naturelle de l'air est le mode le plus couramment utilisé pour refroidir les composants électroniques.

### II.2.1 Dissipateurs thermiques (Refroidissement passif) :

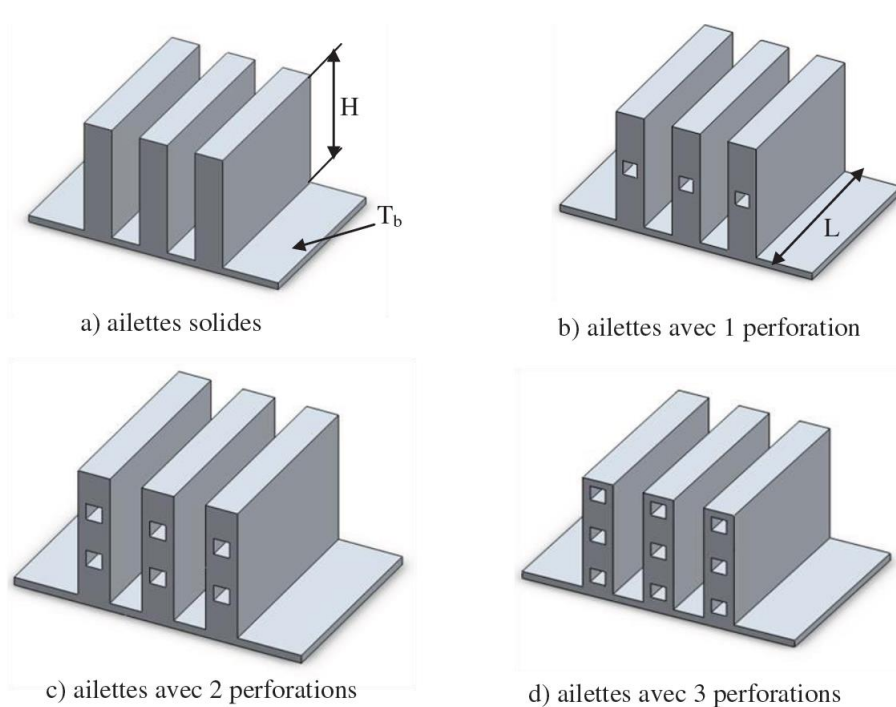
Les dissipateurs thermiques (ou radiateurs) sont des dispositifs utilisés pour améliorer la dissipation thermique des composants électroniques, tels que les convertisseurs électriques DC-AC. Le fonctionnement d'un dissipateur est simple : il consiste à augmenter la surface du composant en contact avec l'air, améliorant ainsi l'évacuation de la chaleur. Deux critères sont

à prendre en compte pour le choix d'un dissipateur : la forme du dissipateur et la résistance thermique.

Les composants du convertisseur, tels que les transistors de puissance, sont fixés à des radiateurs qui dissipent la chaleur dans l'air ambiant. Cela fonctionne bien pour les petits convertisseurs avec une faible densité de puissance.



**Figure II.1** : Dissipateur à ailettes planes



**Figure II.2 :** Dissipateur avec des ailettes solides et perforées

On trouve différents types de Dissipateurs Thermiques à savoir :

#### **a/Dissipateurs Thermiques à Ailettes**

**-Ailettes extrudées** : Fabriquées par extrusion d'aluminium, ces ailettes sont couramment utilisées en raison de leur coût relativement bas et de leur bonne conductivité thermique.

**-Ailettes fixées** : Les ailettes sont fixées à la base par divers moyens (brasage, collage, etc.). Elles peuvent être fabriquées à partir de différents matériaux pour optimiser la dissipation thermique.

#### **b/Dissipateurs Thermiques en Cuivre**

Le cuivre a une conductivité thermique plus élevée que l'aluminium, mais est plus coûteux et plus lourd. Les dissipateurs en cuivre sont souvent utilisés dans des applications où une dissipation thermique maximale est nécessaire.

### c/Dissipateurs Thermiques à Heat Pipes

Les caloducs (heat pipes) utilisent le changement de phase d'un fluide pour transférer rapidement la chaleur d'un point à un autre. Ils sont souvent intégrés dans des dissipateurs thermiques pour améliorer leur efficacité.



**Figure II.3 :** Dissipateurs Thermiques à Heat Pipes

### d/Dissipateurs Thermiques Actifs

Avec ventilateurs, ces dissipateurs incluent un ou plusieurs ventilateurs pour augmenter le flux d'air et améliorer la dissipation thermique. Ils sont utilisés dans des applications où la dissipation thermique passive n'est pas suffisante.



**Figure II.4 :** Dissipateur Thermiques Actif

### e/Dissipateurs Thermiques Intégrés

Intégrés dans les boîtiers des composants électroniques, ces dissipateurs sont conçus pour optimiser l'espace et simplifier l'assemblage.

**II.2.2 Ventilateurs** (Refroidissement actif) : Des ventilateurs sont utilisés pour augmenter le flux d'air sur les radiateurs, améliorant ainsi la dissipation thermique. Cette méthode est plus efficace que le refroidissement passif et est couramment utilisée dans les convertisseurs de moyenne à haute puissance. Il est à noter qu'il est crucial de choisir un ventilateur adapté afin d'assurer une dissipation thermique efficace et prolonger la durée de vie des composants. Cependant, il est essentiel de considérer les critères suivants pour sélectionner un ventilateur :

**a/ Débit d'air (CFM - Cubic Feet per Minute):**

Le débit d'air doit être suffisant pour dissiper la chaleur générée par l'onduleur. Plus la puissance de l'onduleur est élevée, plus le débit d'air requis sera important.

**b/Pression statique :**

Un ventilateur avec une bonne pression statique est nécessaire pour surmonter les pertes de charge dans le système de refroidissement, surtout si le chemin de l'air est complexe ou obstrué.

**c/Niveau sonore :**

Les ventilateurs plus puissants peuvent être bruyants. Si le bruit est un problème (par exemple, dans un environnement de bureau), recherchez des ventilateurs à faible bruit ou avec une technologie de réduction du bruit.

**d/Durabilité et fiabilité :**

Les ventilateurs doivent être robustes et capables de fonctionner en continu sur de longues périodes. Vérifiez les spécifications de MTBF (Mean Time Between Failures) pour avoir une idée de leur durée de vie.

**e/Taille et compatibilité :**

On doit s'assurer que les dimensions du ventilateur sont compatibles avec l'espace disponible dans ou autour de l'onduleur.

**f/Alimentation :**

On devrait vérifier la tension et le courant requis par le ventilateur. Ils doivent être compatibles avec les sorties de l'onduleur ou d'une source d'alimentation dédiée.

D'autre part, on distingue deux types de ventilateurs couramment utilisés à savoir :

**a/Ventilateurs axiaux :**

Idéals pour des applications nécessitant un flux d'air élevé et une faible pression statique. Ils sont souvent utilisés pour le refroidissement général des équipements électroniques.



**Figure II.5 :** Ventilateur axial

**b/Ventilateurs centrifuges (ou à soufflage radial) :**

Offrent une meilleure pression statique et sont efficaces pour des environnements avec des obstructions ou des restrictions d'air. Ils sont généralement plus bruyants mais plus efficaces pour des applications de refroidissement spécifiques.

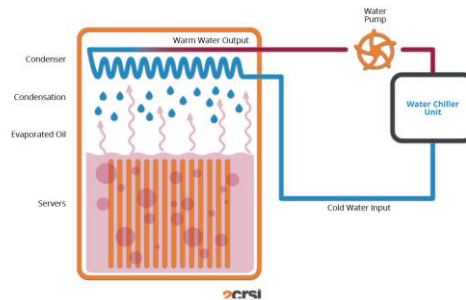


**Figure II.6 :** Ventilateur radial

## II.3 Refroidissement par liquide

**II.3.1 Refroidissement liquide direct** (Circulation de liquide): Un liquide de refroidissement, tel que l'eau ou un fluide de refroidissement spécial, est directement circulé sur les composants chauds pour évacuer la chaleur. Cette méthode est très efficace et est souvent utilisée dans les applications à haute puissance.

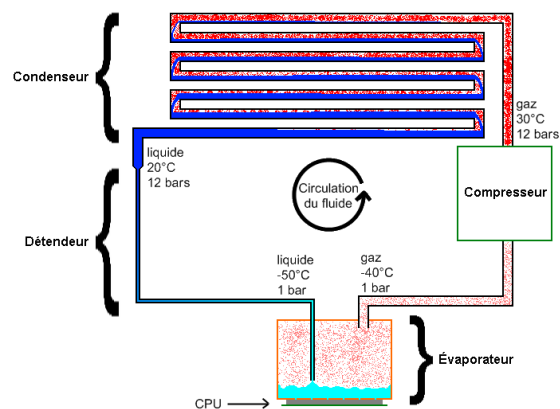
**II.3.2 Immersion dans des fluides diélectriques** (Refroidissement par immersion) : Les composants sont immergés dans un fluide diélectrique qui évacue la chaleur. Cette méthode est utilisée pour les convertisseurs de très haute puissance ou dans des environnements où le refroidissement par air est insuffisant.



**Figure II.7** : Refroidissement par immersion

## II.4 Refroidissement par changement de phase

Des caloducs sont utilisés pour transférer rapidement la chaleur des composants chauds vers des zones où elle peut être dissipée plus efficacement. Les caloducs utilisent le principe de changement de phase pour transférer la chaleur de manière très efficace.



**Figure II.8** : Schéma du principe de refroidissement par changement de phase

## II.5 Refroidissement thermoélectrique

Des modules thermoélectriques (modules Peltier) peuvent être utilisés pour créer un gradient de température qui permet de refroidir les composants. Cette méthode est moins courante en raison de son efficacité énergétique relativement faible et de son coût.



**Figure II.9 :** Ensemble de système de refroidissement Peltier thermoélectrique

## **II.6 Considérations pour le choix de la méthode de refroidissement**

**II.6.1 Puissance du convertisseur :** Les convertisseurs de haute puissance nécessitent généralement des méthodes de refroidissement plus sophistiquées et efficaces.

**II.6.2 Environnement d'utilisation :** Les convertisseurs utilisés dans des environnements sévères ou à haute température peuvent nécessiter des systèmes de refroidissement plus robustes.

**II.6.3 Fiabilité et maintenance :** Les systèmes de refroidissement par liquide nécessitent généralement plus de maintenance que les systèmes de refroidissement par air.

**II.6.4 Coût :** Les solutions de refroidissement plus complexes, comme le refroidissement liquide, peuvent être plus coûteuses à mettre en œuvre.

### **Conclusion :**

Le choix de la méthode de refroidissement pour un convertisseur DC-AC dépend de nombreux facteurs, dont la puissance, l'environnement d'utilisation, la fiabilité requise et le coût. Un bon refroidissement est essentiel pour assurer la performance et la longévité du convertisseur.



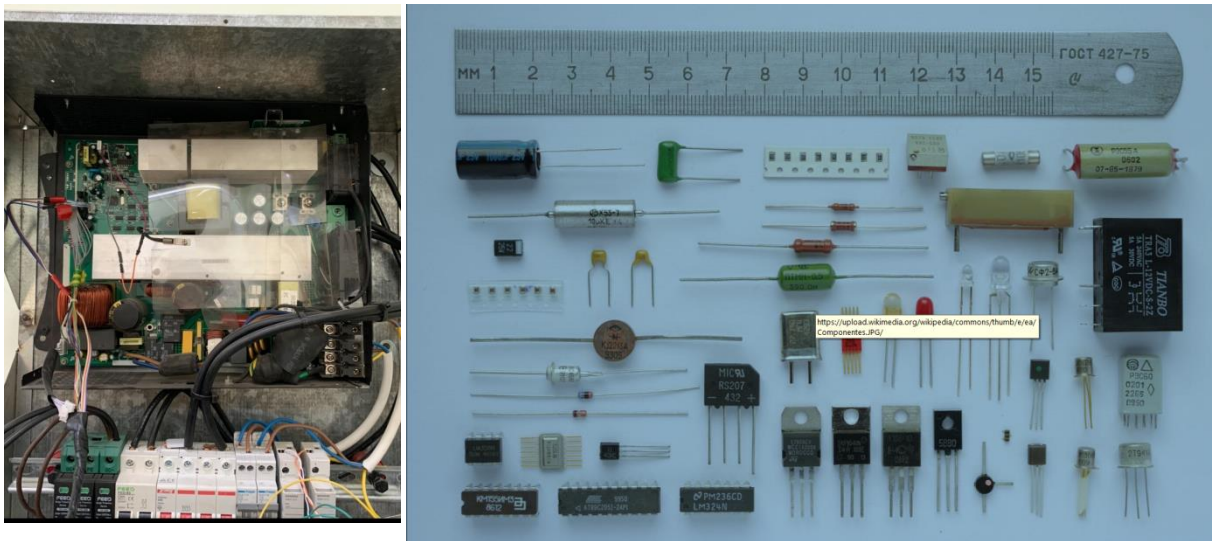
**Chapitre III :**  
*Formulation mathématique et*  
*Modélisation Numérique.*

### III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, on représente le modèle physique du Convertisseur électrique étudié (sa géométrie) et le modèle mathématique basé sur les équations de la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et d'énergie régissant le comportement dynamique et thermique du système, ainsi que l'outil numérique utilisé pour modéliser le problème étudié.

### III.2. Description du Convertisseur étudié :

Un convertisseur électrique DC-AC, couramment appelé onduleur, est un appareil sophistiqué qui transforme le courant continu (DC) en courant alternatif (AC). Il comprend plusieurs composants essentiels. Les transistors de puissance comme les IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) ou les MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) sont cruciaux, car ils effectuent la commutation rapide nécessaire pour générer l'onde AC. Le circuit de commande joue un rôle clé en contrôlant ces transistors, assurant une conversion précise et stable du courant. Les oscillateurs produisent les signaux de fréquence qui définissent le rythme de la conversion. Le transformateur est souvent utilisé pour ajuster la tension de sortie à un niveau approprié. Les filtres sont intégrés pour lisser l'onde sinusoïdale générée et éliminer les bruits et les harmoniques indésirables. Des circuits de protection sont inclus pour protéger contre les surcharges, les courts-circuits et les surtensions, garantissant la sécurité et la fiabilité du système. Enfin, des condensateurs et des inductances sont utilisés pour stabiliser le courant et améliorer la qualité de la sortie AC.



**Figure III.1 :** Convertisseur réalisé au niveau du LHAE-UAT et la taille des composants électroniques utilisés

Cependant, un tel appareil est complexe et plein de composants électroniques comme montre clairement la Figure III.1. Il serait donc souhaitable de simplifier le problème et de prendre en considération quelques composants lors du calcul énergétique. Ainsi, le problème considéré est représentée sur la figure III.2 et la Figure III.3. D'autre part, les dimensions ainsi que les Caractéristiques des composants du convertisseur sont exposés respectivement dans les tableaux 3.1 et 3.2.

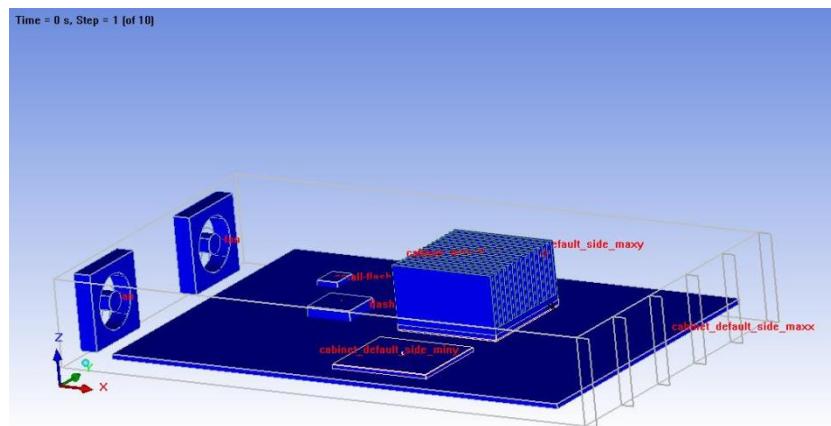


Figure III. 2 : Représentation du convertisseur considérée en 3D.

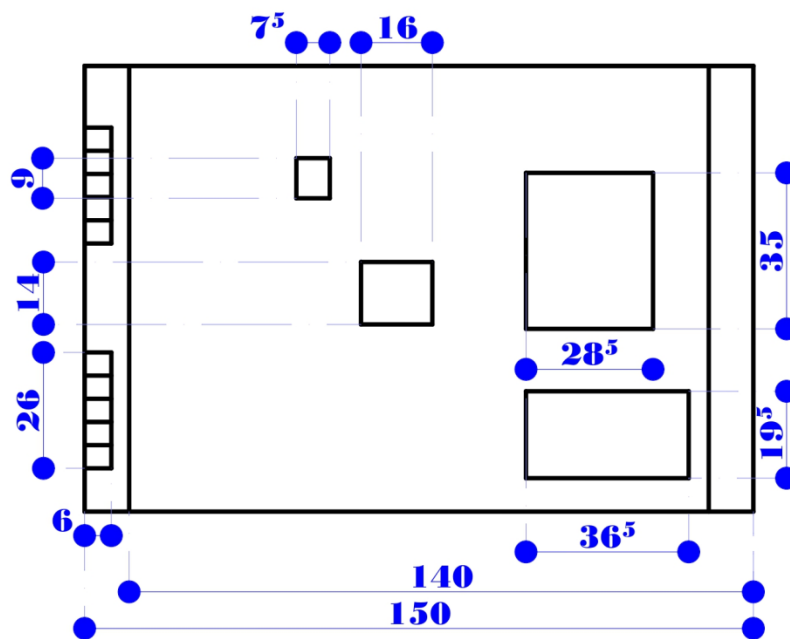


Figure III. 3 : Schéma de la configuration considérée en 2D.

Tableau III.1 : Rendement des différentes technologies

Composant	Dimension (mm) (X×Y×Z)	Centre (mm) (X×Y×Z)
Cabinet	150×100×20	
Planche (Board)	140×100×1.53	
Ventilateur côté droit (Right-fan)	26×6	(-25, -20, 10)
Ventilateur côté gauche (Left-fan)	26×6	(-25, -80, 10)
Dissipateur	36.5×19.5×4.03	(55.75, -9.75, 2.05)
Noyau (source de chaleur)	37.5×37.5×1.35	(92.75, 38.25, 1.53)
Pont (Bridge)	35.5×28.5×1.53	(91.75, -82.25, 1.53)
Petit flash (Small flash)	7.5×9×1.8	(26.45, -20.2, 2.43)
Grand flash (Large flash)	16×14×3.5	(45, -46, 3.28)
Filtre	H=100 L=20	

Tableau III.2 : Caractéristiques des composants utilisés

Composant	Caractéristiques	Puissance/Debit/Pression	
Dissipateur	<ul style="list-style-type: none"> <li>15 ailettes</li> </ul>		
Noyau	<ul style="list-style-type: none"> <li>Epaisseur du colis :2.5 mm</li> <li>Matériel solide Pb 50 Sn 50</li> <li>type de model : détaillée</li> </ul>	2.5W	
Ventilateurs (Fan)	<ul style="list-style-type: none"> <li>3D</li> <li>Circulaire</li> <li>Type de fluide non linéaire</li> <li>Direction de fluide normale</li> <li>Température total ambiante</li> </ul>	Débit 0 0.3 0.8 1.25 1.45 1.75	Pression 0.03 0.26 0.18 0.1 0.25 0
Pont (bridge)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Epaisseur du colis 2.15 mm</li> <li>Type de model : modèle de conduction compact (CCM)</li> </ul>	2.5W	

	<ul style="list-style-type: none"> <li>Matériel de ball : Matériel solide Pb 50 Sn 50</li> </ul>	
<b>Grand flash (Large flash)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Type de block : solide</li> </ul>	0.5W
<b>Petit flash (Small flash)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Type de block : solide</li> </ul>	0.25W

### III.3. Formulation mathématique :

La formulation mathématique qui gouverne les phénomènes de convection est basée sur les principes de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et d'énergie. Anderson [79], Patankar [80]

#### III.3.1. Hypothèses simplificatrices :

- Le fluide est supposé Newtonien et incompressible ;
- L'écoulement est turbulent et stationnaire ;
- Les Propriétés thermo-physiques du fluide et du solide sont considérées constantes ;
- Les profils de vitesse et de température sont uniformes à l'entrée ;
- Le rayonnement thermique est négligeable.

#### III.3.2. Equations gouvernantes :

##### 1- Equation de continuité :

Elle repose sur le principe de conservation de masse :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (3.1)$$

##### 2- Equation de la quantité de mouvement :

Elle est déduite de la deuxième loi de la dynamique, qui stipule que la variation de la quantité de mouvement d'une particule fluide est égale à la somme des forces extérieures agissant sur cette particule :

$$\rho u_j \frac{\partial (u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \mu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] - \frac{\partial P}{\partial x_i} \quad (3.2)$$

**3- Equation d'énergie :**

Elle est obtenue en appliquant le premier principe de la thermodynamique pour un fluide Newtonien incompressible :

$$\rho u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] + S_e \quad (3.3)$$

$S_e$  : Est le terme de source électrique qui peut être exprimé en fonction de la dissipation de l'énergie électrique dans le fluide.

**III.4. Rappels sur la turbulence :**

Le phénomène de la turbulence est largement présent dans plusieurs applications industrielles ; nous citons, l'aérodynamique externe des voitures, des avions, des trains...ou encore dans la combustion dans les moteurs, les échangeurs de chaleur... etc.

L'écoulement turbulent, décrit expérimentalement pour la première fois par Osborne Reynolds en 1883, est caractérisé principalement par :

- Une grande variété des échelles spatiales (tailles de tourbillons) dans l'écoulement,
- Un caractère aléatoire, désordonné, chaotique, et fluctuant,
- Une imprévisibilité, un non déterminisme et une grande sensibilité aux conditions aux limites,
- Une très large gamme de longueur d'ondes : tourbillons présents de tailles très variées (pour un avion : de quelques microns à quelques centaines de mètres),
- Un caractère bruyant du fait des sources acoustiques créées par les fluctuations de pression dans le fluide.

**III-5- Modélisation Numérique :**

Le modèle mathématique est alors constitué d'un système d'équations complété par des conditions aux limites. Les équations de bilan sont donc connues mais :

- ✓ La résolution analytique de ces équations de bilan n'est pratiquement jamais réalisable.
- ✓ Les non-linéarités visibles dans les équations sont principalement à l'origine des difficultés pour obtenir une solution analytique.

Donc, l'utilisation des méthodes numériques s'avère indispensable pour la résolution du système d'équations obtenu. Dans notre étude, on a utilisé le code CFD ANSYS Icepak 19.2,

basé sur la méthode des volumes finis, pour résoudre les équations 3.1, 3.2 et 3.3 qui régissent ce problème.

### III.5.1 Logiciel de calcul utilisé :

Dans ce projet on a utilisé le code de calcul ‘**Ansys Icepack**’, c’est un logiciel de simulation complet conçu pour le refroidissement électronique et la gestion thermique. Il offre des capacités avancées pour modéliser et analyser divers modes de transfert de chaleur, tels que la conduction, la convection et le rayonnement, afin de prédire l’écoulement d’air, la température et le transfert de chaleur dans les boîtiers de circuits intégrés, les cartes de circuits imprimés (PCB), les ensembles électroniques et l’électronique de puissance.

- **Caractéristiques clés et Applications**

- a. Modélisation et Simulation Thermique : Ansys Icepak simule le comportement thermique dans les systèmes électroniques, permettant la prédiction de la température et du transfert de chaleur. Il peut gérer des géométries complexes et inclut des schémas de maillage et de résolution avancés pour des résultats précis.
- b. Couplage Électromagnétique et Thermique: Le logiciel permet la simulation des interactions électromagnétiques et thermiques, essentielles pour garantir la stabilité thermique des systèmes équipés d’antennes, tels que l’infrastructure 5G, les radars automobiles, les appareils IoT et les appareils électroniques mobiles.
- c. Couplage Électrothermique au Niveau de la Carte: Ansys Icepak peut être combiné avec SIwave pour effectuer des simulations d’intégrité de puissance, ce qui aide à gérer la chaleur produite par les conceptions et à prédire les performances thermiques et les températures de fonctionnement sûres.
- d. Intégration avec Ansys Fluent et AEDT: Icepak utilise le package de calcul Ansys Fluent et est intégré à l’interface utilisateur graphique Ansys Electronics Desktop (AEDT), facilitant ainsi son utilisation et l’exploitation de capacités avancées.

### III.5.2 Maillage :

Icepak propose deux générateurs de maillage différents, hexa-dominant, qui est l’option par défaut, et hexaédrique. Hexa-dominant est un générateur de maillage non structuré, qui utilise des cellules pyramidales et triangulaires en plus des cellules hexaédriques, ce qui lui permet d’être utilisé pour une large gamme de formes et de tailles. Le Guide de l’utilisateur Icepak (ANSYS, 2019) recommande d’utiliser le générateur de maillage hexa-dominant pour la

plupart des applications, car il peut faire tout ce qui peut être fait par le générateur de maillage hexaédrique. Cependant, dans cette analyse, le générateur de maillage hexa-dominant, ou Mesher-HD, est utilisé.

Icepak offre la possibilité de créer des structures de maillage non conformes en utilisant l'option "Assemblage". Différents objets peuvent être regroupés dans le même assemblage et ces assemblages peuvent se voir attribuer des paramètres de maillage différents du reste du domaine. Cela permet à l'utilisateur de générer un maillage plus fin à l'intérieur et autour des assemblages, ce qui est le plus nécessaire en cas de fluctuations de température et de vitesse, et un maillage grossier dans les zones où une résolution moindre est suffisante. De cette manière, le nombre total d'éléments peut être réduit sans affecter les résultats. Les assemblages évitent également ce qu'on appelle "le saignement de maillage", un phénomène illustré dans la Figure III.4. Le saignement de maillage se produit lorsque différentes parties du modèle se voient attribuer différentes densités de maillage, et un maillage de densité plus élevée affecte d'autres parties du modèle.



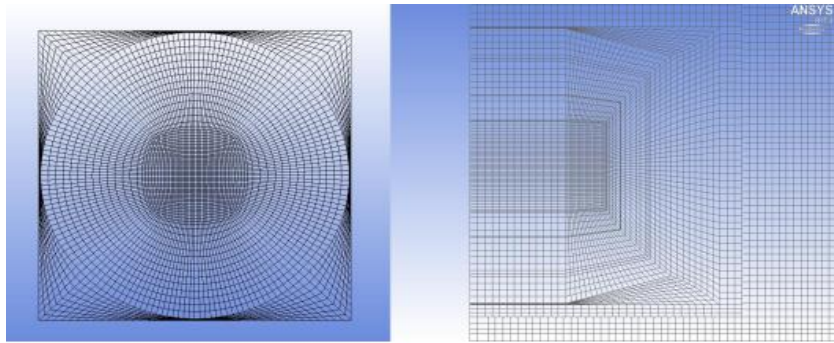
**Figure III.4** : Exemple de saignement de maillage

Lors de la création d'un assemblage, Icepak propose une option appelée "Marge de manœuvre" pour rendre l'assemblage plus grand que les objets qu'il contient. De cette manière, une densité de maillage différente peut être créée non seulement sur l'objet, mais également autour de celui-ci. Cela permet également de résoudre les zones où le transfert de chaleur se produit ; par conséquent, un maillage plus fin est nécessaire.



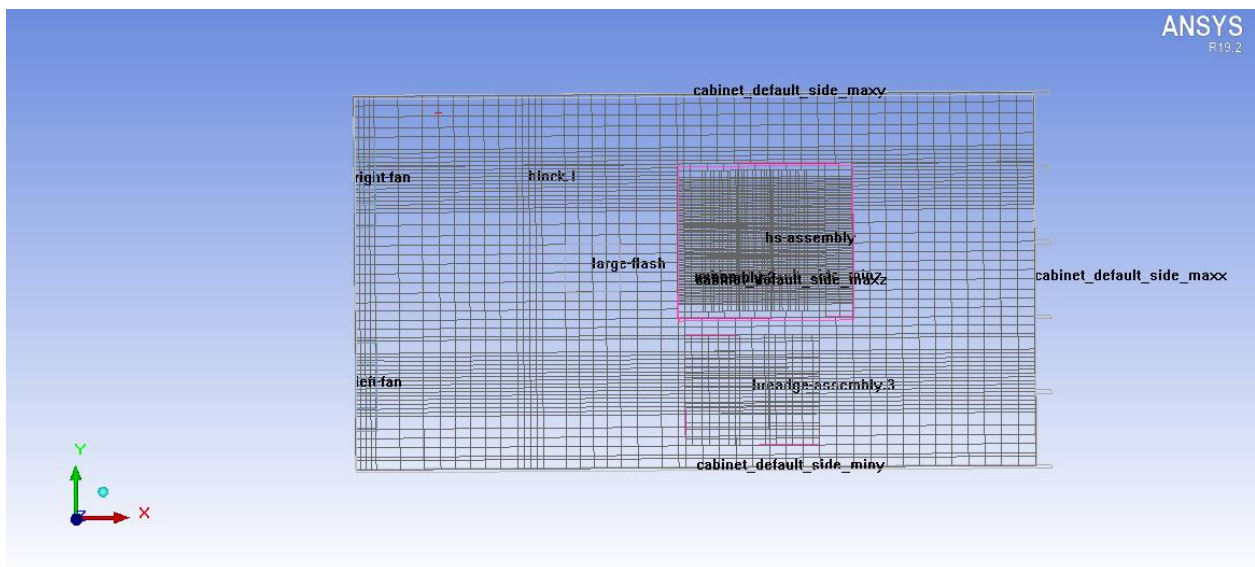
Chaque ventilateur à l'intérieur du Convertisseur est placé dans un assemblage car des fluctuations de vitesse sont présentes aux entrées et dans les sillages des ventilateurs. Deux ventilateurs à l'entrée du Convertisseur sont dans le même assemblage pour éviter que des saignements de maillage ne se produisent dans l'espace entre eux avec deux assemblages différents.

Par défaut, Icepak crée une structure de maillage en grille O sur les ventilateurs et un maillage fin dans leur sillage, comme illustré dans la Figure III.5.



**Figure III.5 :** "Exemple de maillage en forme de grille O sur un ventilateur et maillage fin dans son sillage vu de dessus."

Un maillage plus grossier est généré pour le reste du convertisseur avec une taille maximale d'élément de 0.005mm pour x, y 0.00275mm et z 0.00075mm. Dans l'ensemble, le nombre total d'éléments de maillage pour le convertisseur est de 180076 (Figure III.6 et Figure III.7)



**Figure III.6 :** Maillage du Convertisseur (2D)

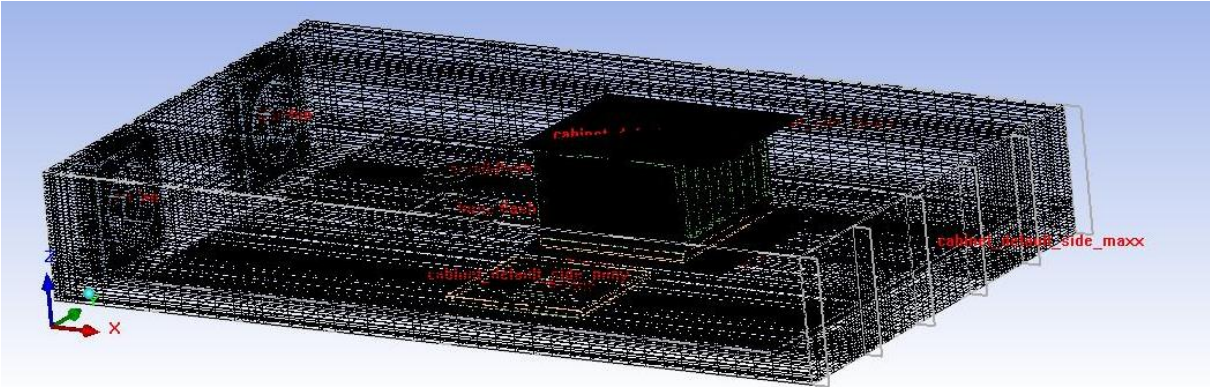


Figure III.7 : Maillage du Convertisseur (3D)

**Chapitre IV :**  
*Résultats et Discussion*

### IV.3 Résultats et Discussion :

Les résultats obtenus par simulation numérique par CFD et leur analyse jouent un rôle crucial dans l'étude du problème de refroidissement du convertisseur. Ceci nous a permis de visualiser les flux d'air, les gradients de température et les performances thermiques à l'intérieur du cabinet. Les discussions basées sur ces résultats mettent en lumière sur l'efficacité de la ventilation et l'impact sur la dissipation thermique.

#### IV.3.1 Convergence de la solution

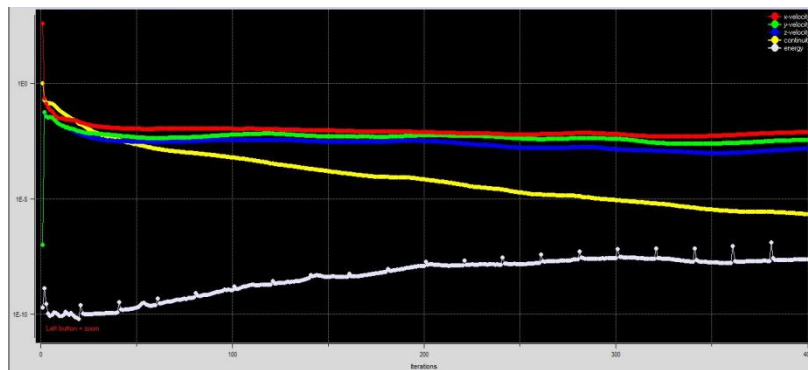


Figure IV.1 : Historique de convergence

La figure IV.1 décrit l'historique de convergence de la solution et illustre la diminution progressive de l'erreur résiduelle au fil des itérations. Sur l'axe vertical, on trouve l'échelle logarithmique de l'erreur résiduelle, tandis que l'axe horizontal représente le nombre d'itérations. La courbe montre une forte décroissance initiale de l'erreur, suivie d'une stabilisation progressive au cours du temps.

#### IV.3.2 Champ de vitesse

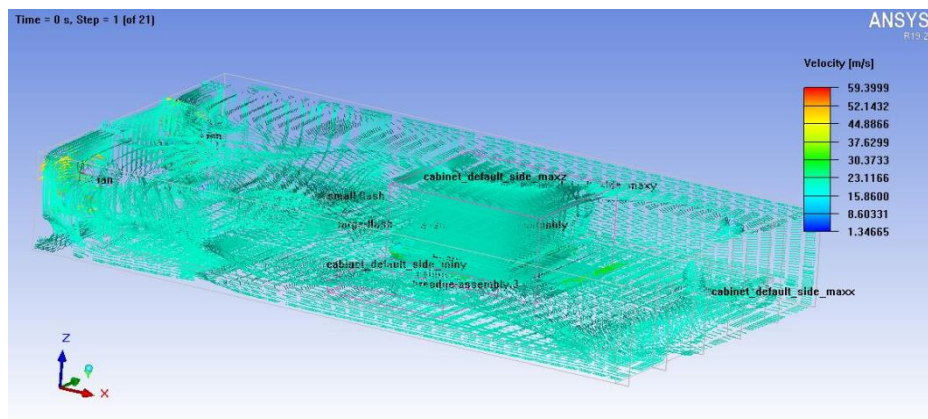
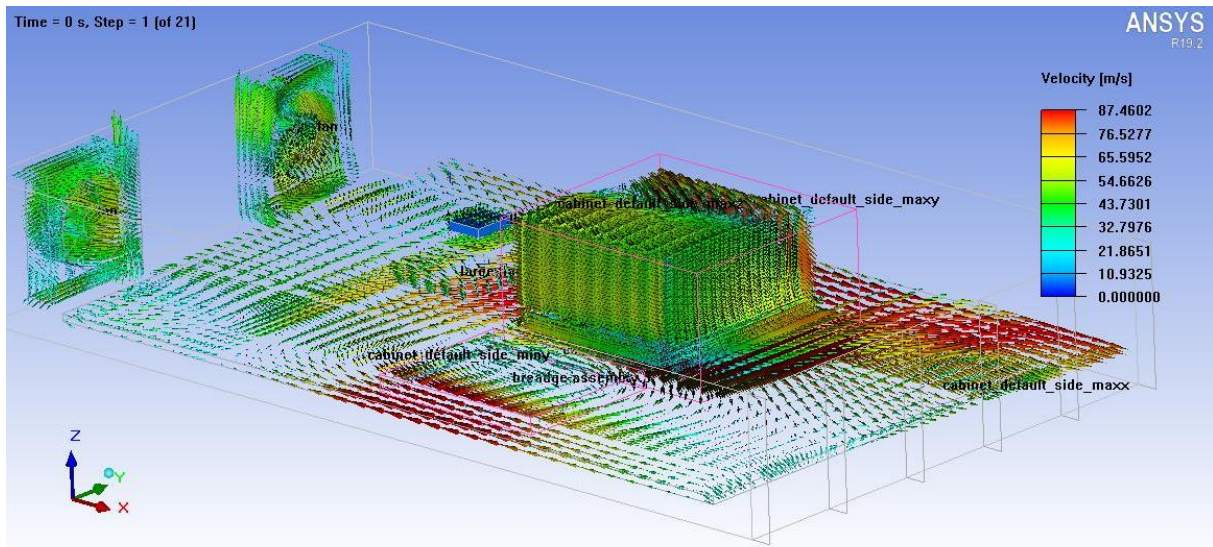


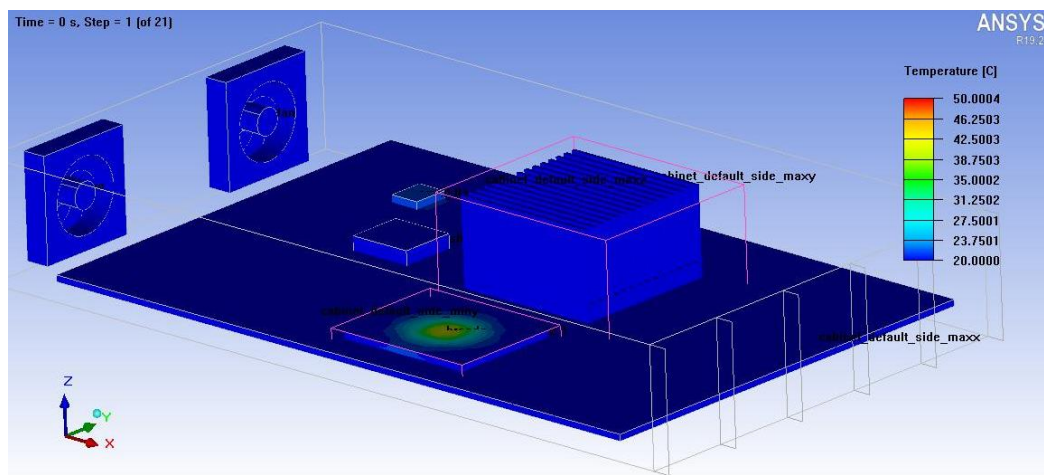
Figure IV.2 : Champ de vitesse total dans le convertisseur



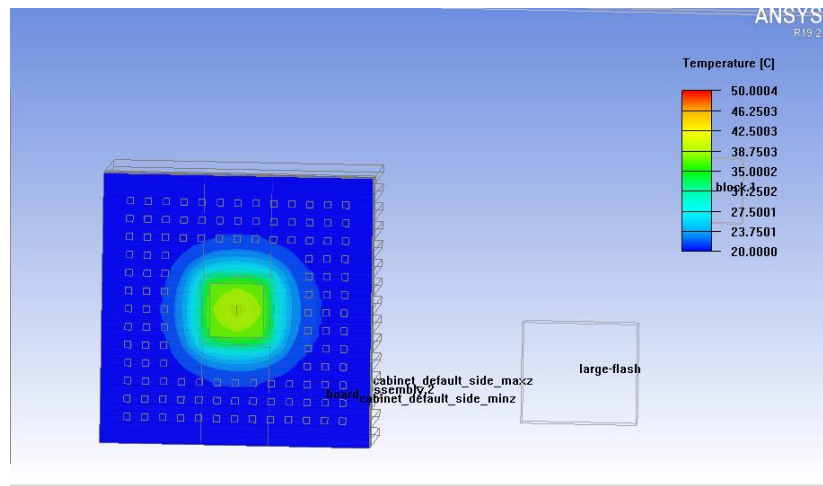
**Figure IV.3 :** Champ de vitesse partielle dans le convertisseur

Les figures IV.2 et IV.3 du champ de vitesse calculé numériquement dans ce cabinet contenant deux ventilateurs et un dissipateur thermique montre la distribution des vecteurs de vitesse de l'air à l'intérieur du système. Les ventilateurs génèrent des flux d'air visibles sous forme de jets dirigés, indiquant les zones de haute vitesse. Autour du dissipateur, on observe des variations de vitesse dues à l'interaction entre les flux d'air et les ailettes du dissipateur, qui créent des motifs de recirculation et de turbulence. Les zones de basse vitesse près des coins du cabinet peuvent indiquer des régions de stagnation ou de circulation inefficace. Ces figures permettent d'analyser l'efficacité du refroidissement, en identifiant les zones bien ventilées et celles nécessitant des ajustements pour améliorer la dissipation thermique.

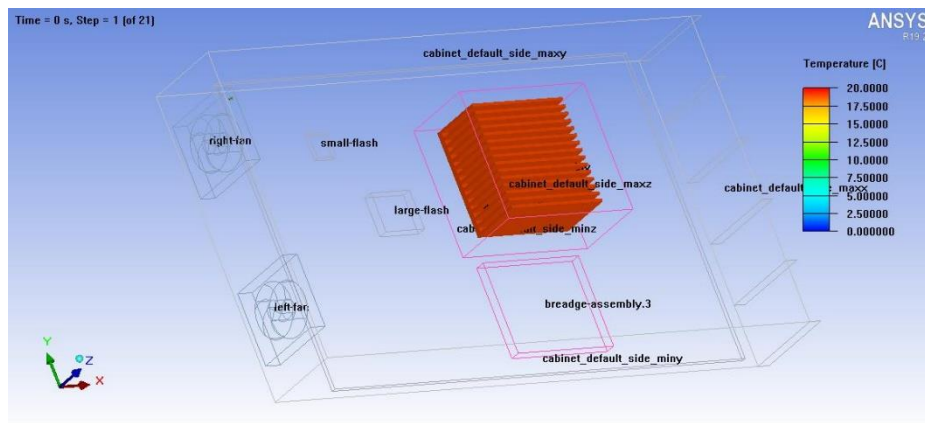
### IV.3.3 Champ de Température



**Figure IV.4:** Champ de température partielle dans le convertisseur

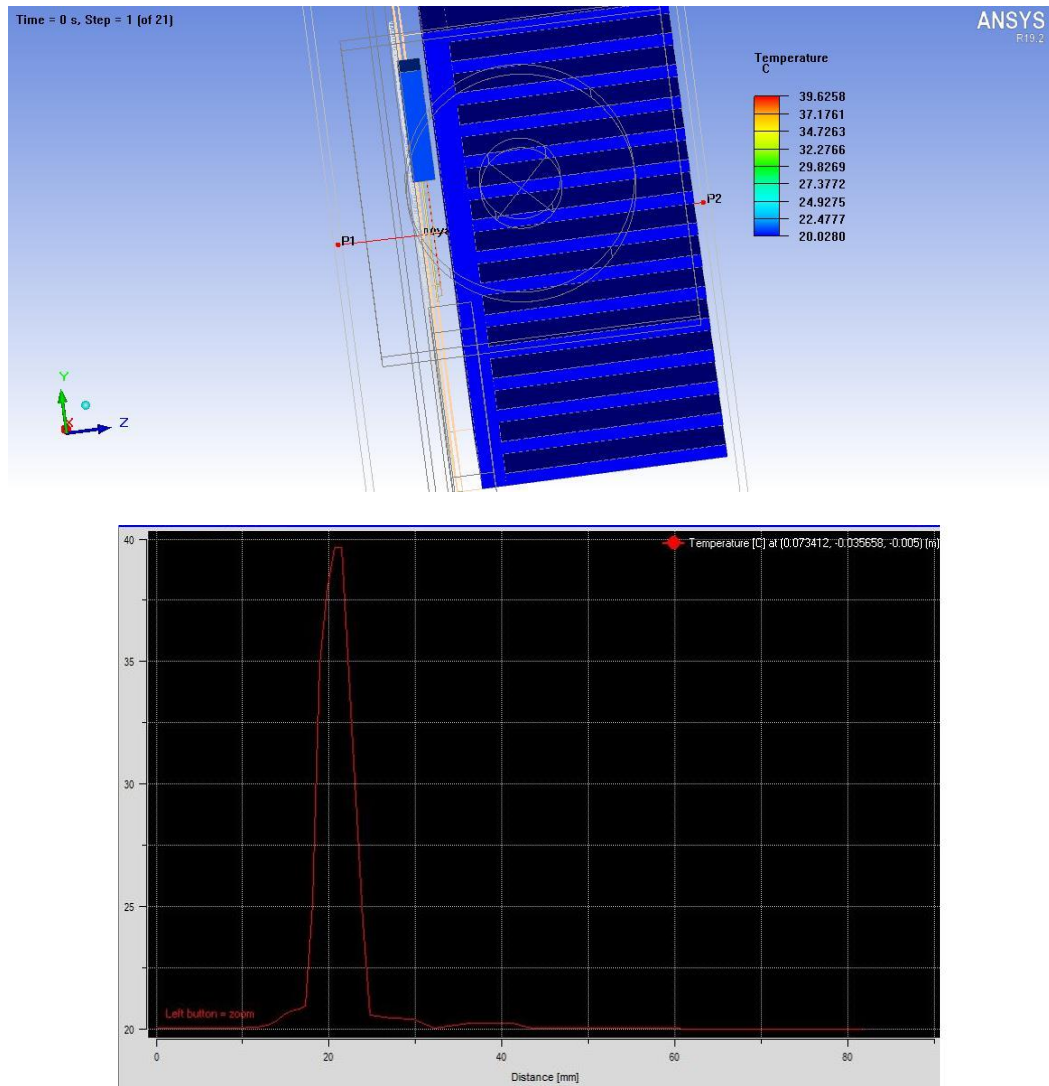


**Figure IV.5** : Champ de température du noyau



**Figure IV.6** : Champ de température du dissipateur

Les figures IV.5 et IV.6 du champ de température calculé montrent la distribution thermique à l'intérieur du système. Les couleurs chaudes (rouge, orange) indiquent les zones de haute température concentrées autour du noyau chaud, tandis que les couleurs froides (bleu, vert) représentent les zones de basse température. Au-dessus du noyau chaud, le dissipateur montre un gradient de température, avec des températures plus élevées à sa base et diminuant vers ses extrémités, illustrant l'efficacité de la dissipation thermique. Les variations de température à travers le cabinet révèlent l'influence de la convection induite par le dissipateur et les éventuels points chauds où le flux d'air est insuffisant.

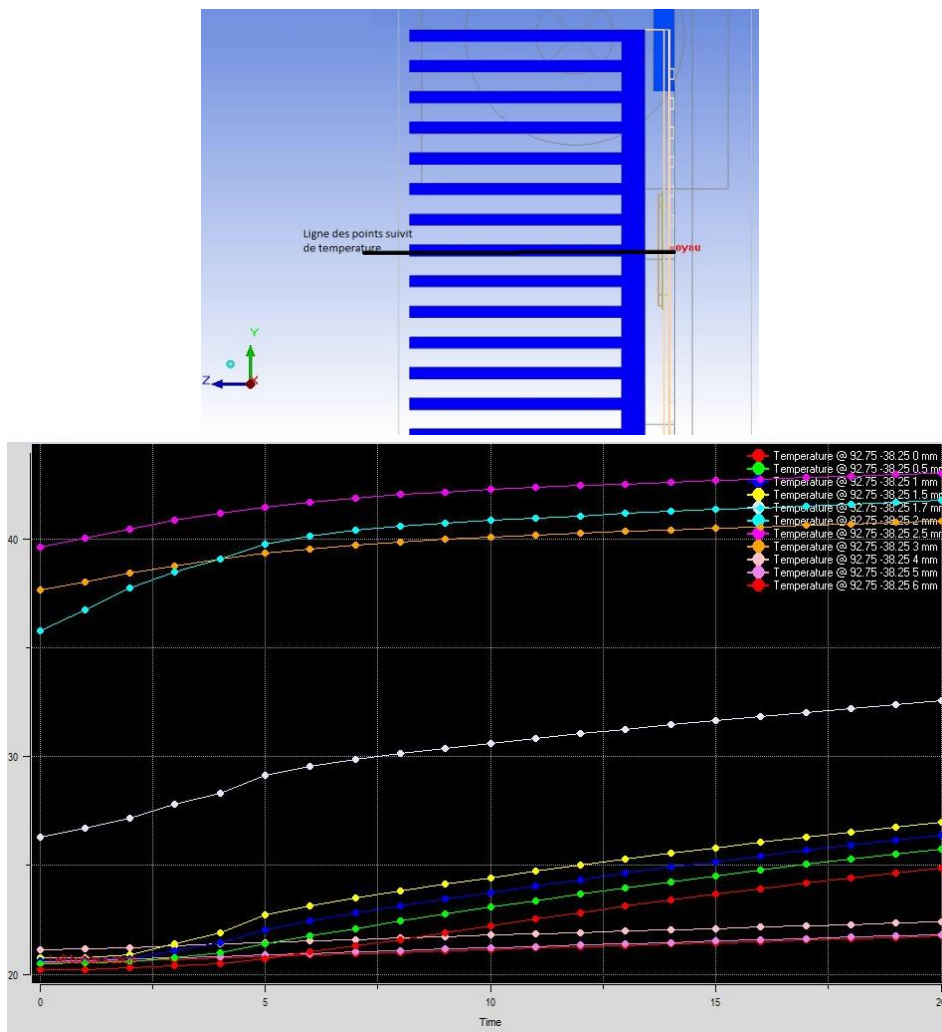


**Figure IV.7 :** Distribution de la température de la ligne P<sub>1</sub>P<sub>2</sub> traversant le noyau et le dissipateur

La figure IV.7 montre la distribution de la température le long d'une ligne traversant un noyau chaud et un dissipateur. Sur l'axe horizontal, on observe la position le long de la ligne de traversée, tandis que l'axe vertical représente la température. La courbe de température commence à une valeur élevée au niveau du noyau chaud, indiquant une concentration de chaleur. À mesure que la ligne traverse le dissipateur, la température décroît progressivement, démontrant l'efficacité du dissipateur à évacuer la chaleur.

La figure IV.8 montrant l'évolution de la température au cours du temps le long d'une ligne traversant un noyau (initialement froid puis se chauffant) et un dissipateur. Sur l'axe horizontal, le temps est représenté, tandis que l'axe vertical indique la température. Au début, la courbe de température reste basse, reflétant l'état initialement froid du noyau. À mesure que le noyau se chauffe, la courbe montre une augmentation progressive de la température. La présence du

dissipateur se manifeste par des gradients de température moins abrupts, indiquant son rôle dans la dissipation de la chaleur. Les stabilisations de la courbe permettent d'évaluer l'efficacité temporelle du dissipateur à gérer l'élévation thermique du noyau. Cette figure peut permettre d'analyser les performances transitoires de dissipation thermique et d'identifier les moments critiques de refroidissement dans le système.



**Figure IV.8 :** Evolution de la température au cours du temps le long d'une ligne traversant un noyau chaud et un dissipateur



### CONCLUSION GENERALE

Le projet nous a permis d'approfondir la compréhension et l'étude des techniques de dissipation thermique dans ces systèmes essentiels à la conversion de l'énergie électrique. Les convertisseurs électriques, étant des composants critiques dans diverses applications industrielles et domestiques, nécessitent une gestion thermique efficace pour assurer leur fiabilité, performance et longévité.

Une analyse comparative des différentes techniques de refroidissement, telles que le refroidissement par air, par liquide, et les technologies de refroidissement avancées ont été abordées.

Un modèle thermique détaillé basé sur la résolution des équations de Navier-Stokes et l'équation d'énergie a été entrepris pour simuler le comportement thermique des convertisseurs, ceci par l'utilisation du code commercial Ansys Icepak. Ce modèle nous a permis de prédire les points chauds et d'investiguer la distribution thermique, aidant ainsi à concevoir des systèmes de refroidissement plus efficaces.

L'amélioration des techniques de refroidissement peut directement contribuer à une augmentation de la fiabilité et de la durée de vie des convertisseurs électriques. Une meilleure gestion thermique peut également permettre d'améliorer les performances globales des systèmes, en réduisant les pertes thermiques et en augmentant l'efficacité énergétique.

Ce projet ouvre la voie à plusieurs axes de recherche futurs. Il serait bénéfique de continuer à explorer les nouvelles technologies de matériaux et de nanotechnologies pour le refroidissement. De plus, l'intégration de systèmes de refroidissement intelligents, capables d'adapter dynamiquement leur performance en fonction des conditions de fonctionnement, pourrait représenter une avancée significative.

En conclusion, le projet a non seulement permis de résoudre plusieurs défis liés au refroidissement des convertisseurs électriques, mais il a également établi une base solide pour des recherches et des innovations futures dans ce domaine crucial de l'électronique de puissance.

**REFERENCES**  
**BIBLIOGRAPHIQUES**

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

[4] : C. Bernard « station solaire autonome pour l'alimentation station pompage » l'archive ouverte pluridisciplinaire HAL 2006].

[5] : A. Hammidat Hadj arab et M.T BOUKADOUM « performance et cout des systèmes de pompage PV en ALGERIE » (2005).

[6] : Philippe Guibert : «TP Energie Solaire » Université pierre et marie curie : Master Energétique et Environnement.

[7] : N. HOUCINE ; Etude de gestion d'une mini-centrale solaire et mise au point d'un dispositif automatique de mesures, contrôle et régulation de l'énergie électrique. Thèse de Doctorat.Université de la science et de la technologie d'Oran Mohammed Boudiaf, Juin 2016.

[8] : Site internet :

[http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Le\\_photovolta%C3%AFque\\_sous\\_concentration](http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Le_photovolta%C3%AFque_sous_concentration)

[10] : M. BELHADJ ; Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome Mémoire de Magister ; Centre Universitaire De Bechar ; 2008.

[11] : M. BENGHANEM. Etude de la performance des systèmes photovoltaïque autonomes Travaillant à poste fixe. Thèse de Doctorat, U.S.T.H.B, avril 1999.

[12] : B. EQUER. Energie solaire photovoltaïque. Volume I – Physique et technologie de la conversion photovoltaïque. CNRS. Edition ellipses, 1993.

[13]: M. BURESCH. Photovoltaic energy systems. McGraw-Hill U.S.A, 1983.

[14]: F. Lasnier, T. G. Ang, « Photovoltaic Engineering Handbook », IOP Publishing Ltd.1980.ISBN 0-85274-311-4.

[15] : E. BUCHET. Etude du dimensionnement et développement d'un logiciel d'aide à la conception de système de production d'énergie utilisant la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire, Thèse de Doctorat, Faculté de Science et Technique de Saint-Jérôme, d'Aix Marseille, juillet 1988.

[16] : A. HADJ ARAB. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque de faible puissance, Thèse de magister, H.C.R, décembre 1989.

[17]: [www.solarelectripower.org](http://www.solarelectripower.org).

[18]: F. Lasnier, T. G. Ang, « Photovoltaic Engineering Handbook », IOP Publishing Ltd. 1980.ISBN 0-85274-311-4.

[19] : F. Bouchtouche cherfa « Etude et réalisation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau de distribution électrique BT ». Mémoire de magister, Ecole National Polytechnique Elharach, 2004.

[20] : GOAR Noureddine, MAHMOUDI Abdelkader, " Réalisation d'un convertisseur DC/DC dans une chaine de conversion d'énergie photovoltaïque ", Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi, Juin 2017.

[21] : GUEDAOURIA H., " Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour alimenter le laboratoire LPDS au sien de l'université de Béchar ", Mémoire de Master, Université Tahri Mohammed Bechar, 2017.

[22] : H. Yotto « Etude et conception d'une mini centrale PV » mémoire fin d'études Master 2 IE Bénin 2011

[23] <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&définition=3166>

[24] A. FOUILLE, « électrotechnique à l'usage des ingénieurs », Livre. Ecole nationald'ingénieurs.

[25] A. GADOUM ; N. HAMRAOUI « Analyse des Convertisseur des convertisseurs indirect à structure matriciel »pro 2010-2011 ; Master2.

[26] N. TAIB, « Application des Convertisseurs Matriciels à la Commande des Machines à Courants Alternatif » Thèse de Magistère à université de A. MIRA de BEJAIA.

[27] Saul Lopez Arevalo, « Matrix Converter for Frequency Changing Power Supply Applications » Docteur, université de Nottingham, janvier 2008.

[28] F. GRUSON « Modulation Naturelle Généralisé des Convertisseurs Matriciels pour la variation de Vitesse » Thèse Doctorat. Ecole centrale de LILLE septembre 2010.

[29] Axel SCHUSTER, « COMMANDE, RÉGLAGE ET OPTIMISATION D'UN CONVERTISSEUR MATRICIEL POUR ENTRAINEMENTS PAR MOTEUR ASYNCHRONE », Thèse doctorat, 1998, résumé.

- [30] L.AIT OUBELLI « MISE EN OEUVRE D'UN MODÈLE GÉNÉRIQUE DU CONVERTISSEUR MATRICIEL DANS LES ENVIRONNEMENTS EMTP-RV ET MATLAB-SIMULINK » Maitrise Décembre 2011.
- [31] A. DENDOUGA « CONTROLE DES PUISSANCE ACTIVE ET REACTIVE DE LA MACHINE A DOUBLE ALIMENTATION (DFIM) », Thèse Doctorat, BATNA, 10/02/2010.
- [32] M. SLAOUATI ; A. LARADI, « Contrôle Direct du couple d'une Machine Asynchrone Alimentée par un Convertisseur Direct AC-AC » thème ingénieur .pro 2006-2007.
- [33] N. TAIB, « Utilisation des Convertisseurs Matriciels dans les Système de Protection de Production d'Energie » Thèse de Doctorat à université de A. MIRA de BEJAIA. En 2012.
- [45] I. Ishihara \*, T. Fukui, R. Matsumoto, Natural convection in a vertical rectangular enclosure with symmetrically localized heating and cooling zones, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol.23, pp. 366–372 (2002).
- [46] Help Fluent (6.3.26).
- [47] M. Hasnaoui, E. Bilgen, P. Vasseur, Natural convection heat transfer in rectangular cavities partially heated from below, J. Thermophys. Heat Transfer, Vol. 6, pp. 255-264 (1992).
- [48] B. Baudouy, étude thermo-hydraulique d'un thermosiphon en hélium diphasique et en configuration horizontale, Laboratoire de Cryogénie et Station d'Essai, Stage réalisé du 05/07/2010 au 19/12/2010, CEA Saclay.
- [49] N. Belghoul, Modélisation et simulation de la convection due à un champ de force externe dans des cavités : Convection Naturelle, MHD et Marangoni, mémoire de master.