

N° Ordre...../DGM/FT/UMBB/2020

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGUERA BOUMERDES



Faculté de Technologie
Département Génie Mécanique

Mémoire de Fin D'études

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : ENERGETIQUE

Thème

Simulation d'une centrale hybride solaire-gaz

Présenté par :

-MOUHAMOU Lamia
-SALEM CHERIF Ikram

Promoteur : Mr T.BOUSHAKI

Promotion 2019- 2020

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, merci pour le grand DIEU qui nous a donné la volonté et le courage pour parachever ce travail.

Ce travail a été réalisé à l'université « M'Hammed Bougara » de Boumerdès.

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance à Monsieur T.BOUSHAKI enseignant à l'université de Boumerdès Pour avoir dirigé ce mémoire, pour son suivi permanent, ses lectures attentives, ses conseils judicieux et le soutien constant qu'il nous 'a prodigué au cours de ce travail.

Nous prions tous les professeurs du département de Génie mécanique d'accepter nos remerciements pour leur travail d'enseignement.

LAMIA & IKRAM

Dédicace

Je dédie ce travail à :

*Ma chère mère et mon honorable père pour leur soutien, leur aide,
Leur patience et leur amour.*

Mon frère

Mes sœurs

À mon encadreur Monsieur T.BOUSHAKI

A tous mes enseignants chacun par son nom

Toute ma famille

Tous mes amis

A tous mes collègues chacun par son nom

A chaque personne qui m'a aidée.

LAMIA

Dédicace

Je dédie ce travail à :

*Ma chère mère et mon honorable père pour leur soutien, leur aide
Leur patience et leur amour.*

Mes frères

Mes sœurs

*À mon encadreur Monsieur T.BOUSHAKI
A tous mes enseignants chacun par son nom
Toute ma famille
Tous mes amis
A tous mes collègues chacun par son nom
A chaque personne qui m'a aidée.*

IKRAM

Sommaire

Dédicace	
Remerciements	
Résumé	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
Introduction général	

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES TURBINES

I.1.Introduction.....	2
I.2. Historique des turbines.....	2
I.3.Classification des turbines thermique.....	3
I.4.Turbine à gaz.....	4
I.4.1. Définition d'une turbin à gaz.....	4
I.4.2. Les éléments d'une turbine à gaz.....	4
I.4.3. Principe de fonctionnement de la turbine à gaz	5
I.4.4.Classification des turbines à gaz	6
I.4.4.1-Classification selon le mode de construction.....	6
I.4.4.2-Classification selon le mode de travail	7
I.4.4.3-Classification selon le mode de fonctionnement thermodynamique....	8
I.5- Cycle de Brayton.....	9
I.5.1- Cycle idéal de Brayton.....	9
I.5.2- Cycle réel de Brayton.....	10
I.6- Utilisation, avantages et inconvénients des turbines à gaz	10
I.7- Conclusion	11

CHAPITRE II : Les centrales photovoltaïques

II.1- Introduction	12
II.2- Gisement solaire.....	13
II.3-Déplacement et repérage du soleil.....	14
II.3.1- Les coordonnées géographiques	16
II.3.2- Les coordonnées horizontales.....	17
II.3.3- Les Coordonnées horaires.....	18
II.4. Le rayonnement solaire.....	20
II.5- Les cellules photovoltaïques.....	22
II.5.1- Les semi-conducteurs	
II.5.1.1- Description.....	23
II.5.1.2- Le dopage.....	24
II.5.1.3- L'effet photovoltaïque.....	25
II.6- Les panneaux solaires.....	26
II.6.1- Fabrication des panneaux solaire.....	26
II.6.2- Principe de fonctionnement d'un panneau solaire.....	27
II.6.3- Les caractéristiques électriques d'un panneau solaire.....	28
II.6.4- Types de panneaux solaires.....	31
II.7- Conclusion	32

CHAPITRE III : MODELISATION DE LA CENTRALE

HYBRIDE

III.1- Introduction.....	33
III.2- Equations générales	
III.2.1- Performances de la turbine à gaz.....	33
III.2.2- Panneaux solaires photovoltaïques.....	35
III.3- Présentation du logiciel TRNSYS	
III.3.1- Définition.....	36
III.3.2- Présentation de la bibliothèque STEC.....	37

III.4- Modélisation de l'installation	38
III.4.1- Data Reader TMY 2 (Type 109).....	39
III.4.2- Champ solaire photovoltaïque (Type 194).....	40
III.4.3- Compresseur d'air (Type 371).....	41
III.4.4- Chambre de combustion (Type 426).....	43
III.4.5- Turbine de détente (Type 372).....	44
III.4.6- Générateur d'électricité (Type 375).....	45

CHAPITRE VI : RESULTATS ET DISCUSSION

VI.1- Données de la centrale.....	46
VI.2- Orientation et angle d'inclinaison des panneaux solaires.....	47
VI.3- Ensoleillement des trois régions.....	48
VI.4- Puissances et rendement de l'installation	50
VI.5-Conclusion.....	54
Conclusion général	
Annexe	
Références bibliographiques	

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I :

Figure I.1 : Première turbine-générateur de gaz industriel du monde, de 4 MW présentée à l'exposition nationale suisse à Zurich en 1939.....	2
Figure I.2 : Classification des turbines thermiques.....	3
Figure I.3 : Schéma descriptif de la turbine à gaz.....	4
Figure I.4 : Principe de fonctionnement d'une turbine à gaz.....	5
Figure I.5 : Classification des turbines à gaz.....	5
Figure I.6 : Turbine à gaz à un seul arbre (a) et à deux arbres (b).....	6
Figure I.7 : Turbine à action (a) et turbine à réaction (b).....	7
Figure I.8 : Diagramme (T, S) pour un cycle ouvert (a) et un cycle fermé (b).....	8
Figure I.9 : Cycle idéal de Brayton (a) en diagramme (T, S) et (b) en diagramme (P, V).....	8
Figure I.10 : Cycle réel de Brayton en diagramme (T, S).....	9

CHAPITRE II :

Figure II.1 : Le gisement solaire dans le monde.....	12
Figure II.2 : Disponibilité de l'énergie solaire.....	13
Figure II.3 : Ensoleillement journalier en Algérie.....	14
Figure II.4 : Schématisation des mouvements de la terre autour du soleil.....	15
Figure II.5 : La sphère céleste.....	16
Figure II.6 : Valeurs des latitudes et longitudes autour de la terre.....	17
Figure II.7 : Repérage de la position du soleil.....	18
Figure II.8: La déclinaison du soleil en fonction des jours de l'année.....	19
Figure II.9: Variation annuelle de la déclinaison solaire	20
Figure II.10 : Les composantes du rayonnement solaire global.....	21
Figure II.11: structure basique d'une cellule solaire.....	22
Figure II.12:Raffinage de silicium.....	23
Figure II.13:Structure cristalline de silicium.....	23
Figure II.14: Diagramme de bandes d'énergie du silicium.....	24
Figure II.15: Effet photovoltaïque.....	25
Figure II.16 : étapes de fabrication d'un panneau solaire.....	26

LISTE DES FIGURES

Figure II.17: Composants d'un panneau photovoltaïque.....	27
Figure II.18: Principe de fonctionnement d'un panneau solaire.....	28
Figure II.19: Caractéristique $I(V)$ du panneau pour différents éclairagements.....	29
Figure II.20 : Caractéristique $P(V)$ et $I(V)$ du module.....	29
Figure II.21: Caractéristiques $I(V)$ des modules branchés en série.....	31
Figure II.22 : Caractéristiques $I(V)$ des modules branchés en parallèle.....	31
Figure II.23 : Types des panneaux solaires.....	31

CHAPITRE III

Figure III.1 : Schéma simplifié de la turbine à gaz.....	33
Figure III.2: Structure des composants de la bibliothèque STEC.....	38
Figure III.3 : Modèle de l'installation sur TRNSYS 16.....	39
Figure III.4: Désignation du fichier TMY2 de la région du champ solaire.....	39
Figure III.5: Configuration du champ solaire.....	41
Figure III.6 : Entrées du champ solaire.....	41
Figure III.7 : Paramètres du compresseur.....	42
Figure III.8 : Entrées du compresseur.....	42
Figure III.9 : Paramètres de la chambre de combustion.....	44
Figure III.10 : Entrées de la chambre de combustion.....	44
Figure III.11 : Paramètres de la turbine de détente.....	45
Figure III.12 : Entrées de la turbine de détente.....	45
Figure III.13 : Paramètres de la turbine de détente.....	45
Figure III.14 : Entrées de la turbine de détente.....	45

CHAPITRE VI :

Figure IV.1 : Puissance moyenne annuelle en fonction de l'angle d'inclinaison des panneaux photovoltaïques pour la région Dar ElBeida.....	48
Figure IV.2 : Rayonnement global moyen mensuel pour la région de Tamanrasset.....	48
Figure IV.3 : Rayonnement global moyen mensuel pour la région de Bechar.....	49
Figure IV.4 : Rayonnement global moyen mensuel pour la région de Dar El Beida.....	49
Figure IV.5 : Puissance photovoltaïque produite durant le 21 juin pour les trois régions.....	50
Figure IV.6 : Puissance photovoltaïque produite durant le 21 décembre pour les trois régions.....	50
Figure IV.7 : Rendement photovoltaïque durant le 21 juin pour les trois régions.....	51

LISTE DES FIGURES

Figure IV.8 : Rendement photovoltaïque durant le 21 décembre pour les trois régions.....	51
Figure IV.9 : Puissance de l'installation durant le 21 juin pour les trois régions.....	52
Figure IV.10 : Puissance de l'installation durant le 21 décembre pour les trois régions.....	52
Figure IV.11: Puissance annuelle produite par l'installation.....	53
Figure IV.12: Rendement annuel de l'installation.....	54

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE II

Tableau II.1: Rayonnement solaire sur un plan horizontal.....	21
Tableau II.2 : Types de panneaux solaires.....	32

CHAPITRE III

Tableau III.1: Angle d'inclinaison des panneaux en fonction de la latitude.....	36
Tableau III.2 : Configuration du composant type 109.....	39

CHAPITRE VI

Tableau IV.1 : Caractéristiques de la turbine à gaz Siemens SGT-800.....	46
Tableau IV.2 : Caractéristiques du panneau JA Solar-JAM6(K)-60-295/PR.....	47
Tableau IV.3 : Puissance et rendement annuelle de l'installation.....	54

Nomenclature

Lettres latines		
Symbole	Désignation	unité
T	Température	[°K],[°C]
P	Pression	[Bar]
Ma	Débit d'air	[kg/s]
Mf	Débit de fuel	[kg/s]
Cp	Chaleur spécifique de pression constante	[kJ/kg.K]
PCI	Pouvoir calorifique inferieur	[kJ/kg]
Wc	Travail du compresseur	[kJ/kg]
R	Constante des gaz parfait	[kJ/K.kmol]
Wt	Travail de la turbine	[kJ/kg]
w_{Ts}	Travail de détente isentropique	[kJ/kg]
Wu	Travail utile	[kJ/kg]
Q	Quantité de la chaleur fournie dans la chaudière	[kJ/kg]
H	L'enthalpie	[kJ]
I_{mod}	Courant aux bornes d'un module PV	[A]
V_{mod}	Tension aux bornes d'un module PV	[V]
Ppv	Puissance de panneau photovoltaïque	[W]
Pgt	Puissance de la turbine à gaz	[W]
Ptot	Puissance totale	[W]
\dot{w}_{net}	La puissance nette fournie par le cycle	[W]
\dot{w}_{elec}	La puissance électrique fournie par le générateur	[W]
η_{pv}	Rendement photovoltaïque	[%]
η_{gt}	Rendement de la turbine à gaz	[%]

Nomenclature

η_{th}	Rendement thermique	[%]
η_{tot}	Rendement totale	[%]
φ	Latitude	[°]
L	Longitude	[°]
Z	L'altitude	[m]
H	La hauteur du soleil	[°]
a	Azimut du soleil	[°]
ω	L'angle horaire	[°]
δ	La déclinaison	[°]
ξ	Angle d'incidence	[°]
C*	La constante solaire	[W.m ²]
C0	La constante solaire moyenne	[W.m ²]
S	Irradiation solaire direct	[W.m ²]
D	Irradiation solaire diffuse	[W.m ²]
R	Irradiation solaire réfléchi	[W.m ²]
G	Irradiation solaire globale	[W.m ²]
Symbole Grec		
γ	Coefficient poly-tropique du fluide	/
ε	Taux de compression	/
ρ	Masse volumique	[kg/m ³]

Résumé

Le présent travail a pour objectif la simulation d'une centrale hybride solaire – gaz. La centrale dispose d'un champ de panneaux photovoltaïques permettant la transformation du rayonnement solaire en énergie électrique ainsi qu'un bloc de puissance composé d'une turbine à gaz entraînant un générateur électrique. La simulation des performances énergétiques et effectué par le logiciel TRNSYS (Logiciel de simulations dynamiques).

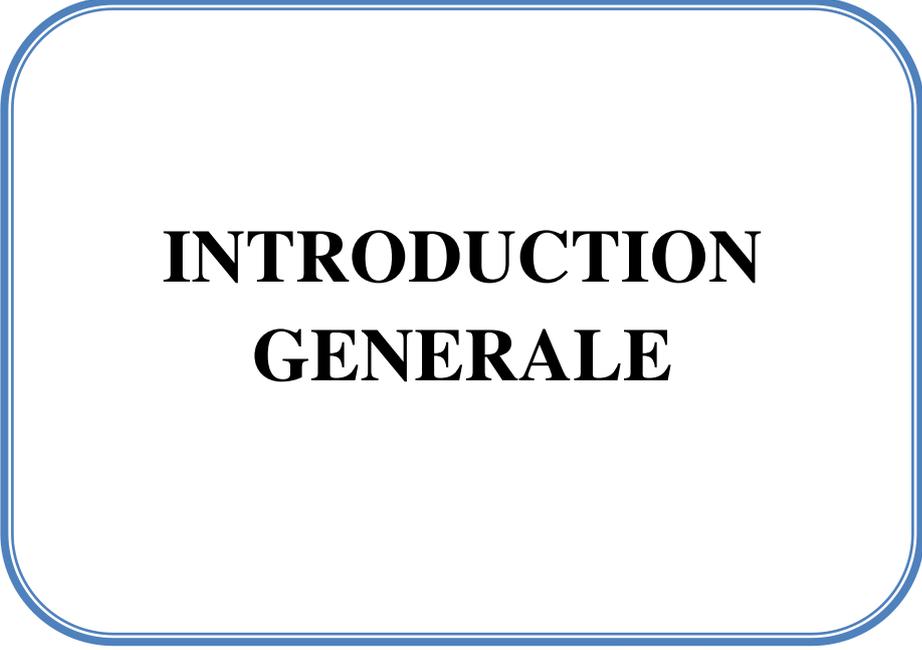
Abstract

The objective of this work is to simulate a solar - gas hybrid power plant. The plant has a field of photovoltaic panels allowing the transformation of solar radiation into electrical energy as well as a power unit consisting of a gas turbine driving an electric generator. The simulation of energy performance and carried out by the software TRNSYS (Dynamic simulation software).

الملخص

الهدف من هذا العمل هو محاكاة محطة طاقة هجينة تعمل بالطاقة الشمسية والغازية. يحتوي المصنع على مجال من الألواح الكهروضوئية يسمح بتحويل الإشعاع الشمسي إلى طاقة كهربائية بالإضافة إلى وحدة طاقة تتكون من توربين غازي يقود مولد كهربائي.

يتم تنفيذ محاكاة أداء الطاقة بواسطة برنامج المحاكاة الديناميكي (TRNSYS)



**INTRODUCTION
GENERALE**

Introduction générale

La production d'électricité se fait depuis la fin du XIX^{ème} siècle à partir de différentes sources d'énergies primaires. Les premières centrales électriques fonctionnaient au bois. Aujourd'hui, cette production peut se faire à partir d'énergie fossile (charbon, gaz naturel ou pétrole) à travers l'utilisation des machines thermiques telles que les turbines.[26]

Les dernières années ont vu l'émergence d'une nouvelle technologie d'exploitation de l'énergie solaire par voie thermodynamique ou par panneaux photovoltaïques. Cette technologie est la plus prometteuse pour prendre la place des énergies non renouvelables (les énergies fossiles et les énergies nucléaires) surtout dans le domaine industriel (centrales électriques, air conditionné, réfrigération, irrigation, ...etc.).

Les dernières technologies avancées ouvrent des perspectives intéressantes pour augmenter le rendement de la production d'électricité. Parmi ces technologies, on trouve les systèmes hybrides solaire-gaz qui font la conjonction entre la turbine à gaz avec le champ solaire. L'objectif du présent mémoire s'intéresse à l'étude énergétique d'une centrale hybride solaire-gaz. Notre but dans cette étude est l'étude des performances thermodynamiques d'une installation de cycle Brayton couplée avec un champ de panneaux solaires par le logiciel TRNSYS.

Le premier chapitre présente la généralité sur les turbines à gaz, leurs classifications, différents types et domaines d'utilisations.

Le deuxième chapitre est destiné au gisement solaire et les caractéristiques principales du gisement solaire, ainsi que l'énergie solaire photovoltaïque en expliquant le principe de fonctionnement, les différents types et les caractéristiques principales.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation. Dans ce chapitre nous avons déterminé les performances de la centrale électrique hybride afin de pouvoir montrer l'importance de l'apport solaire sur la production, le rendement et de la réduction de la pollution de l'atmosphère. Pour cela nous avons utilisé le logiciel de simulation TRNSYS qui comporte plusieurs modules intégrés permettant de modéliser l'ensemble de la centrale

Dans le quatrième chapitre on a consacré pour les caractéristiques de la centrale étudiée qui est composée par une turbine à gaz et un champ solaire

Ce travail sera bien évidemment finalisé par une conclusion générale.

CHAPITRE I :

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES TURBINES

I.1- Introduction

Une turbine est un dispositif rotatif destiné à utiliser l'énergie cinétique d'un fluide liquide (comme l'eau) ou gazeux (vapeur, air, gaz de combustion), pour faire tourner un arbre supportant les aubes de la turbine.

L'énergie du fluide, caractérisée par sa vitesse et son enthalpie, est partiellement convertie en énergie mécanique pour entraîner un alternateur, un compresseur, une pompe ou tout autre récepteur (ou générateur) mécanique rotatif. L'ensemble est alors respectivement appelé turbo-alternateur, turbocompresseur, turbopompe, etc.

La turbine joue un rôle important dans les systèmes de production de puissance. Le principe de cette machine est d'avoir une détente du fluide permettant d'obtenir la fonction de transformation d'énergie, elle est d'abord très répandue dans le domaine de l'exploitation de pétrole et de gaz naturel, est également utilisée pour la production d'électricité (centrales électriques). Dans notre étude on s'intéresse essentiellement à un type de turbines : les turbines à gaz.

I.2- Historique des turbines

Quelques références se rappellent que la première turbine fabriquée depuis environ 2000 ans par Héro d'Alexandrie, était basée sur le principe des bouffées de vapeur et profitait de la réaction qui en résultait.[1].

Le développement réel de la turbine a débuté en 1883, lorsque l'ingénieur suédois Carl Gustaf Patrick de Laval a marqué son premier brevet dans le domaine des turbines, et en 1884, l'ingénieur anglais Charles Algernon Parsons a fabriqué la première turbine thermique à vapeur industrielle, qui a été très largement utilisée dans l'industrie et les navires jusqu'en 1900, à partir de cette date, le domaine d'utilisation s'est très largement agrandi.[1]

Quelques références rappellent que le premier brevet pour la turbine à gaz a été attribué à l'anglais John Barber en 1791, plus d'une centaine d'années pour la première turbine à vapeur brevetée, utilisé pratiquement par de Laval et Parsons, donc avant même les fondements de la thermodynamique énoncés par Carnot en 1824. [1]

Les retards dans le développement de la turbine à gaz d'une cinquantaine d'années par rapport au développement de la turbine à vapeur était dû à l'impossibilité de la fabrication sur le plan technologique, le manque de connaissances dans la dynamique du fluide, en plus de

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES TURBINES

l'absence de métal avec les spécifications appropriées pour résister à la température élevée des produits de combustion.

En 1905, la première unité de turbine à gaz et du compresseur construit par Brown Boveri a été installée dans l'raffinerie Marcus Hook de la « Sun Oil Company » près de Philadelphie, PA. Brown Boveri a également construit la première turbine génératrice d'électricité pour une centrale électrique à Neuchâtel en Suisse. Cette turbine à gaz de puissance 4 MW (figure I.1), a été présentée en 1939 à l'exposition nationale suisse de Zurich, et composée d'un compresseur à flux axial qui fournissait un air comprimé à environ 50 livres par pouce carré ($3,5 \text{ kg/cm}^2$) à une seule chambre de combustion. L'air comprimé est utilisé pour refroidir l'extérieur de la chambre de combustion et pour la combustion.[1]

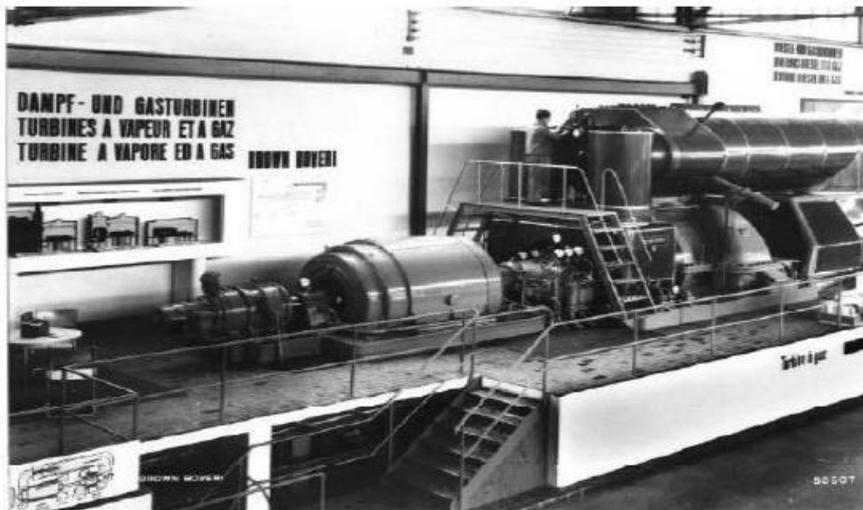


Figure I.1 : Première turbine-générateur de gaz industriel du monde, de 4 MW présentée à l'exposition nationale suisse à Zurich en 1939.

I.3- Classification des turbines thermiques

Les turbines sont des machines rotatives qui convertissent l'énergie fournie par l'expansion des gaz chauds ou de vapeur en énergie mécanique. La figure I.2 montre la classification des turbines d'usage courant dans les installations industrielles, les turbines à gaz et à vapeur constituent les deux catégories principales qui diffèrent par leurs sources énergétiques et leurs caractéristiques de fonctionnement. [2]

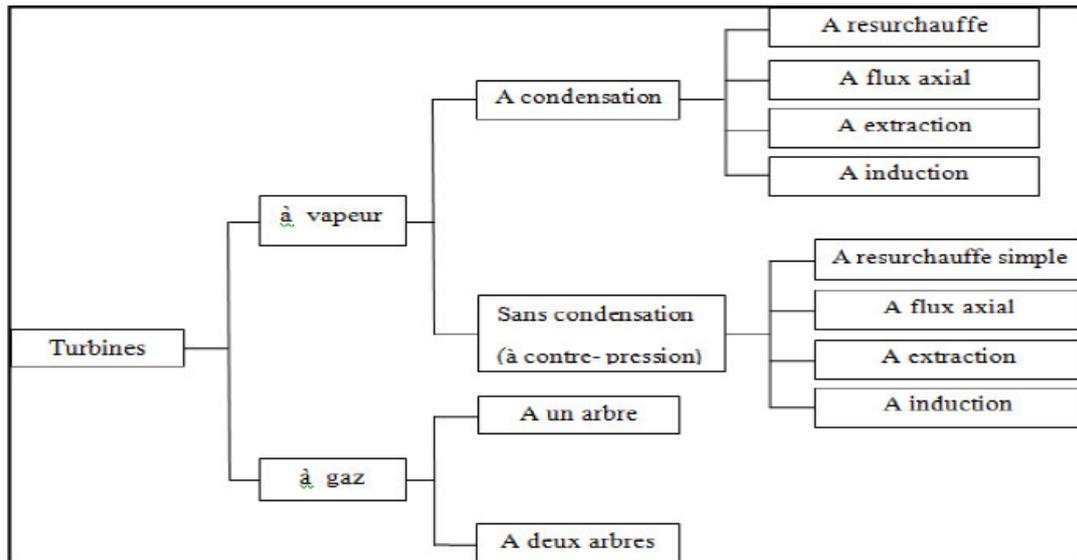


Figure I.2 : Classification des turbines thermiques.

I.4- Turbine à gaz

I.4.1- Définition d'une turbine à gaz

Une turbine à gaz est une machine tournante thermodynamique appartenant à la famille des moteurs à combustion interne dont le rôle est de produire de l'énergie mécanique sous la forme de la rotation d'un arbre, directement à partir de l'énergie cinétique des gaz produits par la combustion d'un hydrocarbure (fioul, gaz combustible...) qui subissent une détente dans une turbine.[4]

Le comburant, le plus souvent de l'air ambiant, est généralement comprimé avant de pénétrer dans la chambre de combustion, en utilisant un compresseur rotatif entraîné par le même arbre que la turbine. Le mot « gaz » dans l'ancienne dénomination « turbine à gaz » (longtemps la plus employée) ne signifie pas que la machine ne peut brûler que du combustible gazeux, mais fait référence au caractère gazeux des produits de combustion, par opposition aux turbines à vapeur dans lesquelles le fluide moteur (de la vapeur d'eau) se condense en liquide.[4]

I.4.2- Eléments d'une turbine à gaz

Dans sa forme la plus simple et la plus répandue, une turbine à gaz est composée de trois éléments principaux (Figure I.3):

- Un compresseur, centrifuge ou plus généralement axial, qui a pour rôle de comprimer de l'air ambiant à une pression comprise aujourd'hui entre 10 et 30 bars environ.

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES TURBINES

- Une chambre de combustion, dans laquelle un combustible gazeux ou liquide est injecté sous pression, puis brûlé avec l'air comprimé, avec un fort excès d'air afin de limiter la température des gaz d'échappement.
- Une turbine axiale dans laquelle sont détendus les gaz qui sortent de la chambre de combustion. [5]

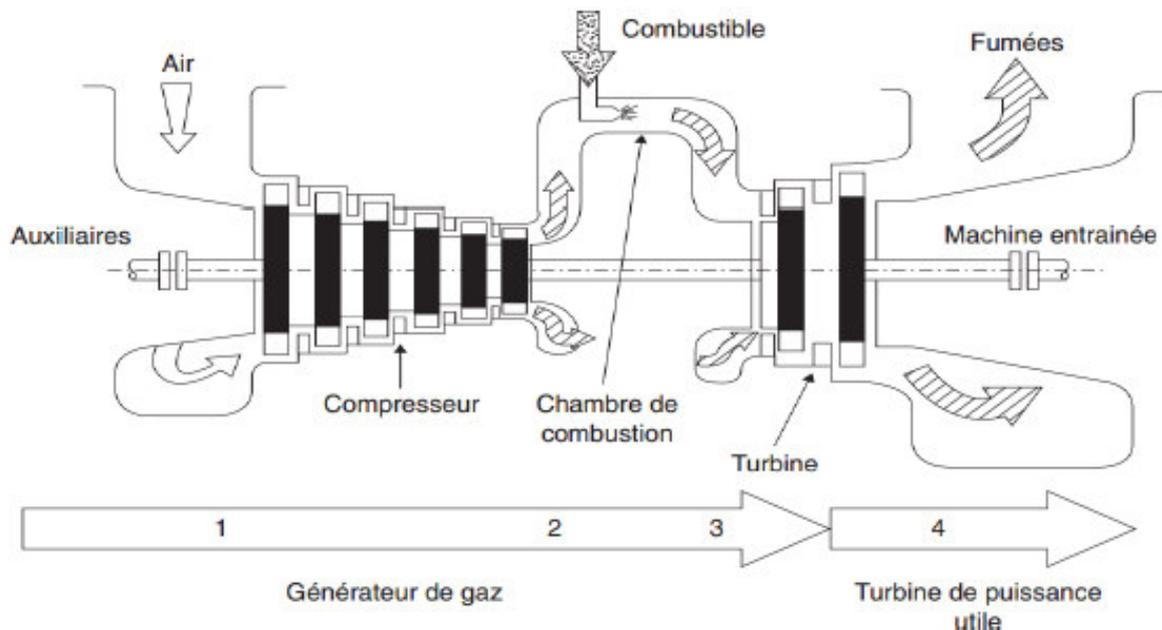


Figure I.3 : Schéma descriptif de la turbine à gaz.

I.4.3- Principe de fonctionnement de la turbine à gaz

Une turbine à gaz fonctionne de la façon suivante (Figure I.4):

- Admission de l'air du milieu environnant.
- Compression de l'air à une pression plus élevée.
- Augmentation de l'énergie de l'air comprimé en ajoutant et en brûlant le combustible dans la chambre de combustion.
- Acheminement de l'air à pression et à température élevées vers la section de la turbine, qui convertit l'énergie thermique en énergie mécanique pour faire tourner l'arbre.
- La détente dans la turbine permet l'entraînement du compresseur, des accessoires attelés à l'arbre et la charge (récepteur).
- Décharge des gaz brûlés à l'atmosphère à basse pression.[6]

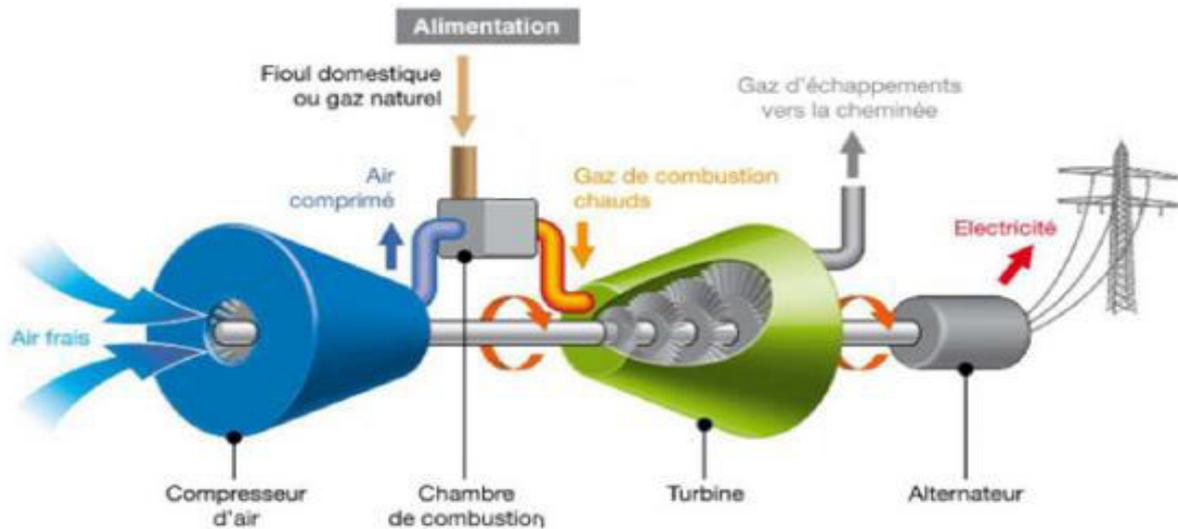


Figure I.4 : Principe de fonctionnement d'une turbine à gaz.

I.4.4- Classification des turbines à gaz

On peut classer les turbines selon différentes manières (Figure I.5):

- Par le mode de construction.
- Par le mode de travail.
- Par le mode de fonctionnement thermodynamique.

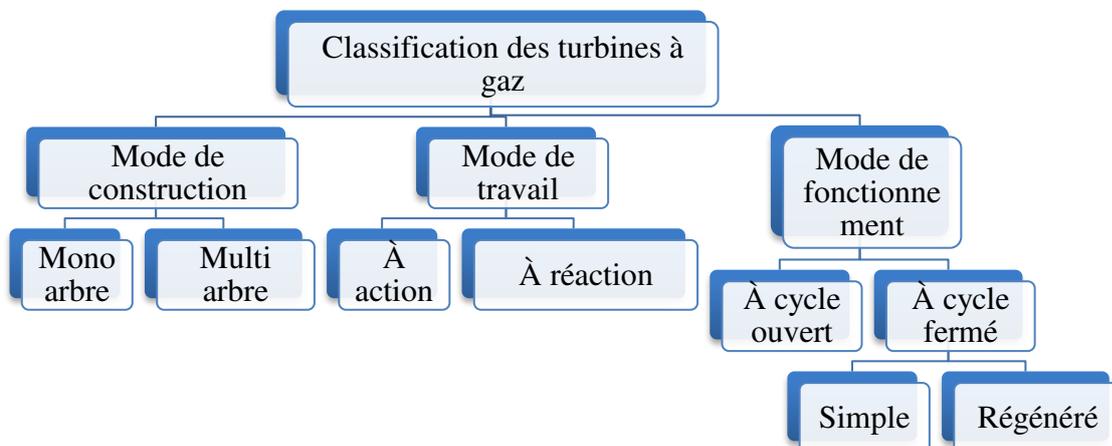


Figure I.5 : Classification des turbines à gaz.

I.4.4.1- Classification selon le mode de construction

L'objectif pour lequel, on utilise la turbine à gaz définit le type qu'on doit choisir. Dans l'industrie, on trouve les turbines à un seul arbre, dites aussi mono-arbre. Elles sont généralement utilisées dans le cas où on cherche un fonctionnement avec une charge constante (pour entraîner les générateurs d'électricité). Un deuxième type, englobe les turbines

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES TURBINES

à deux arbres (bi-arbres), elles ont l'avantage d'entraîner des appareils à charges variables (pompes, compresseur...). Elles se composent de deux parties, la première assure l'autonomie de la turbine, la deuxième est liée à la charge (Figure I.6). Un troisième type peut être aussi cité, ce sont les turbines dites dérivées de l'aéronautique. Elles ont une conception spéciale suivant le domaine dans lequel elles sont utilisées. Dans ce troisième type, la partie qui assure l'autonomie de la turbine existe toujours et l'énergie encore emmagasinée dans les gaz d'échappement est utilisée pour créer la poussée en transformant cette énergie (thermique et de pression) en une énergie cinétique de jet dans une tuyère.[8]

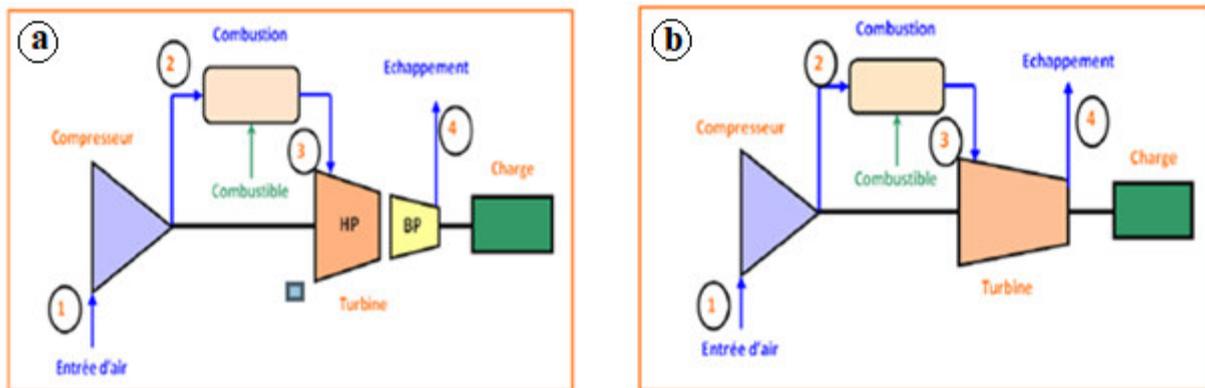


Figure I.6 : Turbine à gaz à un seul arbre (a) et à deux arbres (b).

I.4.4.2- Classification selon le mode de travail

On distingue deux types de turbines (Figure I.7):

- **Turbine à action** : Où l'énergie thermique est transformée complètement en énergie cinétique dans la directrice. L'évolution des gaz dans la roue se fait sans variation de pression statique $P_1 > P_2 = P_3$. [9]
- **Turbine à réaction** : Une partie de l'énergie thermique est transformée dans la roue en énergie cinétique et mécanique. L'évolution des gaz dans la roue se fait avec variation de la pression statique $P_1 > P_2 > P_3$. Le taux de réaction ϵ caractérisera le % d'énergie thermique totale.). [9]

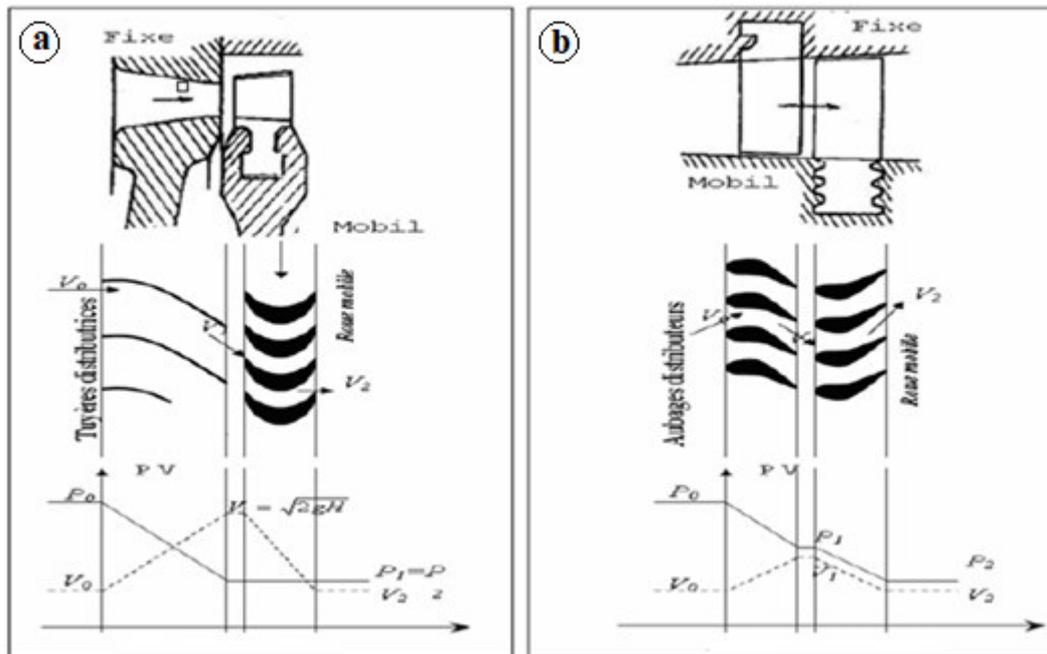


Figure I.7 : Turbine à action (a) et turbine à réaction (b).

I.4.4.3- Classification selon le mode de fonctionnement thermodynamique

Il existe deux cycles thermodynamiques (Figure I.8):

- **Turbine à gaz à cycle ouvert :** Cycle thermodynamique dans lequel le fluide moteur, qui entre dans la turbine à gaz, vient de l'atmosphère et s'échappe dans l'atmosphère. Ce type de cycle est subdivisé en deux classes :
 - **Turbine à gaz à cycle simple :** C'est une turbine utilisant un seul fluide pour la production d'énergie mécanique après la détente, les gaz possédant encore un potentiel énergétique sont perdus dans l'atmosphère à travers l'échappement. **[10]**
 - **Turbine à gaz à cycle régénéré :** Les pertes de chaleur causées par les gaz d'échappement sont les plus importantes dans l'installation de turbine à gaz, en conduisant les gaz d'échappement dans un échangeur thermique où ils réchauffent l'air sortant du compresseur avant son entrée dans les chambres de combustion on récupère une partie de chaleur sensible de ces gaz qui se trouvait perdue dans l'atmosphère. Dans le but d'augmenter le rendement de l'installation. **[11]**
- **Turbine à gaz à cycle fermé :** Cycle thermodynamique dans lequel le fluide moteur est indépendant de l'atmosphère et est continuellement recyclé.

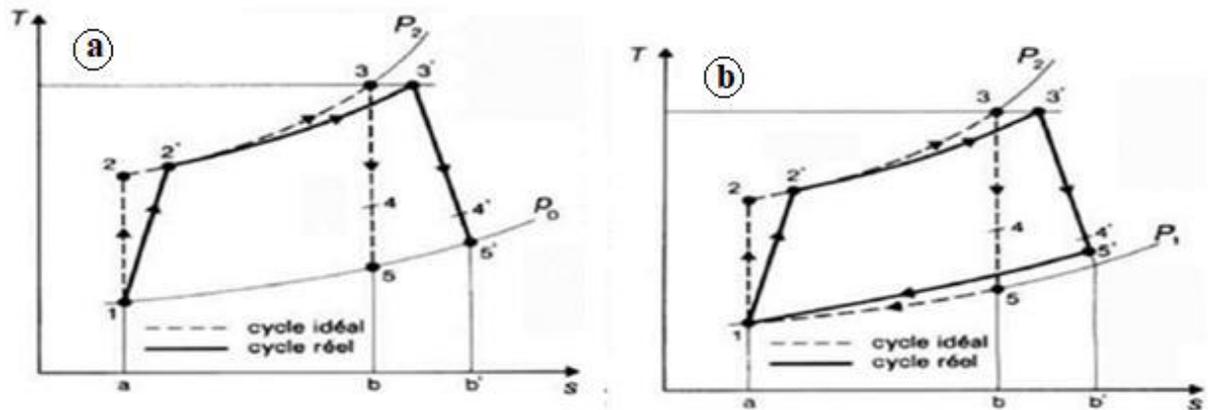


Figure I.8 : Diagramme (T, S) pour un cycle ouvert (a) et un cycle fermé (b).

I.5- Cycle de Brayton

Le cycle de Brayton appelé aussi cycle de Joule est le procédé thermodynamique qui gouverne le fonctionnement des turbines à gaz sans récupération.

I.5.1- Cycle idéal de Brayton

Dans le cycle idéal de Brayton (Figure. I.9) toutes les transformations sont supposées réversibles, sans frottement, sans perte de charge et sans perte de chaleur.[10]

- (1⇒2) : Compression isentropique de l'air (compresseur).
- (2⇒3) : Combustion isobare (chambre de combustion).
- (3⇒4) : Détente isentropique (turbine).
- (4⇒1) : Refroidissement isobare (air ambiant).

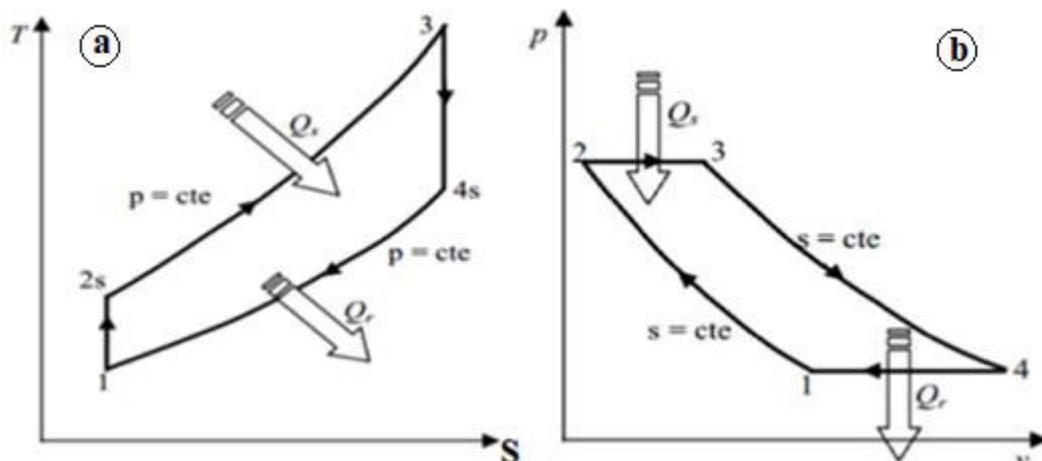


Figure I.9 : Cycle idéal de Brayton (a) en diagramme (T, S) et (b) en diagramme (P, V).

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES TURBINES

Les turbines à gaz comme toute autre machine ou installation industrielle présente des avantages et des inconvénients, on peut citer à cet effet:

- **Les Avantages :** Si on compare la turbine à gaz à ses concurrents dans la famille des moteurs à combustion interne, elle présente des avantages importants:
 - Faible encombrement.
 - Excellent rapport puissance/poids.
 - Bon rendement.
 - Faibles émissions de polluant.
 - Mise en route rapide.
 - Équipements auxiliaires « bon marché ».
 - Très faible vibration.
 - Possibilité de fonctionnement à faible charge. [13]
- **Les Inconvénients :**
 - Au-dessous d'environ 3000 KW, le prix de l'installation est supérieur à celui d'un groupe diesel.
 - Coût de fabrication élevé.
 - Combustibles propres donc coûteux (les gaz brûlés se détendent directement dans la turbine).
 - Performances dépendant des conditions extérieures (dégradées si la température augmente ou si la pression diminue).[13]

I.7- Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les turbines à gaz, Leurs classifications, leurs différents types et leurs domaines d'utilisations. On a rappelé aussi le principe de fonctionnement et leurs avantage et inconvénients.

CHAPITRE II :

Les centrales photovoltaïques

II.1- Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables la plus utilisée. Elle consiste à convertir directement le rayonnement électromagnétique (solaire ou autre) en électricité. C'est une forme non polluante et silencieuse de conversion de l'énergie solaire, elle consiste en un panneau composé de cellules photovoltaïques.

L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, elle est l'une des plus facilement exploitables. Comme la plupart des énergies douces, elle donne à l'utilisateur la possibilité de subvenir sans intermédiaire à ses besoins. La connaissance de la position du soleil dans le ciel à tout instant et en tout lieu est nécessaire pour l'étude de l'énergie interceptée. Les heures du lever et du coucher ainsi que la trajectoire du soleil dans le ciel au cours d'une journée permettent d'évaluer certaines grandeurs telles que la durée maximale d'insolation, l'irradiation globale. L'étude du gisement solaire nécessite la disponibilité de données radiométriques, de données météorologiques et un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire pour une période donnée.

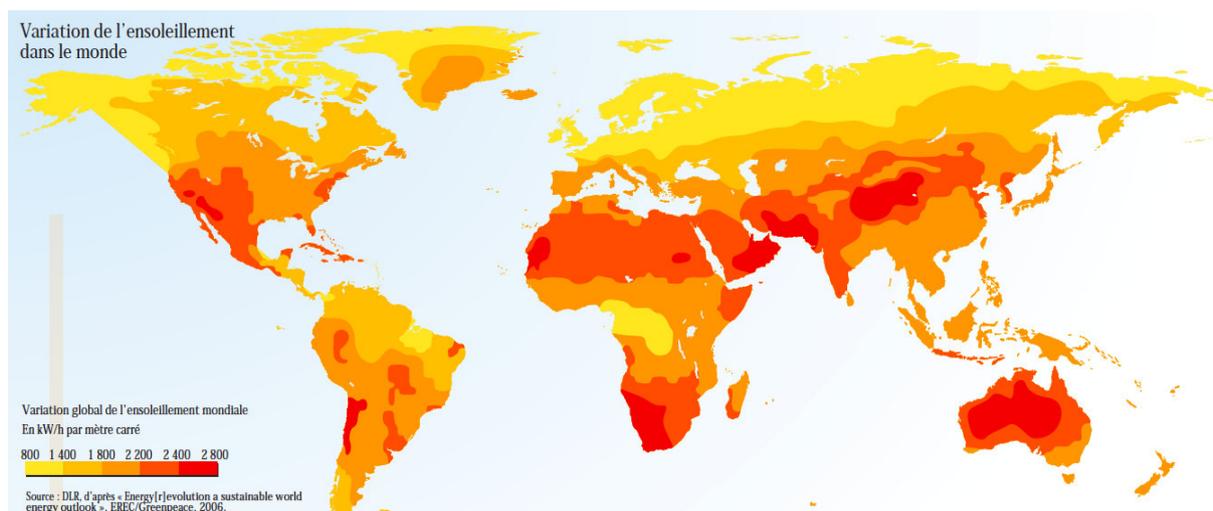


Figure II.1 : Le gisement solaire dans le monde.

La carte ci-dessus montre les valeurs annuelles moyennes mondiales de l'irradiation globale en kWh/m². L'énergie solaire disponible diffère d'une zone géographique à l'autre, mais aussi au fil de l'année. Dans les zones désertiques proches de l'équateur, les valeurs d'irradiation annuelle peuvent atteindre les 2 200 kWh/m² par an.

II.2- Gisement solaire

Le soleil est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la terre, sa lumière met environ 8 mn pour nous atteindre. L'astre soleil est de constitution gazeuse, de forme sphérique de 14.10^5 km de diamètre, sa masse est de l'ordre de 2.10^{30} kg. Il est constitué principalement de 80% d'hydrogène, de 19% d'hélium et le 1% restant est un mélange de plus de 100 éléments. Il est situé à une distance de la terre égale à environ 150 millions de km. Sa luminosité totale, c'est-à-dire la puissance qu'il émet sous forme de photons, est à peu près égale à 4.10^{26} W. Seule une petite partie est interceptée par la terre, elle est de l'ordre de $1,7.10^{17}$ W. Elle nous parvient essentiellement sous forme d'ondes électromagnétiques, 30% de cette puissance est réfléchiée vers l'espace, 47% est absorbée et 23% est utilisée comme source d'énergie pour le cycle d'évaporation -précipitation de l'atmosphère. [14]

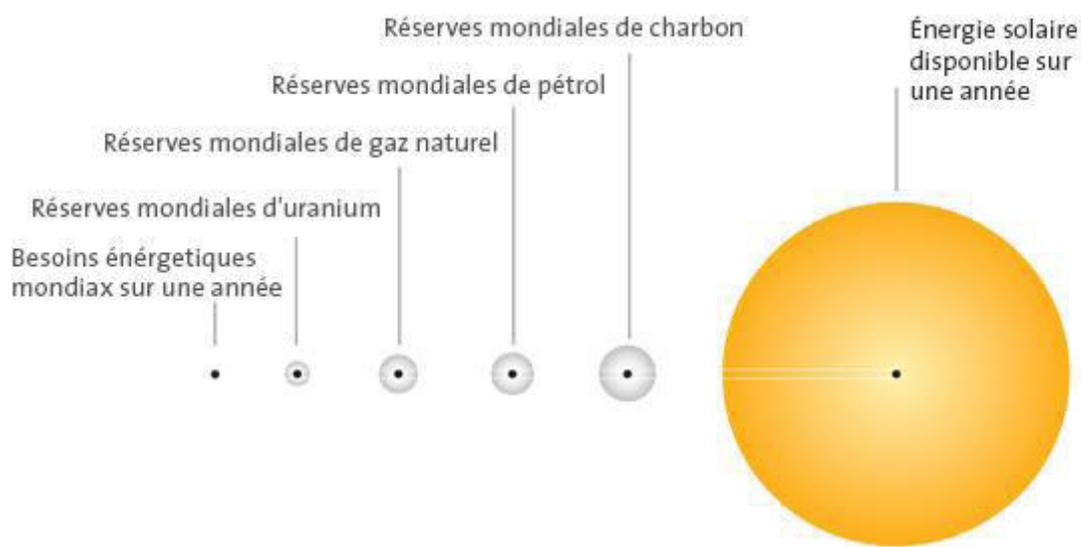


Figure II.2 : Disponibilité de l'énergie solaire.

La terre et son atmosphère reçoivent du Soleil en un peu plus d'une demi-heure l'équivalent de la consommation mondiale annuelle d'énergie, soit environ 100.000TWh ou encore 8,7Mds de tonnes équivalent pétrole en 2010.[15]

En raison de sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme. L'Algérie possédant un gisement solaire important, de par son climat, la puissance solaire maximale en tout point de notre pays est d'environ 1 kW/m² (soleil au zénith). Elle représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique et 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque.

CHAPITRE II : Les centrales photovoltaïques

Dans tout le bassin méditerranéen, il existe un gigantesque réservoir d'énergie solaire situé au nord du continent africain et particulièrement l'Algérie. Pour un bon nombre d'organismes spécialisés, la durée de l'insolation sur presque la quasi-totalité du territoire algérien excède les 2500 heures par an et peut atteindre jusqu'à 3900 heures par an au sud Algérien [15]. Le sud algérien représente un immense réservoir qui pourra profiter, si dûment exploité, au développement des énergies renouvelables. Le potentiel de ce type d'énergie dans le sud algérien appelé également GSA (grand Sahara Algérien) est parmi les plus importants au monde.

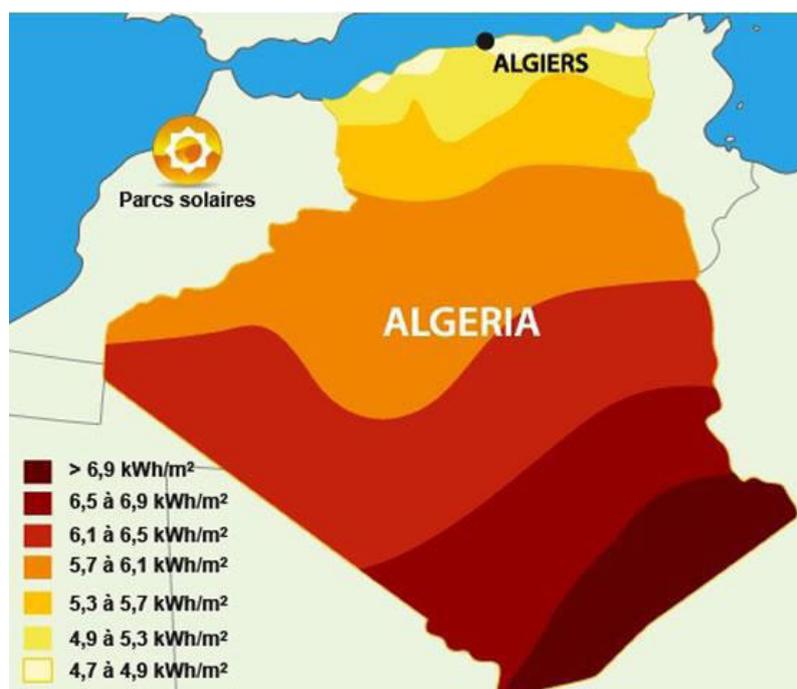


Figure II.3 : Ensoleillement journalier en Algérie.

L'énergie reçue quotidiennement par une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m² par an au Nord et 2263 kWh/m² par an au sud du pays (Figure II.3). Ce qui correspond à une capacité électrique 8 fois supérieure aux réserves de gaz naturel du pays et aux plus grands champs solaires du monde. La qualité du rayonnement solaire algérien permet à l'Algérie de se classer parmi les trois pays qui disposent des meilleurs gisements solaires dans le monde.

II.3-Déplacement et repérage du soleil

Dans son mouvement autour du soleil, la terre décrit une ellipse dont le soleil est l'un de ses foyers, la révolution complète s'effectue en une période de 365,25 jours. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique. C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est la plus proche du soleil (147 millions de km). Au 22 juin la distance terre-soleil vaut 152 millions de km, c'est le jour ou la terre est la plus éloignée, c'est le solstice d'été. Le 21 mars et le 21 septembre sont appelés respectivement équinoxes de printemps et équinoxe d'automne. Aux équinoxes le jour et la nuit sont égaux.

En plus de sa rotation autour du soleil, la terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Cette rotation s'effectue en une journée. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre est appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique, ils font entre eux un angle appelé inclinaison égale à $23^{\circ}27'$.

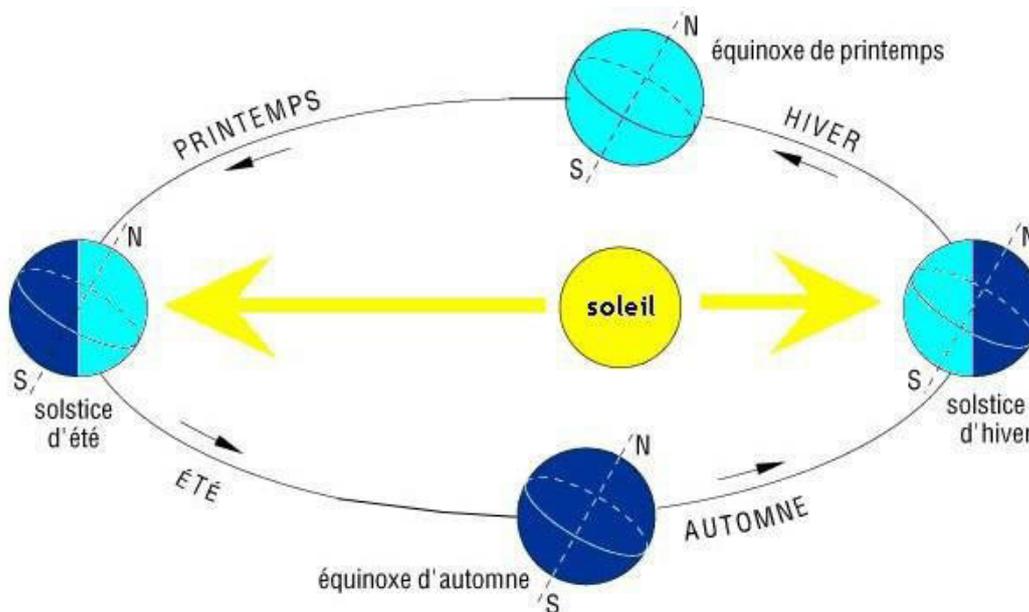


Figure II.4 : Schématisation des mouvements de la terre autour du soleil.

Pour repérer le soleil, on imagine une sphère céleste d'un diamètre immense, qui admet pour centre la terre et pour rayon la distance (terre-soleil). On considère que tous les objets visibles dans le ciel se trouvent sur la surface de la sphère céleste. On peut résumer les différentes caractéristiques sur la sphère elle-même comme c'est indiqué sur la figureII.5.

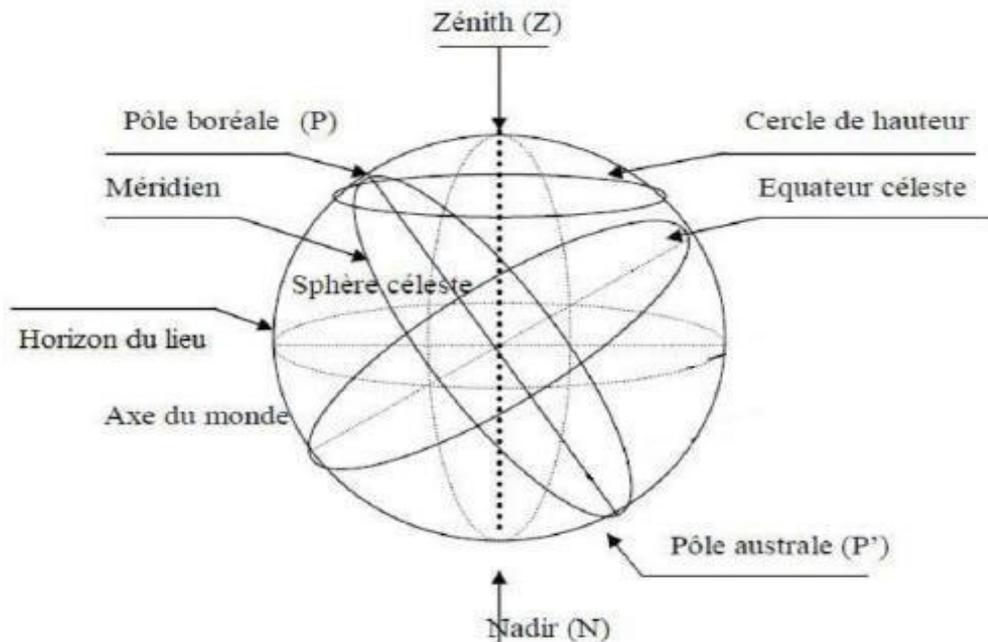


Figure II.5 : La sphère céleste.

II.3.1- Les coordonnées géographiques

La terre est pratiquement une sphère qui tourne autour d'un axe passant par le pôle nord et le pôle sud. Tout point sur la terre est caractérisé par sa latitude, sa longitude et son altitude(FigureII.6). La latitude et la longitude représentent les coordonnées géographiques de ce point.[16]

- **La latitude**

La latitude (φ) d'un lieu à la surface de la terre est l'angle entre l'équateur et le rayon de la terre passant par le lieu considéré. Elle est comptée positivement de 0 à $+90^\circ$ vers le nord et négativement de 0 à -90° vers le sud.[16]

- **La longitude**

C'est l'angle(L) formé par le méridien de Greenwich et le méridien du lieu considéré. La longitude est comprise entre -180° (vers l'ouest) et $+180^\circ$ (vers l'est). Comme la terre met 24 heures pour faire un tour sur elle-même (360°), chaque heure représente 15° d'écart de longitude et donc, chaque degré de longitude représente 4 minutes.[16]

- **L'altitude**

L'altitude (Z) d'un point correspondant à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (le niveau de la mer = 0), elle est exprimée en mètre.

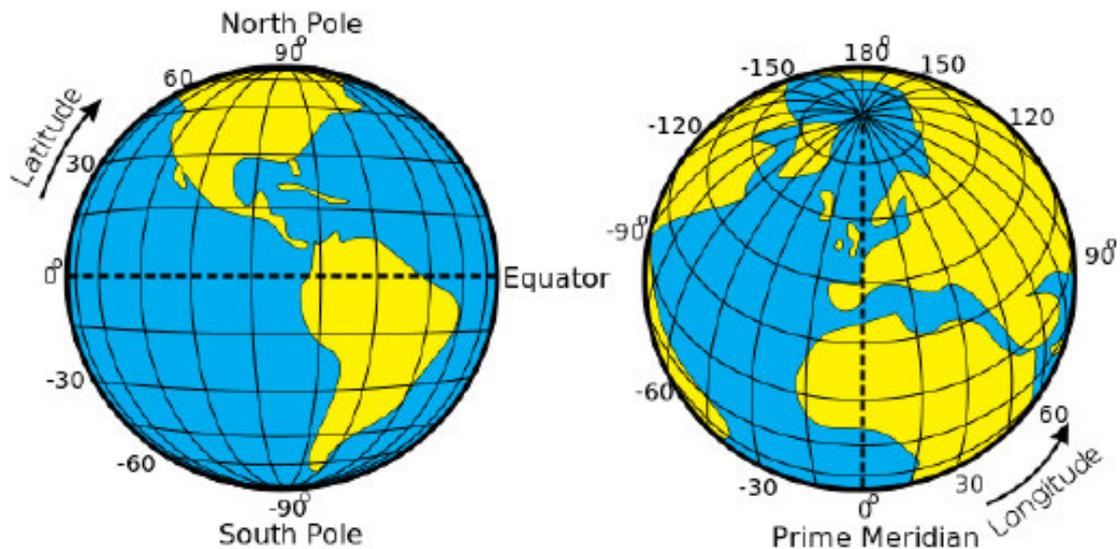


Figure II.6 : Valeurs des latitudes et longitudes autour de la terre.

II.3.2- Les coordonnées horizontales

Le repérage du Soleil s'effectue par l'intermédiaire par deux angles la hauteur h et azimut du soleil a .

- **Hauteur du soleil**

La hauteur du soleil (h) est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal. Il est particulièrement égal à 0° au lever et au coucher astronomiques du soleil, sa valeur est maximale à midi, en temps solaire vrai. L'expression de la hauteur du soleil est donnée par :

$$\sin (h) = \sin (\varphi) . \sin (\delta) + \cos (\varphi) . \cos (\delta) \cos (\omega) \quad (\text{II.1})$$

φ : Latitude du lieu.

δ : Déclinaison du soleil.

ω : Angle horaire.

- **Azimet du soleil**

C'est l'angle(a) compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et le sud. L'azimet est compté positivement vers l'ouest et négativement vers l'est. Il est donné par la relation suivante:

$$\text{Sin (a)} = \frac{\cos(\delta).\sin(\omega)}{\cos (h)} \quad (\text{II.2})$$

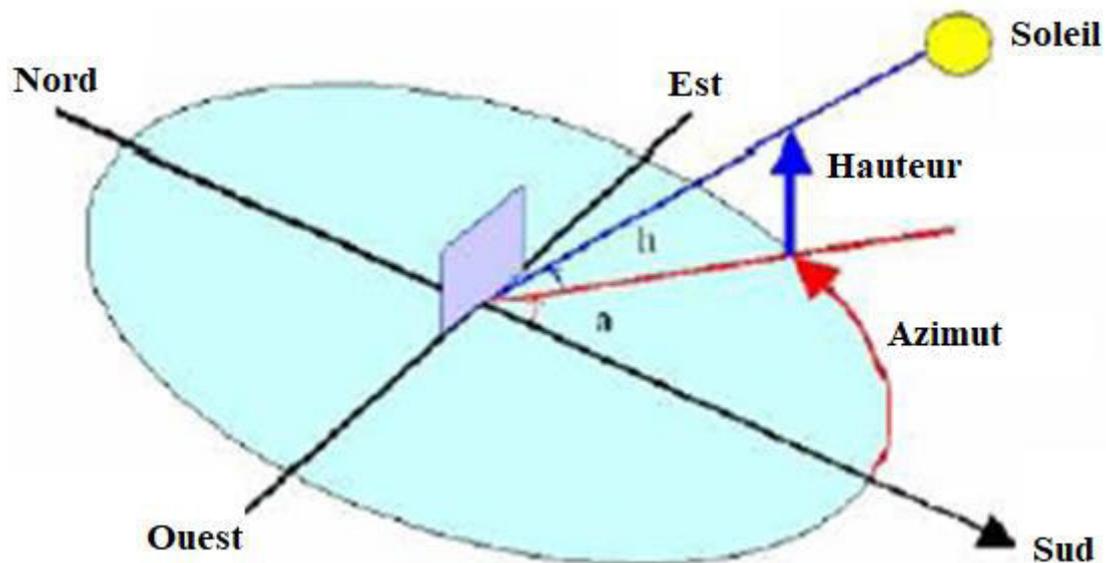


Figure II.7 : Repérage de la position du soleil.

II.3.3- Les Coordonnées horaires

Les coordonnées horaires dont le repère est donné par l'axe des pôles et le plan de l'équateur, le méridien du lieu étant pris comme origine. Chaque point de l'espace est repéré par sa déclinaison (δ) et son angle horaire (ω).

- **La déclinaison**

C'est l'angle (δ) formé par le plan de l'équateur avec celui de l'écliptique. Elle varie au cours de l'année de $+23^{\circ}27'$ à $-23^{\circ}27'$ et détermine l'inégalité des durées des jours, elle vaut 0 aux équinoxes. La déclinaison est donnée par la relation suivante :

CHAPITRE II : Les centrales photovoltaïques

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{284+J}{365} \times 360 \right] \text{ [Degré]} \quad (\text{II.3})$$

J : Le numéro du jour dans l'année compté à partir du premier janvier.

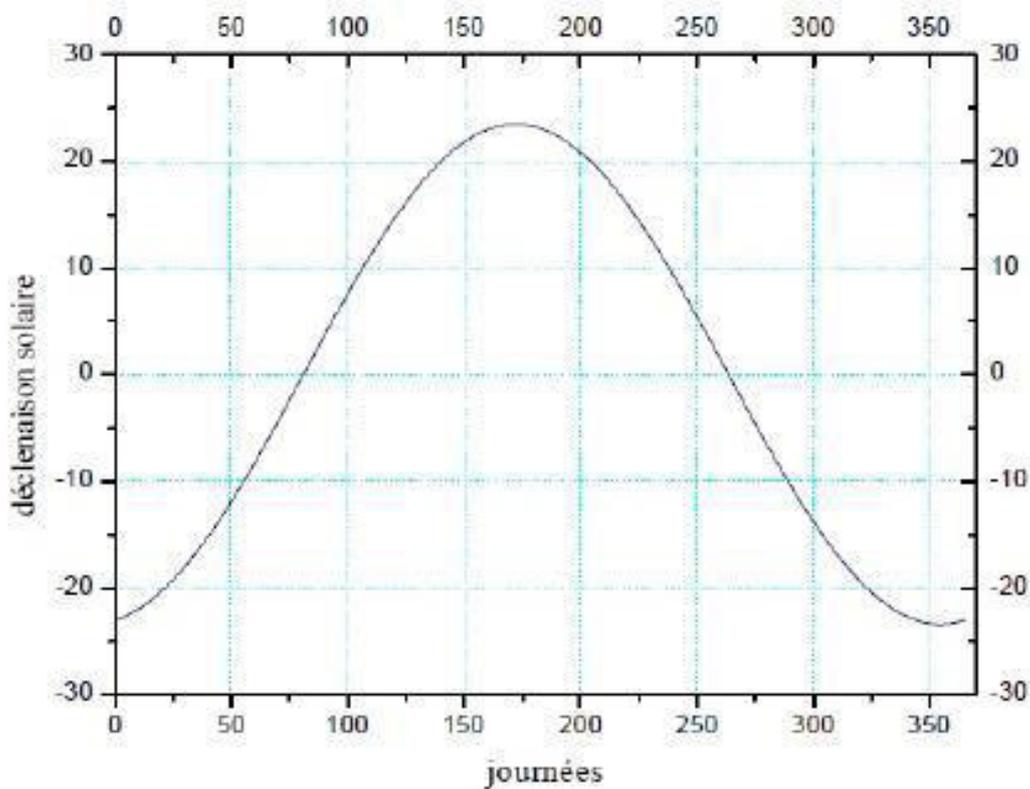


Figure II.8: La déclinaison du soleil en fonction des jours de l'année.

- **Angle horaire**

C'est l'angle (ω) compris entre la méridienne origine passant par le sud et la projection du soleil sur le plan équatorial, il mesure la course du soleil dans le ciel. Il est donné par la relation suivante:

$$\omega = 15 (\text{TSV} - 12) \quad (\text{II.4})$$

TSV: Temps solaire vrai. Il vaut 0° à midi solaire, ensuite chaque heure correspond à une variation de 15°, car la période de la terre dans sa rotation sur elle-même est égale à 24h. compté négativement le matin lorsque le soleil est vers l'est et positivement le soir.[17]

- **Angle d'incidence**

C'est l'angle (ζ) entre le rayon solaire direct et la normale extérieure de la surface du plan.

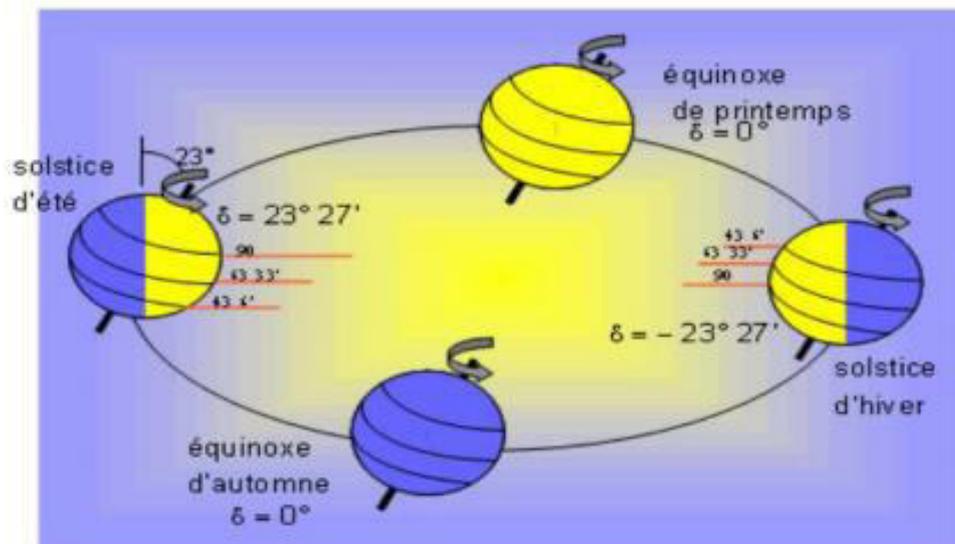


Figure II.9: Variation annuelle de la déclinaison solaire.

II.4. Le rayonnement solaire

C'est un rayonnement thermique qui se propage sous la forme d'onde électromagnétique, il donne un éclairage énergétique à-peu-près constant appelé de ce fait constante solaire.[18]

La constante solaire est la quantité d'énergie totale envoyée par le soleil à la limite de l'atmosphère terrestre sur une surface unité perpendiculaire aux rayonnements solaires. La valeur moyenne (C_0) de la constante solaire actuellement retenue est de 1353 W/m^2 . On peut calculer la valeur de constante solaire « C^* » en fonction du numéro du jour de l'année « N » par la relation suivante (donnée par [16]):

$$C^* = C_0 + 0.033 \times (\cos 0.948 \times N) \quad (\text{II.5})$$

La traversée de l'atmosphère modifie la composition spectrale du rayonnement solaire extraterrestre par des différents phénomènes tels que l'absorption, la réflexion, la réfraction et la diffusion. Le rayonnement global solaire arrivant au sol représente essentiellement la somme de trois composantes :

- **Le rayonnement direct (S) :**

CHAPITRE II : Les centrales photovoltaïques

Est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications.[19]

- **Le rayonnement diffus (D) :**

Est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.

- **Le rayonnement réfléchi (R) :**

Est celui réfléchi contre un obstacle tel que l'eau ou la neige avant de frapper le plan horizontal. [19]

Les notations utilisées pour les composantes du rayonnement solaire sur une surface horizontale sont données dans le Tableau II.1.

Tableau II.1: Rayonnement solaire sur un plan horizontal.

Irradiation solaire : Energie reçue pendant une certaine durée W/m^2 ou kWh/m^2 .	Direct	S	
	Diffuse	D	
	Réfléchi	R	
	Globale	G	$G=S+D + R$

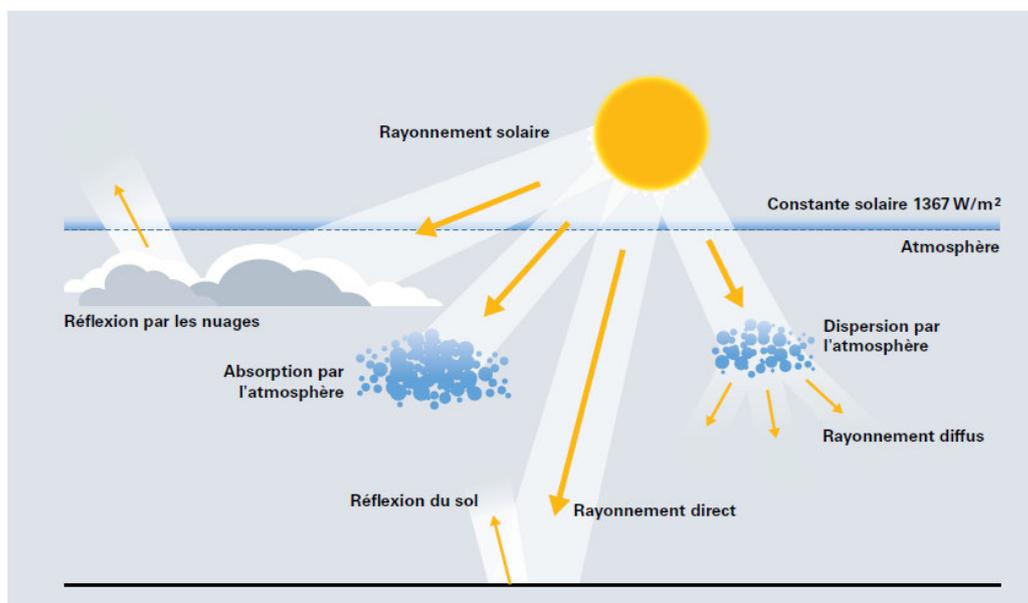


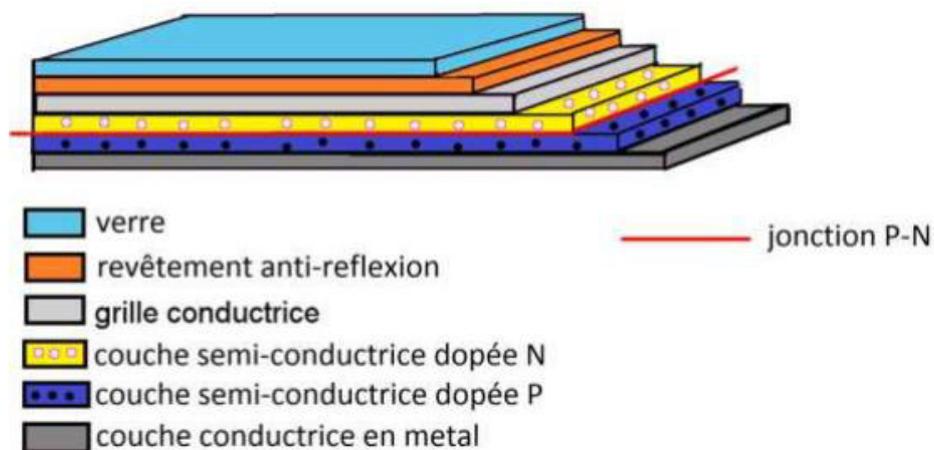
Figure II.10 : Les composantes du rayonnement solaire global.

II.5- Les cellules photovoltaïques

La cellule photovoltaïque 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. 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 0.3V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule.[20]

Les cellules photovoltaïques sont constituées:

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent pas franchir sans excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électriques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité relativement bonne. D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode. Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouche réfléchissant juste en dessous de semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.



FigureII.11: structure basique d'une cellule solaire.

II.5.1- Les semi-conducteurs

II.5.1.1- Description

Les semi-conducteurs sont des éléments naturels sensibles à la lumière visible et invisible (rayon ultraviolet, infrarouge...). Ils conduisent le courant nettement moins bien que les métaux, mais d'autant mieux que la température est plus élevée (Exemples types: le silicium Si, le germanium Ge). La bonne conductivité électrique des métaux est due à la présence des électrons libres du gaz électronique qui parcourent tout le réseau métallique. La filière la plus avancée sur le plan technologique et industriel est la réalisation de cellules à base de silicium. Ce dernier est l'élément le plus utilisé car il est peu coûteux et il disponible en quantité (il constitue 28% de l'écorce terrestre), sous forme de silice ou dioxyde de silicium (SiO_2) contenu dans le quartz ou le sable, stable et non toxique. Le silicium métallurgique (MG-Si) résulte de la transformation de la silice à l'intérieur d'un four à arc (figure II.12) dont on extrait l'oxygène. Cette réaction est appelée réduction carbo-thermique.

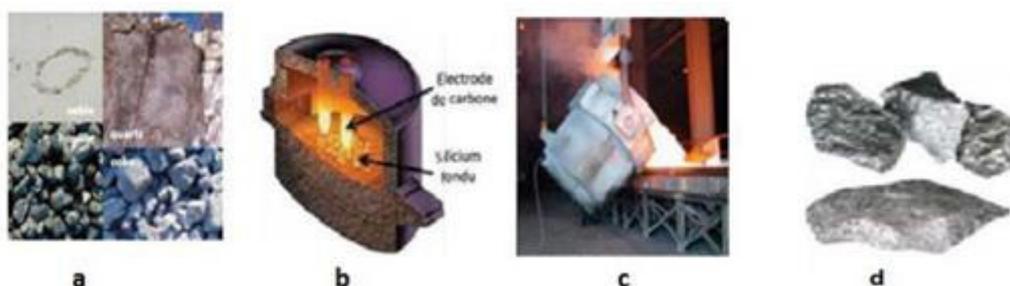


Figure II.12:Raffinage de silicium.

Le silicium a une structure cristalline constituée d'un assemblage régulier d'atomes (Figure II.13). Ils mettent en commun des électrons de leur couche périphérique pour constituer des liaisons covalentes. La couche électronique périphérique assure la stabilité de l'atome, elle est complète lorsqu'elle comporte 8 électrons pour atteindre la saturation (la couche périphérique ne peut en comporter d'avantage).[21]

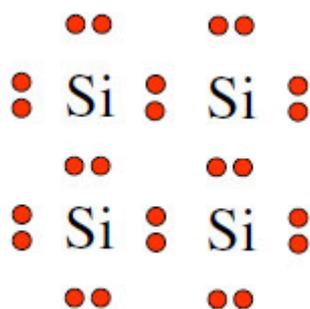


Figure II.13: Structure cristalline de silicium.

La disposition des électrons peut être résumée au moyen du diagramme de bandes d'énergie illustré dans la figure II.14. Celle-ci montre les niveaux énergétiques que peuvent occuper les électrons périphériques issus des atomes du cristal. Les niveaux sont repartis en deux bandes: la bande inférieure, appelée bande de valence est réservée aux électrons participant aux liaisons covalentes et la bande supérieure, ou bande de conduction, est occupée par les électrons de conduction. Les bandes sont séparées par une région inoccupée appelée bande interdite. Au zéro absolu de la température, les électrons participent tous aux liaisons covalentes et occupent la bande de valence, la bande de conduction est vide et le matériau ne peut conduire le courant électrique.[22] Lorsque la température augmente, des paires électron-trou sont générées : plusieurs électrons de la bande de valence gagnent de l'énergie et transitent vers la bande de conduction. Les vacances de charge résultantes dans la bande de valence correspondent aux trous. Sous l'action d'un champ électrique, les électrons de conduction peuvent gagner de l'énergie cinétique, ils transitent alors, au sein de la bande de conduction, vers des niveaux d'énergie plus élevés. Les trous peuvent également gagner de l'énergie cinétique en transitant au sein de la bande de valence.[22]

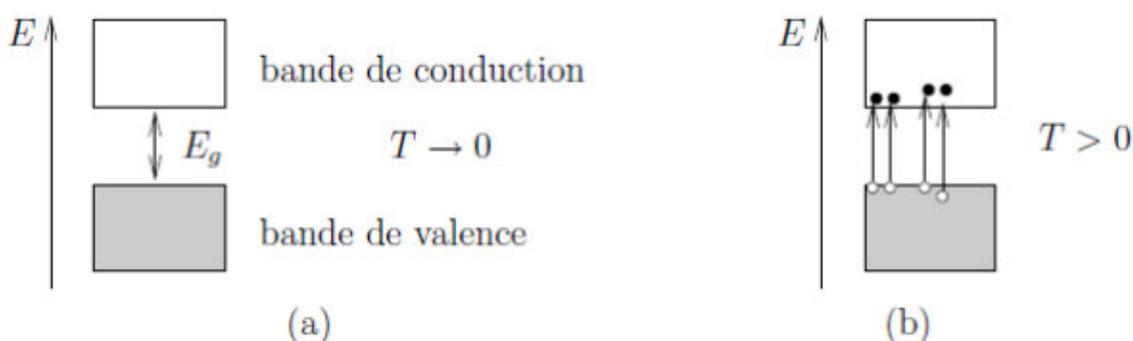


Figure II.14: Diagramme de bandes d'énergie du silicium.

II.5.1.2- Le dopage

CHAPITRE II : Les centrales photovoltaïques

Le silicium à l'état pur est un semi-conducteur intrinsèque, avec une bande au milieu "gap" située entre une bande de valence pleine (BV) et une bande de conduction vide (BC). Avec une BC vide, une BV totalement remplie et aucun état permis dans le gap, la seule possibilité n'est la génération thermique de paires électrons-trous à travers tout le gap du semi-conducteur. Avec un gap de 1,1eV et $T= 300K$, la probabilité de générer une telle paire est extrêmement faible. Un couplage avec les photons est nécessaire et la probabilité de cet événement est encore plus rare. Le silicium pur est donc extrêmement résistif à température ambiante[23]. La solution utilisée est le dopage du silicium qui consiste en :

- L'ajout de phosphore (cinq électrons de valence - (K) 2 (L) 8 (M) 5) au silicium (quatre électrons de valence - (K) 2 (L) 8 (M) 4) se traduit par un excès d'électrons dans le réseau, cette association forme alors un semi-conducteur de type N (conduction assurée par des charges négatives).
- L'ajout d'aluminium (trois électrons de valence - (K) 2 (L) 8 (M) 3) au silicium se traduit par un défaut d'électrons formant des trous dans le réseau, il s'agit alors d'un semi-conducteur de type P (conduction assurée par des charges positives).

Le dopage est un moyen d'augmenter la conductivité électrique du corps. Les atomes du matériau de dopage, ou dopant (donneurs ou accepteurs d'électrons), et ceux de l'hôte ont un nombre différent d'électrons périphériques. Le dopage produit ainsi des particules électriques chargées positivement (type P) ou négativement (type N).[24]

II.5.1.3- L'effet photovoltaïque

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photovoltaïque, c'est-à-dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charges (électrons et trous) dans un matériau. Lorsqu'un semi-conducteur est illuminé avec un rayonnement de longueur d'onde appropriée, l'énergie des photons absorbée permet des transitions électroniques depuis la bande de valence vers la bande de conduction du semi-conducteur, générant ainsi des paires électrons-trous, qui peuvent contribuer au transport du courant (photoconductivité) par le matériau lorsqu'on le polarise.[25]

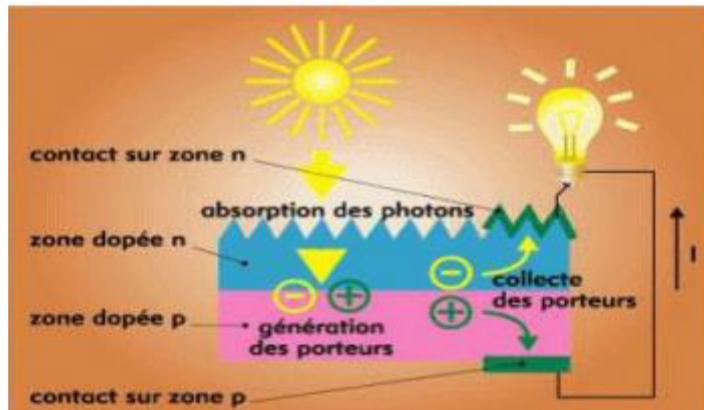


Figure II.15: Effet photovoltaïque.

II.6- Les panneaux solaires

Un panneau solaire est un dispositif énergétique généralement plat et rigide. Il est composé de cellules de silicium, aussi appelées cellules photovoltaïques, capables de capter la lumière du soleil puis de la transformer en courant continu grâce à l'effet photovoltaïque.

Les panneaux photovoltaïques standards mesurent 1,7 mètre de long et 1,0 mètre de large. L'épaisseur de leur cadre en aluminium est de 3 à 4 cm. Un panneau classique pèse environ 19 kg, soit 11 kg par m².^[26]

II.6.1- Fabrication des panneaux solaires

La première étape de fabrication consiste à produire des lingots de silicium ultra-pur (à 99,999999 %). Pour ce faire, on ajoute à des centaines de kilogrammes de fragments de silicium, une petite quantité de bore, élément semi-métallique qui permet de donner une polarité positive au silicium. Ces fragments enrichis sont ensuite cuits dans un four à plus de 1500 degrés. Le silicium est sorti du four sous forme de barres (lingots). Les lingots sont découpés en fines plaques appelées « wafers » à l'aide de scies à fil. L'épaisseur des wafers est inférieure à 200 microns, soit l'équivalent d'une feuille de papier.^[26]

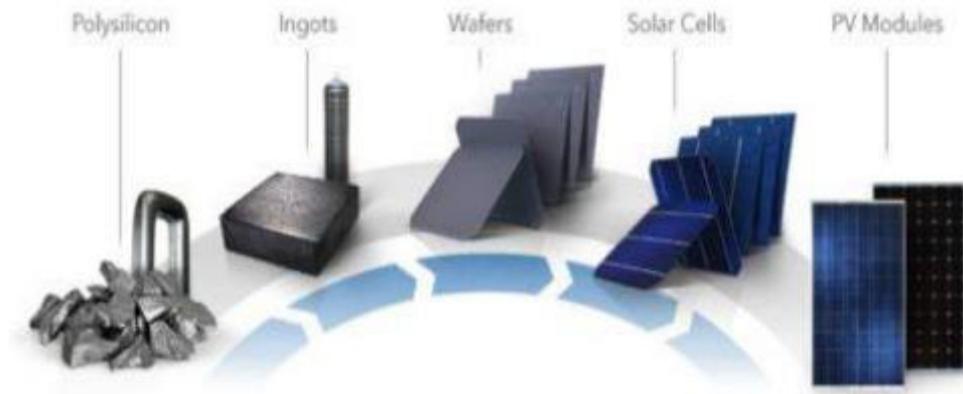


Figure II.16 : étapes de fabrication d'un panneau solaire.

L'étape suivante consiste à traiter chimiquement le wafer pour lui permettre de moins réfléchir la lumière. A l'issue de ce traitement, la surface des wafers, lisse au départ, est constituée de minuscules pyramides. Cette texture en relief permet d'augmenter la conversion de la lumière en électricité. Pour que le wafer devienne une cellule photovoltaïque, du phosphore, corps simple non métallique et lumineux dans l'obscurité, est déposée à très haute température sur sa face avant. Cet apport de phosphore permet de donner une polarité négative à cette face avant. Le wafer est maintenant une cellule photovoltaïque, disposant d'une face arrière de polarité négative et d'une face avant de polarité positive.[26]

Finalement, on dispose des contacts métalliques sur les faces avant et arrière de la cellule pour collecter les électrons libérés dans le silicium. Chaque cellule photovoltaïque fonctionne donc comme une pile électrique, avec un pôle positif et un pôle négatif.

Les panneaux les plus courants sont composés de 60 cellules. Les cellules sont disposées entre deux pellicules de résine transparente. Un film en polyester est ensuite placé sur la face arrière. Ce sandwich est placé dans un tunnel dans lequel il est chauffé. Les deux pellicules de résine encapsulent les cellules de façon totalement étanche pour les protéger de toutes les agressions extérieures. Ensuite, on place sur la face avant un verre trempé, dont l'épaisseur est de 3 à 4 mm. Le panneau est ensuite équipé de son cadre en aluminium dont la composition et le profil ont été étudiées pour offrir les meilleures qualités de résistance mécanique. Enfin, une boîte de jonction est fixée à l'arrière du panneau solaire, il s'agit de la borne de sortie de l'électricité solaire.

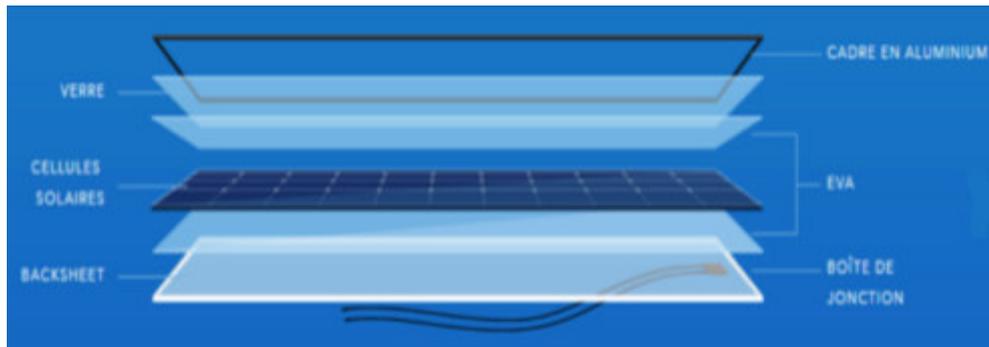


Figure II.17: Composants d'un panneau photovoltaïque.

II.6.2- Principe de fonctionnement d'un panneau solaire

Lorsqu'un photon de la lumière arrive, son énergie crée une rupture entre un atome de silicium et un électron, modifiant les charges électriques. Les électrons, chargés négativement, vont alors dans la zone N et les atomes, chargés positivement constituent la zone P. Une différence de potentiel électrique, c'est-à-dire une tension électrique, est ainsi créée. C'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque à la surface, le contact électrique (électrode négative) est établi par la grille afin de permettre à la lumière du soleil de passer à travers les contacts et de pénétrer dans le silicium.

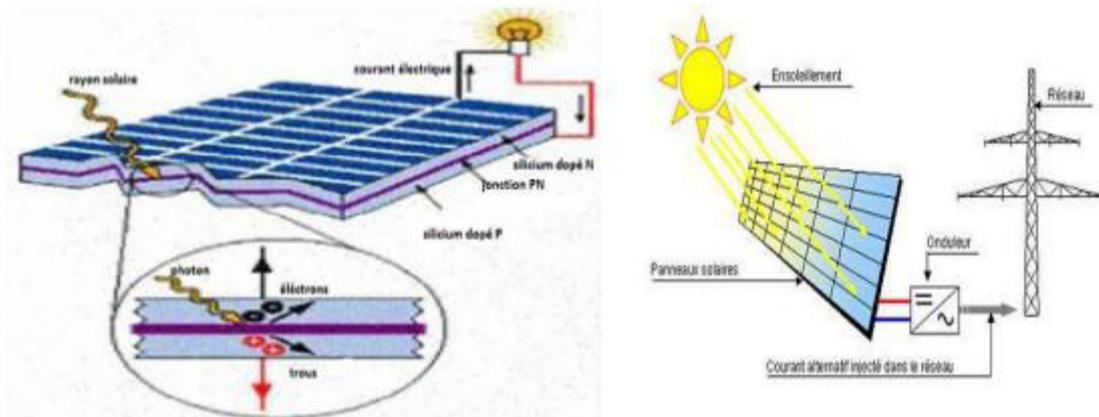


Figure II.18: Principe de fonctionnement d'un panneau solaire.

II.6.3- Les caractéristiques électriques d'un panneau solaire

Un panneau photovoltaïque est composé de cellules branchées en série et/ou en parallèle. Ces cellules sont soudées les unes aux autres, traditionnellement sur leur face avant. Dans le présent travail, le module PV utilisé est formé de 36 cellules en série et 2 branches en parallèle et le générateur se compose de 15 modules connectés en série et de 2 branches en

CHAPITRE II : Les centrales photovoltaïques

parallèle. Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode by-pass, qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée.[20]

Le courant et la tension aux bornes d'un module photovoltaïque sont exprimés par la relation suivante:

$$I_{mod} = N_p \times I \quad (II.6)$$

$$V_{mod} = N_s \times V \quad (II.7)$$

I : Courant de la cellule PV.

I_{mod}, V_{mod} : Respectivement courant et tension aux bornes du module PV.

N_p, N_s : Sont le nombre de cellules connectées en série et en parallèle respectivement.

Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellules en série ($V_{co} N_s = 0.6 \times 36 = 21.6$ V) afin d'obtenir une tension optimale de 12 V proche de celle d'une tension de batterie.[25]

La figure II.19 montre les variations de la tension et du courant électrique du panneau solaire pour différents éclairagements. On remarque que l'éclairement influe directement sur le courant de court-circuit mais de manière plus faible sur la tension à vide. On remarque que pour chaque éclairage il y a une courbe $I = f(V)$ qui lui correspond. Ces courbes de courant $I(V)$ représentent la caractéristique de courant électrique du panneau.

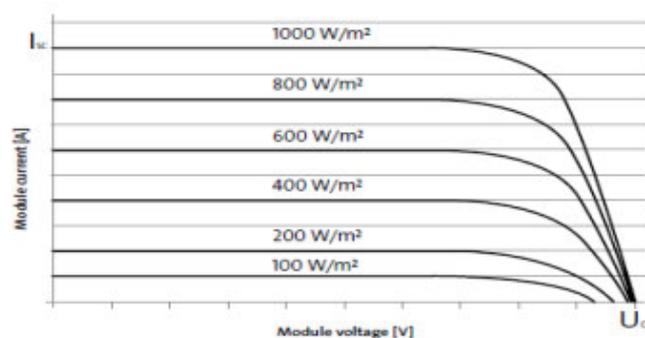


Figure II.19: Caractéristique $I(V)$ du panneau pour différents éclairagements.

De même, la figure II.20 montre la caractéristique de puissance $P(V)$ et qui est aussi importante que la caractéristique $I(V)$. La relation qui donne la puissance est comme suit :

$$P = V_{mod} \times I_{mod} \quad (II.8)$$

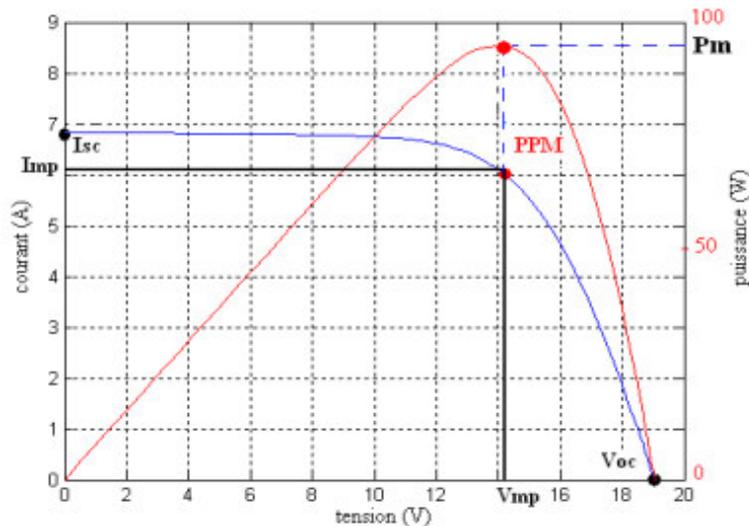


Figure II.20 : Caractéristique $P (V)$ et $I (V)$ du module.

D'après les caractéristiques $I (V)$ et $P (V)$, on peut déterminer les points essentiels suivants :

- **Courant de court-circuit (I_{sc}) :** C'est le courant débité par la cellule quand la tension à ses bornes est nulle. En pratique ce courant est très proche du courant photovoltaïque.
- **Tension de circuit ouvert (V_{oc}) :** C'est la tension qui apparaît aux bornes de la cellule quand le courant débité est nul.
- **Point de puissance maximale (PPM) :** C'est le point où le générateur travaille en rendement maximal et produit une puissance de sortie maximale. I_m et V_m représentent respectivement le courant et la tension correspondants au point PPM.
- **Rendement :** Le rendement énergétique d'un générateur photovoltaïque est défini par le rapport entre la puissance électrique maximale générée et la puissance incidente sur sa superficie [26]. Le rendement d'une cellule photovoltaïque est dans le cas général assez faible, de l'ordre de 10 à 20 %.

$$\eta = \frac{P_{max}}{G.S} \quad (II.9)$$

Avec: G : Eclairage en Watt/mètre carré (W/m^2).

S : Surface active du générateur photovoltaïque en mètre carré (m^2).

P_{max} : Puissance maximale délivrée par le générateur PV en watt (W).

CHAPITRE II : Les centrales photovoltaïques

- **Facteur de forme :** C'est le facteur qui indique le degré d'idéalité de la caractéristique $I(V)$. Le facteur de forme d'une cellule de bonne qualité est supérieur à 0.7 [27], il s'exprime par la relation ci-après:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} * I_{sc}} \quad (II.10)$$

$$FF = \frac{I_m * V_m}{V_{oc} * I_{sc}} \quad (II.11)$$

L'association de panneaux solaires en série (Figure II.21) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque pour le même courant et l'association en parallèle (Figure II.22) permet d'augmenter le courant du générateur photovoltaïque pour la même tension.

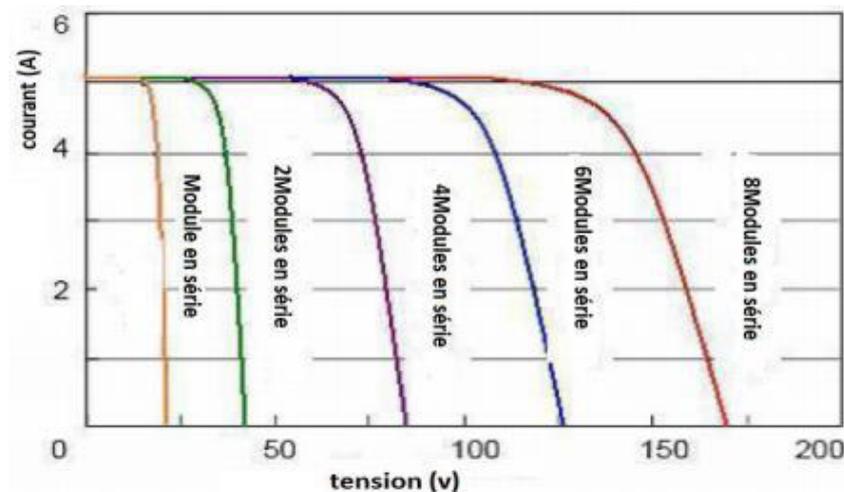


Figure II.21:Caractéristiques $I(V)$ des modules branchés en série.

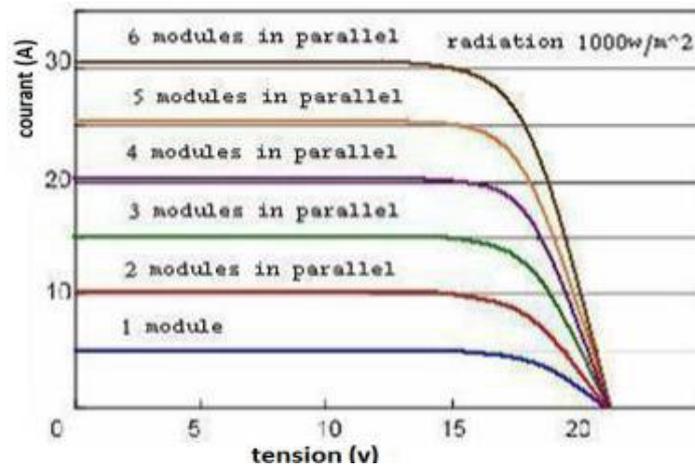


Figure II.22 : Caractéristiques $I(V)$ des modules branchés en parallèle.

II.6.4- Types de panneaux solaires

Il existe principalement trois types de panneaux solaires, les panneaux monocristallins, les panneaux poly cristallins et les panneaux amorphes.



Figure II.23 : Types des panneaux solaires

- **Panneau monocristallin** : Il est reconnaissable par une couleur foncée et uniforme. On peut facilement constater l'assemblage des cellules qui composent le panneau (Figure II.23).
- **Panneau poly cristallin** : Ils se reconnaissent par une couleur bleutée et non uniforme. Leur fabrication à partir de copeaux de silicium utilise toute la surface du panneau, il n'y a donc pas d'espaces d'assemblage comme dans les panneaux monocristallins.
- **Panneau amorphe** : Apparu récemment, ce panneau se reconnaît par une couleur grise à marron foncé et uniforme avec un grain très fin. Cette uniformité est due à un procédé de fabrication de dépôt du silicium en couches minces.[30]

CHAPITRE II : Les centrales photovoltaïques

Tableau II.2 : Types de panneaux solaires.

Type de panneau	Avantages	Inconvénients
Monocristallin	<ul style="list-style-type: none">▪ Bon rendement de 15 % en moyenne.▪ Rendement de conversion (le passage de l'énergie absorbée à l'énergie utile) et de 130 Wc/m².▪ Large choix de gamme et nombreux fabricants.▪ Durée de vie de 25 à 30 ans.	<ul style="list-style-type: none">▪ Coût élevé▪ Rendement faible quand l'éclairage diminue.▪ Taille et poids plus importants ; utilise plus de silicium pour sa fabrication.▪ Rendement sensible aux températures élevées.
Poly cristallin	<ul style="list-style-type: none">▪ Coût plus faible que les panneaux Monocristallins.▪ Rendement de 10% en moyenne.▪ Rendement de conversion est de 100 Wc/m².	<ul style="list-style-type: none">▪ Rendement faible quand l'éclairage diminue.▪ Durée de vie légèrement inférieure.
Amorphe	<ul style="list-style-type: none">▪ Un peu moins cher que le panneau monocristallin.▪ Fonctionne avec un éclairage faible ou diffus.▪ Intégration sur supports souples ou rigides.	<ul style="list-style-type: none">▪ Rendement faible en plein soleil, de 6 % en moyenne▪ Rendement de conversion de 60 Wc/m².▪ Taille et poids des panneaux plus élevés.

II.7- Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons présenté la description du soleil, du gisement solaire et particulièrement en l'Algérie. Ensuite, nous avons donné les composantes et les caractéristiques principales du rayonnement. Et enfin, nous avons traité les généralités des panneaux photovoltaïques leurs effet, principe de fonctionnement et leurs caractéristiques électriques.

CHAPITRE III :
MODELISATION DE
LA CENTRALE
HYBRIDE

III.1- Introduction

Le but de notre étude est de déterminer les performances de la centrale électrique hybride afin de pouvoir montrer l'importance de l'apport solaire sur la production, le rendement et de la réduction de la pollution de l'atmosphère. Pour cela nous avons utilisé le logiciel de simulation TRNSYS qui comporte plusieurs modules intégrés permettant de modéliser l'ensemble de la centrale.

III.2- Equations générales

III.2.1- Performances de la turbine à gaz

La conversion de la chaleur dégagée de la combustion du carburant en énergie mécanique dans une turbine à gaz est réalisée suivant le cycle théorique de Brayton. Les grandeurs principales qui fixent le cycle thermodynamique de turbine à gaz sont la température minimale (température ambiante), la température maximale (température en sortie de chambre de combustion) et le rapport de pression ou taux de compression du compresseur. On présente dans ce qui suit la méthode de détermination des performances de la turbine à gaz.

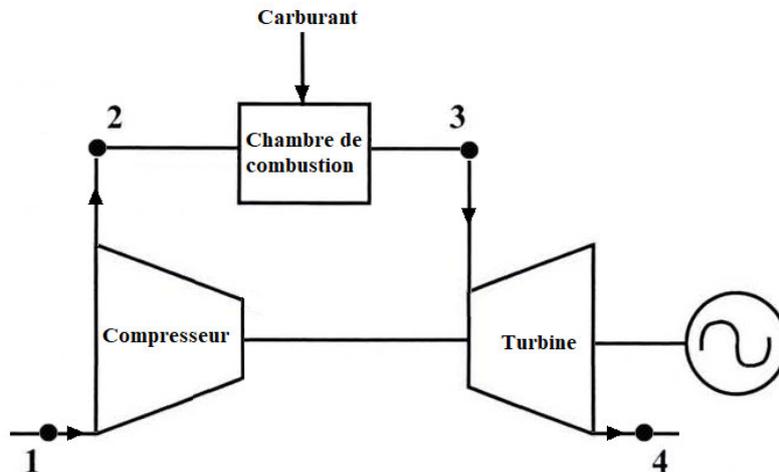


Figure III.1 : Schéma simplifié de la turbine à gaz

Dans le cycle idéal de Brayton la compression (1-2) et la détente (3-4) sont supposées isentropiques et le réchauffement (2-3) et le refroidissement (4-1) sont supposés isobares. On suppose aussi que l'air et les gaz brûlés sont des gaz parfaits.

- **La compression**

Température de compression isentropique T_{2s} :

$$T_{2s} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} T_1 \quad (\text{III.1})$$

Le travail de compression isentropique w_{Cs} par kilogramme d'air :

$$w_{Cs} = h_{2s} - h_1 = C_{Pa}(T_{2s} - T_1) \quad (\text{III.2})$$

Le travail de compression réel w_C par kilogramme d'air :

$$w_C = h_2 - h_1 = \frac{w_{Cs}}{\eta_{Cs}} = C_{Pa}(T_2 - T_1) \quad (\text{III.3})$$

$$\text{Avec : } T_2 = \frac{(T_{2s}-T_1)}{\eta_{Cs}} + T_1 \quad (\text{III.4})$$

- **La combustion**

La chaleur fournie par la combustion :

$$Q_C = \dot{m}_c P_{cI} \eta_{CC} \quad (\text{III.5})$$

Le bilan énergétique donne :

$$\dot{m}_a h_2 + \dot{m}_c h_c + \dot{m}_c P_{cI} \eta_{CC} = (\dot{m}_a + \dot{m}_c) h_3 \quad (\text{III.6})$$

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{m}_a (h_2 - h_3)}{h_3 - h_c - P_{cI} \eta_{CC}} = \frac{\dot{m}_a C_{Pa} (T_2 - T_3)}{C_{Pg} T_3 - C_{Pc} T_c - P_{cI} \eta_{CC}} \quad (\text{III.7})$$

- **La détente**

Température de détente isentropique T_{4s} :

$$T_{4s} = \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{\gamma_g-1}{\gamma_g}} T_3 \quad (\text{III.8})$$

Le travail de détente isentropique w_{Ts} par kilogramme d'air :

$$w_{Ts} = h_{4s} - h_3 = C_{Pg}(T_{4s} - T_3) \quad (\text{III.9})$$

Le travail de détente réel w_T par kilogramme d'air :

$$w_T = h_4 - h_3 = \frac{w_{Ts}}{\eta_{Ts}} = C_{Pg}(T_4 - T_3) \quad (\text{III.10})$$

$$\text{Avec : } T_4 = \frac{(T_{4s}-T_3)}{\eta_{Ts}} + T_3 \quad (\text{III.11})$$

- **La puissance nette fournie par le cycle**

$$\dot{w}_{net} = [(\dot{m}_a + \dot{m}_c)w_T - \dot{m}_a w_C] \eta_{mec} \quad (\text{III.12})$$

La puissance électrique fournie par le générateur :

$$\dot{w}_{elec} = [(\dot{m}_a + \dot{m}_c)w_T - \dot{m}_a w_C] \eta_{mec} \eta_{gen} \quad (\text{III.13})$$

- **Le rendement thermique global de l'installation turbine à gaz**

$$\eta_{th} = \frac{\dot{w}_{elec}}{\dot{m}_c P_{CI}} \quad (\text{III.14})$$

III.2.2- Panneaux solaires photovoltaïques

Inclinaison et orientation optimales des capteurs photovoltaïques :

L'énergie fournie par les capteurs photovoltaïques est directement proportionnelle à l'ensoleillement. Afin d'optimiser au mieux l'installation solaire il faut donc tenir compte de ce facteur, qui dépend à son tour du lieu de l'installation, de l'orientation et de l'inclinaison de ces capteurs.

Idéalement, Ils doivent être orientés en plein Sud dans l'hémisphère Nord et en plein Nord dans l'hémisphère Sud, à l'écart des zones ombragées, et inclinés d'un angle qui permet l'optimisation de l'énergie récupérée. Un plan incliné est caractérisé par son inclinaison β (par rapport à l'horizontale), et son orientation ou azimut χ par rapport au sud. [28]

Le tableau suivant donne les valeurs de l'inclinaison recommandée des capteurs photovoltaïques pour une utilisation annuelle constante en fonction de la latitude. [29]

Tableau III.1: Angle d'inclinaison des panneaux en fonction de la latitude

Latitude φ (°)	Inclination β (°)
$\varphi < 10^\circ$	10°
$10^\circ < \varphi < 30^\circ$	φ
$30^\circ < \varphi < 40^\circ$	$\varphi + 10^\circ$
$\varphi > 40^\circ$	$\varphi + 15^\circ$

III.3- Présentation du logiciel TRNSYS

III.3.1- Définition

TRNSYS (Transient system simulation program) est un logiciel de simulation de systèmes transitoires qui utilise une structure modulaire. Il est l'un des plus utilisés dans l'exécution de simulations énergétiques thermiques ou électriques. TRNSYS dispose d'une bibliothèque très riche contenant des composants couramment utilisés dans les systèmes thermiques ainsi que des composantes de lecture des fichiers externes comme les fichiers météorologiques ou les fichiers de rendement de machines commerciales. Pour cette raison, TRNSYS s'adapte très bien au comportement réel d'un système au fil du temps en considérant les variations météorologiques. TRNSYS est très utile pour la modélisation des systèmes utilisant des sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire, éolienne ou géothermique (University of Wisconsin, 2000).[30]

La conception modulaire et ouverte de TRNSYS, basée sur une définition d'une interface logicielle rigoureuse, a encouragé un grand nombre d'équipes de recherche à intégrer des composants dans cette structure d'accueil d'où la bibliothèque STEC. Ces composants sont ensuite directement utilisables et connectables avec tous les composants existants. Ainsi, de nombreuses collaborations multidisciplinaires ont été réalisées grâce à cette infrastructure.

Quelques 50 familles de composants, disponibles en standard dans une bibliothèque, permettent de simuler, en régime transitoire, les bâtiments (mono ou multizones), les systèmes de chauffage et de climatisation, les plus simples comme les plus complexes, y compris les systèmes solaires innovants.

De nombreuses bibliothèques de modèles TRNSYS sont aujourd'hui disponibles dans le domaine public, couvrant un large spectre d'applications (énergie solaire, éoliennes, hydraulique, microcontrôleurs, photovoltaïque, piles à combustibles, piscines, plafond

rayonnant, planchers chauffants, pompes à chaleur, régulation, stockage d'énergie intersaison, systèmes de climatisation, thermique du bâtiment, tours de refroidissements, turbines à gaz et à vapeur, matériaux à changement de phase...). Ces bibliothèques peuvent être connectées pour effectuer des études pluridisciplinaires.[31]

Le logiciel TRNSYS utilise dans la modélisation des composants appelés « Types ». Les valeurs initiales pour le calcul sont entrées comme « Inputs » et les résultats sont obtenus comme « Outputs ». Lorsqu'un composant est connecté à un autre, les résultats du premier sont les données initiales du second et ainsi de suite.[30]

Les avantages du logiciel TRNSYS sont:

- Approche modulaire, il est extrêmement flexible pour modéliser un ensemble de système thermique à différents niveaux de complexité (modules avec procédures de calcul plus ou moins élaborées).
- L'accès au code source aux utilisateurs de modifier ou d'ajouter des composants qui ne figurent pas dans la librairie d'origine.
- Documentation vaste sur les sous-programmes y compris explications, usages usuels, équations de base.
- Définition très souple de la période de simulation: choix du pas de temps, du début et de la fin de la simulation.

Les inconvénients du logiciel TRNSYS sont :

- Pas de valeur du système par défaut, l'utilisateur doit donc posséder et introduire l'ensemble exhaustif des données définissant le système.
- La bibliothèque est limitée en termes de turbomachines.[32]

III.3.2- Présentation de la bibliothèque STEC

La bibliothèque des composants STEC (Solar Thermal Electric Component), a été par Peter Schwarzbozl (DLR, Allemagne) et Scott Jones (SNL, nouveau Mexique) en 2002. Elles permettent de simuler les systèmes thermiques (solaires et conventionnels) dans le but de produire de l'électricité. Cette bibliothèque n'est pas délivrée en tant que standard avec le logiciel TRNSYS. Les composants de cette bibliothèque sont des modèles basés sur le 1er et le 2eme principe de la thermodynamique.

La figure IV.1 montre la structure des composants de la bibliothèque STEC. Dans notre modélisation, on a utilisé des composants de cette bibliothèque ainsi que des composants standards du logiciel TRNSYS.

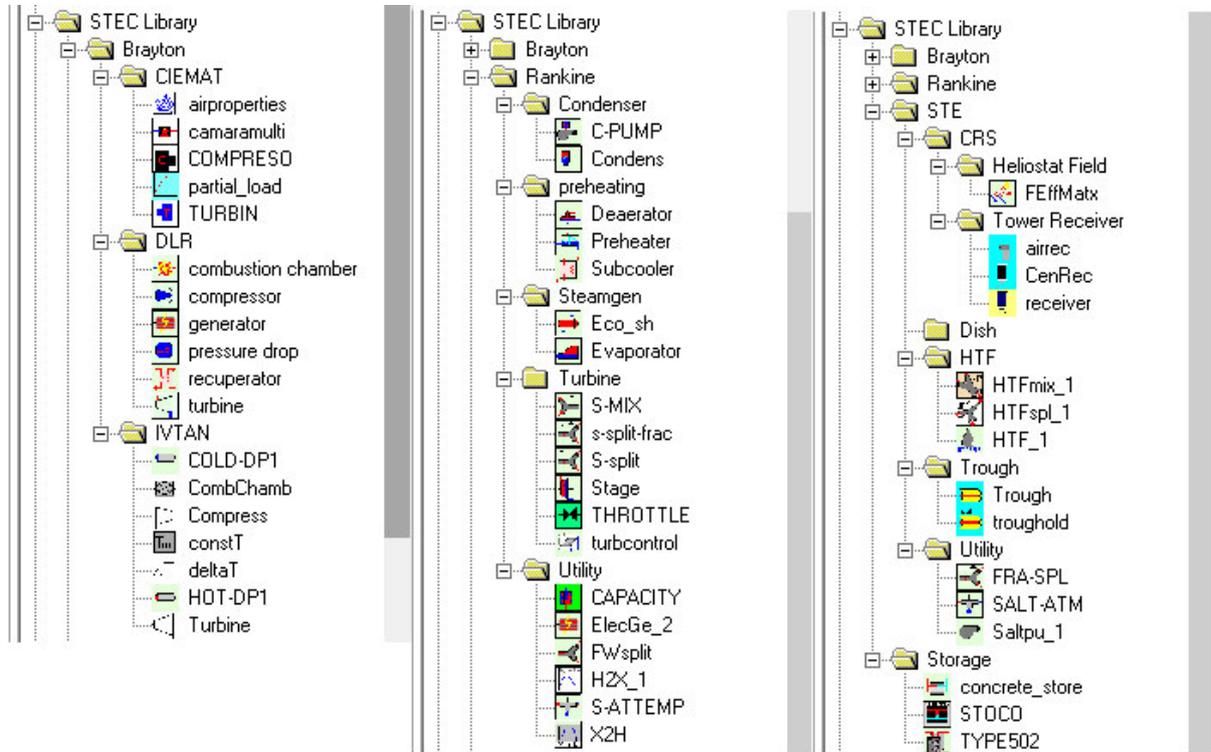


Figure III.2: Structure des composants de la bibliothèque STEC.

III.4- Modélisation de l'installation

La modélisation consiste à choisir pour chaque élément de la centrale un composant TRNSYS qui puisse simuler de manière adéquate son fonctionnement. La figure III.3 représente la modélisation de l'installation comportant le cycle de Brayton avec le champ solaire.

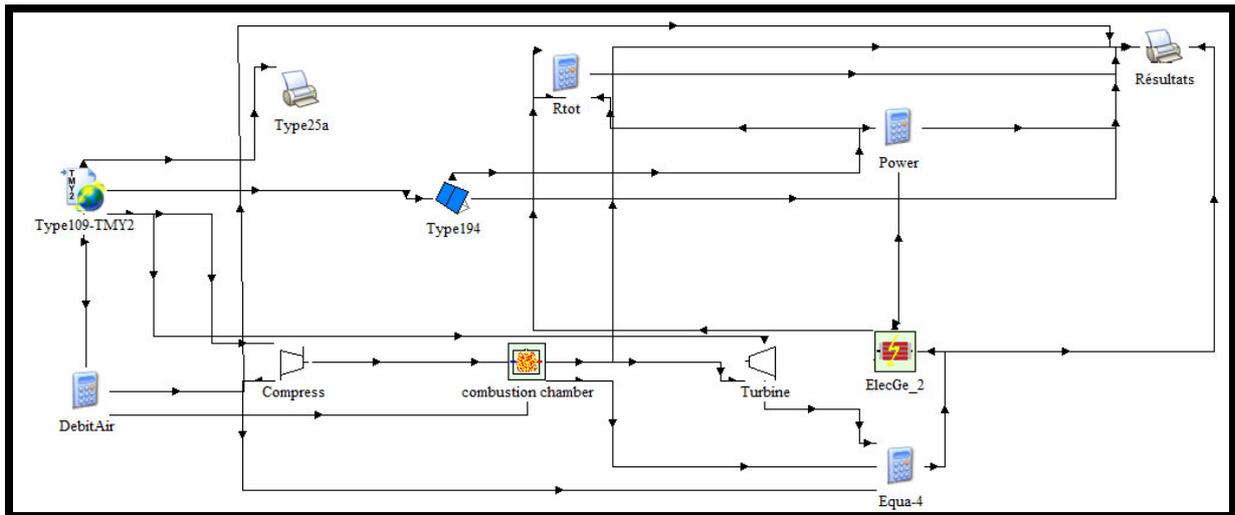


Figure III.3 : Modèle de l'installation sur TRNSYS 16.

III.4.1- Data Reader TMY 2 (Type 109)

Permet de lire les données météorologiques à intervalles réguliers à partir d'un fichier de données de type TMY2, de les convertir au système d'unités souhaité et de traiter les données de rayonnement solaire.

Tableau III.2 : Configuration du composant type 109

Les paramètres		Les entrées		
Data Reader Mode	2	Ground reflectance	0.2	-
Logical unit	30	Slope of surface	0.0	Degrees
Sky model for diffuse radiation	4	Azimuth of surface	0.0	Degrees
Tracking mode	1			

Il faut ensuite désigner le fichier TMY2 relatif à la région d'installation du panneau solaire. La figure III.5 montre en exemple le choix de la région de Bechar.

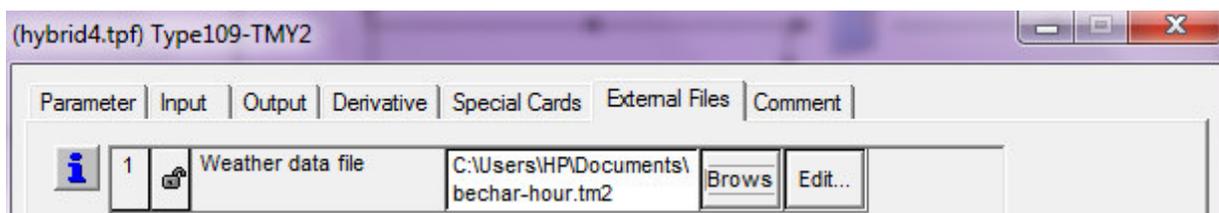


Figure III.4: Désignation du fichier TMY2 de la région du champ solaire.

On a utilisé le logiciel METEONORM (version 7) pour générer les fichiers de données météorologiques de type TMY2. On a choisi trois régions différentes, une au nord, une au centre et la troisième au sud de l'Algérie (Dar El Beida, Bechar et Tamanrasset). Le choix spécifique de ces villes a été conditionné par le fait que ces données résultent des valeurs moyennes relevées par les stations météorologiques.

III.4.2- Champ solaire photovoltaïque (Type 194)

Ce composant calcule la performance électrique du champ de panneaux photovoltaïques et permet de déterminer le courant et la puissance de l'installation à une tension donnée. Les autres sorties comprennent le courant et la tension au point de puissance maximale. Les figures III.5 et III.6 présentent respectivement les paramètres et les entrées du composant.

Le modèle est basé sur la méthode de calcul présentée par DeSoto et al (2005). Le type 194 peut être utilisé dans des simulations impliquant des batteries d'accumulateurs électriques, un couplage direct de charge et des connexions au réseau électrique public. Le modèle détermine le courant et la puissance de la matrice à une tension spécifiée. Les autres SORTIES incluent le courant et la tension au point de puissance maximale.

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Mode	1	-			More...
2	Module short-circuit current at reference conditions	6.5	amperes			More...
3	Module open-circuit voltage at reference conditions	21.6	V			More...
4	Reference temperature	298	K			More...
5	Reference insolation	1000	W/m ²			More...
6	Module voltage at max power point and reference conditions	17	V			More...
7	Module current at max power point and reference conditions	5.9	amperes			More...
8	Temperature coefficient of Isc at (ref. cond.)	0.02	any			More...
9	Temperature coefficient of Voc (ref. cond.)	-0.079	any			More...
10	Number of cells wired in series	36	-			More...
11	Number of modules in series	1	-			More...
12	Number of modules in parallel	320000	-			More...
13	Module temperature at NOCT	313	K			More...
14	Ambient temperature at NOCT	293	K			More...
15	Insolation at NOCT	800	W/m ²			More...
16	Module area	0.89	m ²			More...
17	tau-alpha product for normal incidence	0.95	-			More...

Figure III.5: Configuration du champ solaire.

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Total incident radiation on tilted surface	0				kJ/hr.m ² More...
2	Ambient temperature	0				C More...
3	Load voltage	17				V More...
4	Array slope	30				degrees More...
5	Beam radiation on tilted surface	0				kJ/hr.m ² More...
6	Sky diffuse radiation on tilted surface	0				kJ/hr.m ² More...
7	Ground diffuse radiation on tilted surface	0				kJ/hr.m ² More...
8	Incidence angle on tilted surface	0				degrees More...
9	Solar zenith angle	0				degrees More...

Figure III.6 : Entrées du champ solaire.

III.4.3- Compresseur d'air (Type 371)

Ce composant représente un compresseur d'air axial considéré comme une machine à plusieurs étages. Il permet de calculer la pression et la température à la sortie du compresseur

ainsi que le travail spécifique absorbé. L'air est considéré et les gaz brûlés sont considérés comme des gaz parfaits. La variation de la valeur de l'indice adiabatique en fonction de la température est prise en considération. Par contre, pour la chaleur spécifique à pression constante (C_p), une valeur moyenne constante est utilisée sur la plage de températures de fonctionnement.

Les figures III.7 et III.8 présentent respectivement les paramètres et les entrées du composant.

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Pressure ratio, pi_c	19.9	-			More...
2	Internal efficiency, eta_c	1	-			More...
3	Stages number, n	50	-			More...

Figure III.7 : Paramètres du compresseur.

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Inlet temperature, T1	20	C			More...
2	Inlet pressure, P1	100000	Pa			More...

Figure III.8 : Entrées du compresseur.

Afin de prendre en compte l'influence des variations de la pression et de la température sur le débit massique d'air à l'entrée du compresseur, on a considéré l'air comme un gaz parfait.

La turbine à gaz est utilisée pour produire de l'énergie électrique donc la vitesse de rotation de l'ensemble compresseur-turbine est constante. Le débit volumique d'air aspiré par le compresseur est par conséquent constant et on peut écrire :

$$q_v = S v = Cste \quad (III.15)$$

Le débit massique s'écrit :

$$\dot{m} = \rho q_v \quad (III.16)$$

Au régime nominal :

$$\dot{m}_0 = \rho_0 q_v \quad (III.17)$$

$$D'o\grave{u} : \dot{m} = \frac{\rho}{\rho_0} \dot{m}_0 \quad (\text{III.18})$$

En considérant l'air comme un gaz parfait :

$$P V = n R T = \frac{m}{M} R T \quad (\text{III.19})$$

La masse volumique s'exprime :

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{M P}{R T} \quad (\text{III.20})$$

La masse volumique au régime nominal :

$$\rho_0 = \frac{M P_0}{R T_0} \quad (\text{III.21})$$

Le débit massique s'écrit alors :

$$\dot{m} = \frac{P T_0}{T P_0} \dot{m}_0 \quad (\text{III.22})$$

On a donc inséré dans notre modèle cette équation (III.22), qui calcule le débit massique d'air en fonction de la pression et la température de l'air atmosphérique.

III.4.4- Chambre de combustion (Type 426)

Ce modèle décrit une chambre de combustion adiabatique pour différents combustibles liquides ou gazeux. L'utilisateur doit définir le combustible par le pouvoir calorifique inférieur et le rapport massique des éléments combustibles. Le modèle permet deux modes de fonctionnement différents. Dans le premier cas pour une température de sortie donnée, le débit massique de carburant requis est calculé, dans le second cas, c'est le débit massique de carburant qui est donnée et la température de sortie est calculée. À côté de cela, une perte de charge est évaluée, basée sur une valeur de référence spécifiée par l'utilisateur en fonction des conditions d'entrée.

En plus, ce composant calcule entre autres, le débit massique de CO₂, La puissance calorifique de la combustion et l'enthalpie des gaz à la sortie. Les figures III.9 et III.10 présentent respectivement les paramètres et les entrées du composant.

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	operating mode (mode 1 or 2)	2	-			More...
2	lower calorific value	45860				kJ/kg More...
3	C mass ratio	0.7318				More...
4	H2 mass ratio	0.2341				More...
5	S mass ratio	0				More...
6	N2 mass ratio	0.0159				More...
7	O2 mass ratio	0.0182				More...
8	H2O mass ratio_in	0				More...
9	ashes mass ratio	0				More...
10	relative pressure drop_design	0.04				More...
11	design or off-design (mode 3 or 4)	3				More...
12	inlet temperature_off-design if mode 4	0				C More...
13	inlet pressure_off-design if mode 4	0				BAR More...
14	inlet mass_flow_off-design if mode 4	0				kg/hr More...

Figure III.9 : Paramètres de la chambre de combustion.

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	inlet air temperature	600				C More...
2	inlet air flow rate	135				kg/s More...
3	fuel flow rate if mode 1	0				kg/hr More...
4	outlet temperature if mode 2	1200				C More...
5	inlet pressure	1200000.030315				Pa More...
6	inlet enthalpy	0				kJ/kg More...

Figure III.10 : Entrées de la chambre de combustion.

III.4.5- Turbine de détente (Type 372)

La turbine de détente est considérée comme une machine axiale à plusieurs étages. Les lois des gaz parfaits sont utilisées pour la simulation. Le fluide de travail est l'air, les produits de combustion et la vapeur injectée sont considérés comme un mélange idéal caractérisé par un indice adiabatique. On suppose que les propriétés thermodynamiques des produits de combustion sont les mêmes que celles de l'air. Les dépendances des indices adiabatiques de l'air et de la vapeur avec la température ont été prises en compte. La chaleur spécifique (C_p) a été supposée constante avec une valeur moyenne pour la plage des températures de fonctionnement.

Les figures III.11 et III.12 présentent respectivement les paramètres et les entrées du composant.

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Internal efficiency, eta_t	1	-			More...
2	Stages number	3	-			More...

Figure III.11 : Paramètres de la turbine de détente.

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Inlet temperature, T5	1000	C			More...
2	Inlet pressure, P5	1	BAR			More...
3	Outlet pressure, P6	100000	Pa			More...
4	Fuel flowrate, Gg	0	-			More...
5	Steam flowrate, Gw	0	-			More...

Figure III.12 : Entrées de la turbine de détente.

III.4.6- Générateur d'électricité (Type 375)

Ce composant représente un générateur électrique pouvant être utilisée avec une turbine à gaz ou une turbine à vapeur. Les pertes résultantes de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électriques sont considérées. Le composant calcule la puissance électrique nette produite ainsi que le rendement de l'installation.

Les figures III.13 et III.14 présentent respectivement les paramètres et les entrées du composant.

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Internal efficiency, eta_t	1	-			More...
2	Stages number	3	-			More...

Figure III.13 : Paramètres de la turbine de détente.

CHAPITRE IV :
RESULTATS ET
DISCUSSION

CHAPITRE VI : RESULTATS ET DISCUSSION

VI.1- Données de la centrale

Les fichiers météorologiques de type TMY2 fournissent les données atmosphériques du lieu considéré pour toutes les heures d'une année entière, par conséquent les résultats de la simulation concernent les 8760 heures de l'année en commençant par le premier janvier à zéro heure jusqu'au 31 décembre minuit. Ces fichiers de données météorologiques ont été obtenus par le logiciel METENORM et concernent trois régions, Dar El Beida, Bechar et Tamanrasset.

La centrale étudiée est composée par une turbine à gaz Siemens SGT-800 et un champ solaire de 132000 panneaux photovoltaïques monocristallins JA Solar (Producteur Chinois) de type JAM6(K)-60-295/PR nécessitant une superficie d'installation de 220000 m². Les tableaux VI.1 et VI.2 donnent les caractéristiques respectives.

Tableau IV.1 : Caractéristiques de la turbine à gaz Siemens SGT-800

Puissance de sortie	49,9 MW(e)
Combustible	gaz Naturel, carburant liquide, carburant mixte
Fréquence	50/60 Hz
Rendement	39.1 %
Vitesse de rotation	6600 tr/mn
Rapport de compression	19,9
Débit des gaz brûlés	134,7 kg/s
Température des gaz d'échappement	560 °C

CHAPITRE VI : RESULTATS ET DISCUSSION

Tableau IV.2 : Caractéristiques du panneau JA Solar-JAM6(K)-60-295/PR

Cellule (mm)	Presque carrée Mono 156,75x156,75
Poids (kg)	18,0 (environ)
Dimensions (Lxlxh)	1650x991x35
Puissance nominale maximale dans les conditions normales d'essai (W)	295
Voc : tension à vide (V)	39,64
Vmp : tension au point de puissance maximale (V)	32,03
Isc: courant de court-circuit (A)	9,66
Lmp: intensité au point de puissance maximale (A)	9,21
Rendement par panneau(0/4)	18,04

VI.2- Orientation et angle d'inclinaison des panneaux solaires

La position des modules photovoltaïques par rapport au soleil influe directement sur leurs productions énergétiques. Il est très important de bien les placer pour les utiliser au maximum de leur possibilité. On appelle « Orientation » le point cardinal vers lequel est tournée la face active du panneau (sud, nord, sud-est...). Quant à « l'inclinaison » elle indique l'angle que fait le panneau avec le plan horizontal, elle se compte donc en degrés.

Quand on a le choix, l'orientation idéale d'un module photovoltaïque consiste à l'orienter vers l'Equateur, ce qui fait que pour toutes les régions en Algérie l'orientation optimale est plein sud.

En ce qui concerne l'inclinaison, c'est un peu plus compliqué. Pour une installation PV reliée au réseau, les besoins sont infinis et la production des capteurs solaires n'est donc pas limitée. L'ensoleillement maximum permet donc d'optimiser la production en favorisant une injection maximum sur le réseau. Il faut optimiser la production sur l'année entière.

On a déterminé cet angle optimal pour les trois régions en exécutant la simulation sur TRNSYS pour différents angles d'inclinaison (10 à 65 degrés) et en choisissant ensuite l'angle qui le maximum de puissance annuelle. La figure VI.1 représente les résultats obtenus pour la région de Dar El Beida

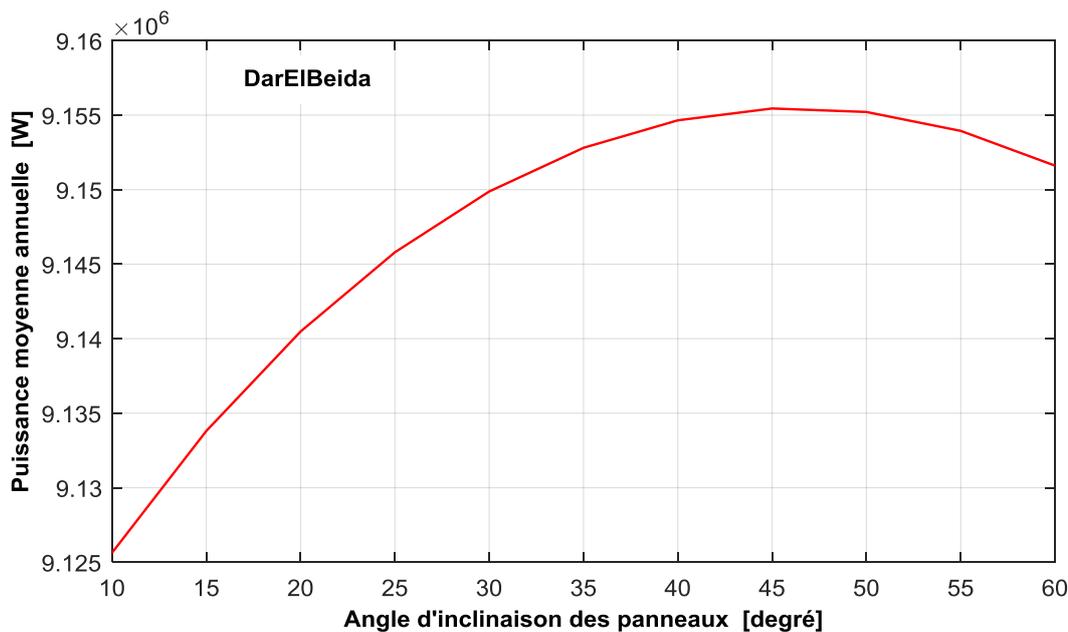


Figure IV.1 : Puissance moyenne annuelle en fonction de l'angle d'inclinaison des panneaux photovoltaïques pour la région Dar El Beida.

VI.3- Ensoleillement des trois régions

Les figures IV.2, IV.3 et IV.2 présentent l'ensoleillement global moyen mensuel sur l'année pour les trois régions.

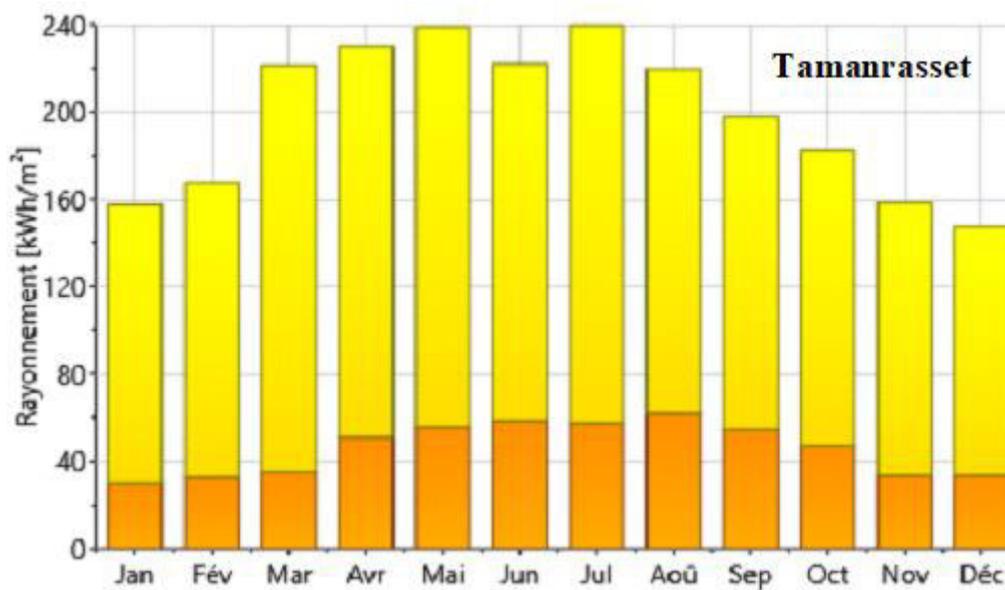


Figure IV.2 : Rayonnement global moyen mensuel pour la région de Tamanrasset.

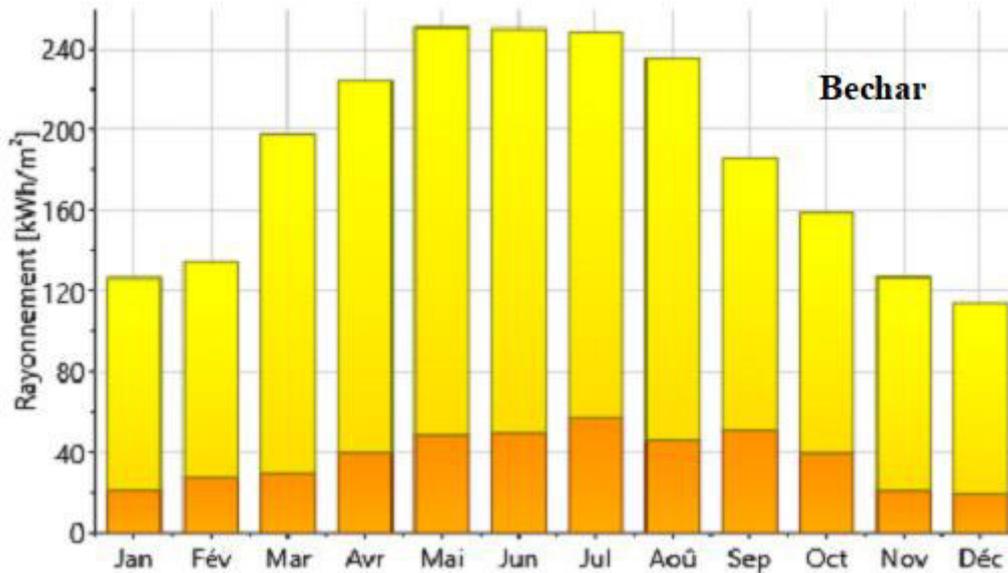


Figure IV.3 : Rayonnement global moyen mensuel pour la région de Bechar.

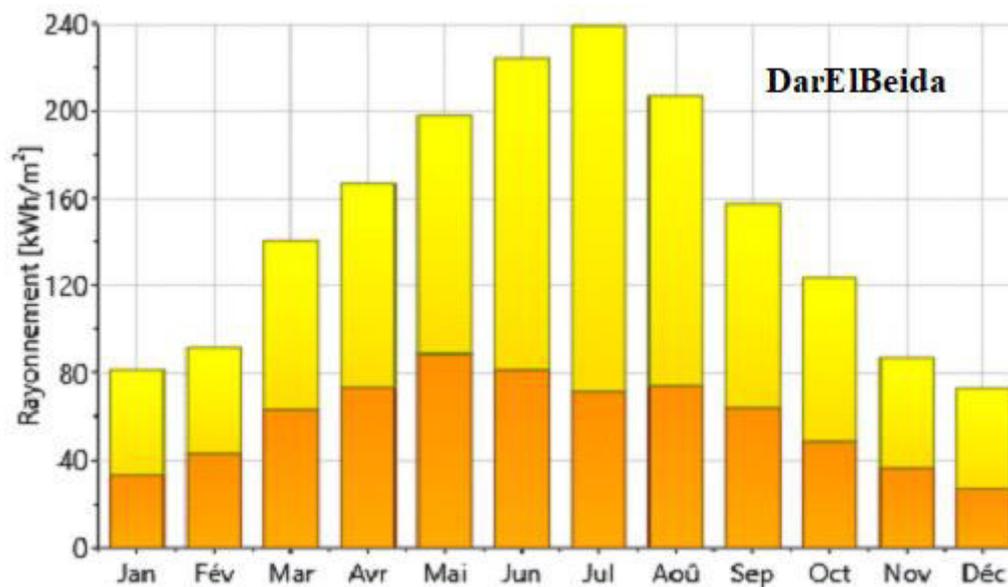


Figure IV.4 : Rayonnement global moyen mensuel pour la région de Dar El Beida.

On remarque que si pour le mois de juillet, les trois régions ont un rayonnement global mensuel d'environ 240 kW/m^2 . Par contre pour le mois de décembre, le rayonnement global moyen est de 150 kW/m^2 pour Tamanrasset et de 60 kW/m^2 pour la région de Dar El Beida (un peu moins de la moitié comparé à celui de Tamanrasset).

VI.4- Puissances et rendement de l'installation

Les figures IV.5 et IV.6 montrent l'évolution de la puissance produite pour les panneaux photovoltaïques respectivement durant la journée du 21 juin et 21 décembre. On constate que si durant la nuit cette puissance produite est nulle, durant le jour, elle augmente progressivement pour atteindre un maximum (25 MW au 21 juin et 18 MW au 21 décembre pour Tamanrasset).

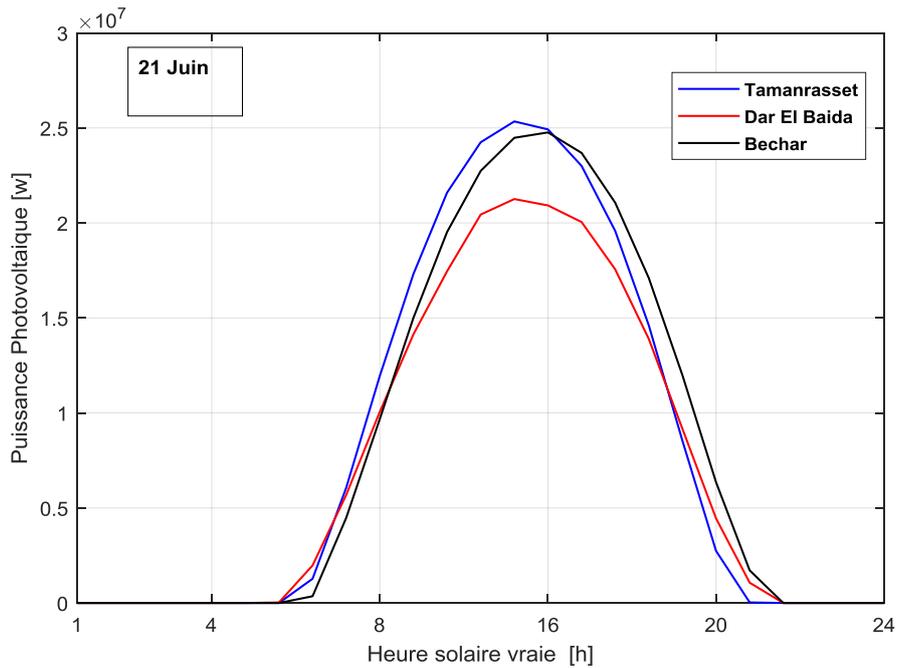


Figure IV.5 : Puissance photovoltaïque produite durant le 21 juin pour les trois régions.

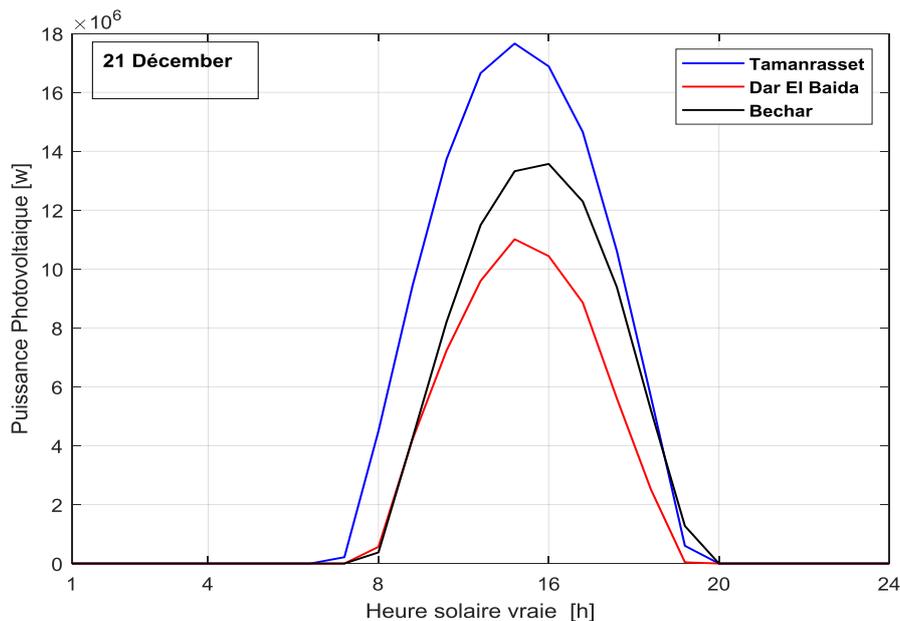


Figure IV.6 : Puissance photovoltaïque produite durant le 21 décembre pour les trois régions.

CHAPITRE VI : RESULTATS ET DISCUSSION

De la même manière, les figures IV.7 et IV.8 montrent l'évolution du rendement des panneaux photovoltaïques respectivement durant la journée du 21 juin et 21 décembre. La région de Tamanrasset présente un maximum de 16% au 21 juin et de 15% au 21 décembre.

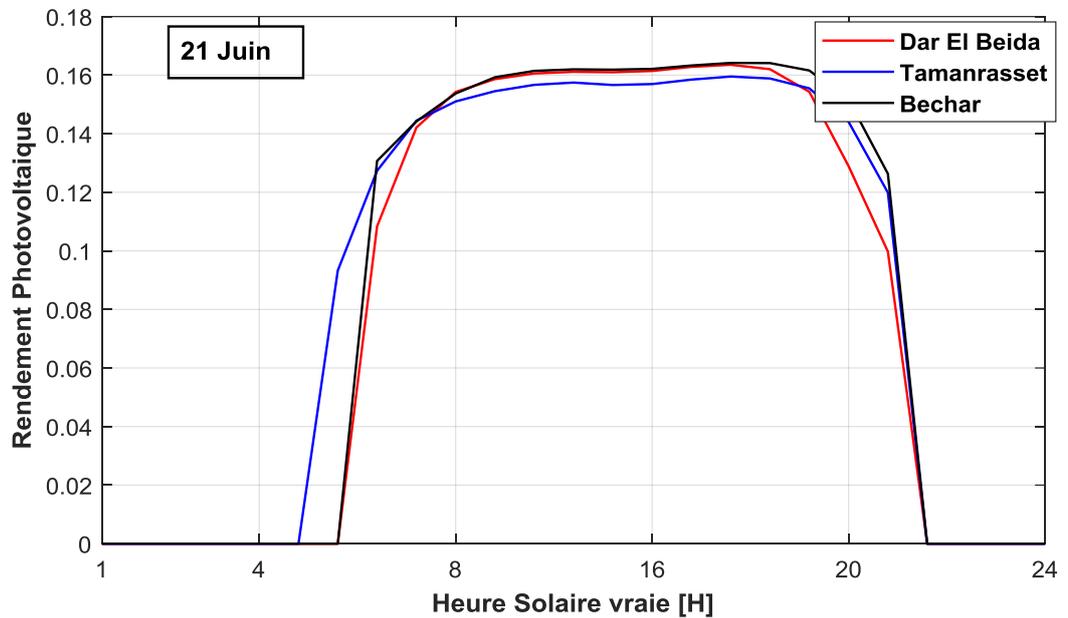


Figure IV.7 : Rendement photovoltaïque durant le 21 juin pour les trois régions.

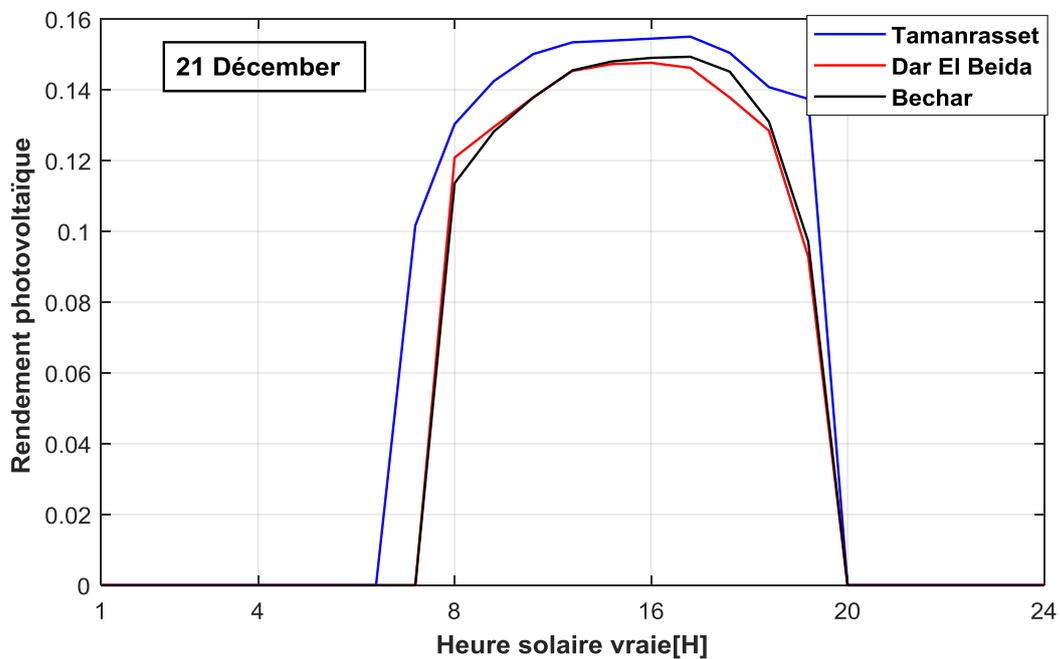


Figure IV.8 : Rendement photovoltaïque durant le 21 décembre pour les trois régions.

CHAPITRE VI : RESULTATS ET DISCUSSION

Les figures IV.9 et IV.10 montrent l'évolution de la puissance globale produite par l'installation respectivement durant la journée du 21 juin et 21 décembre pour les trois régions. On remarque que la région de Tamanrasset donne la puissance globale la plus élevée pour un maximum de 74 MW au 21 juin et de 67 MW au 21 décembre.

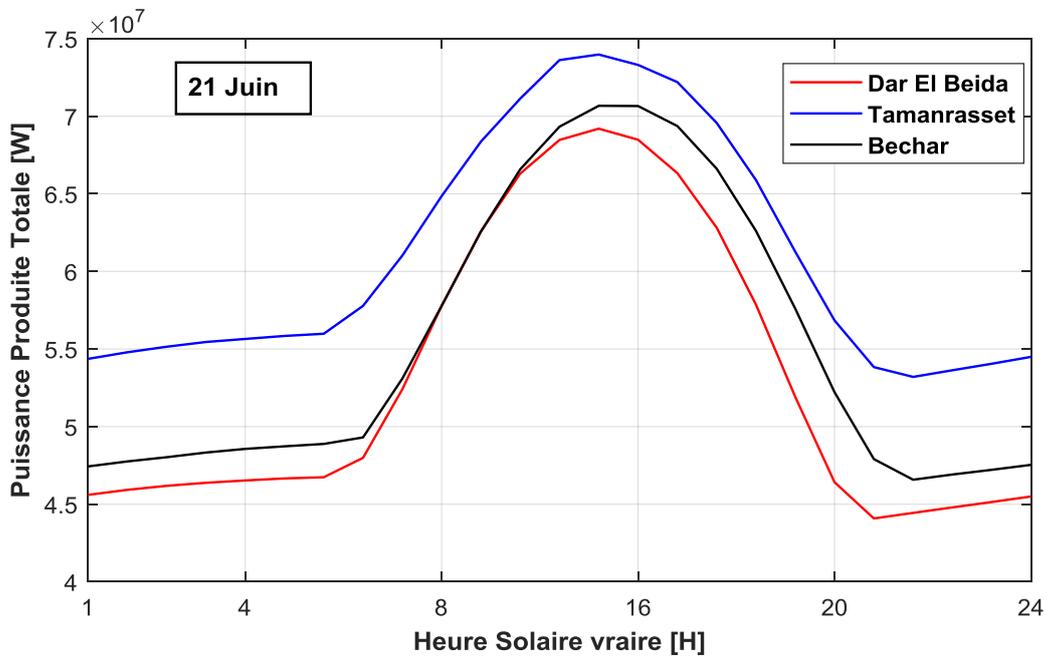


Figure IV.9 : Puissance de l'installation durant le 21 juin pour les trois régions.

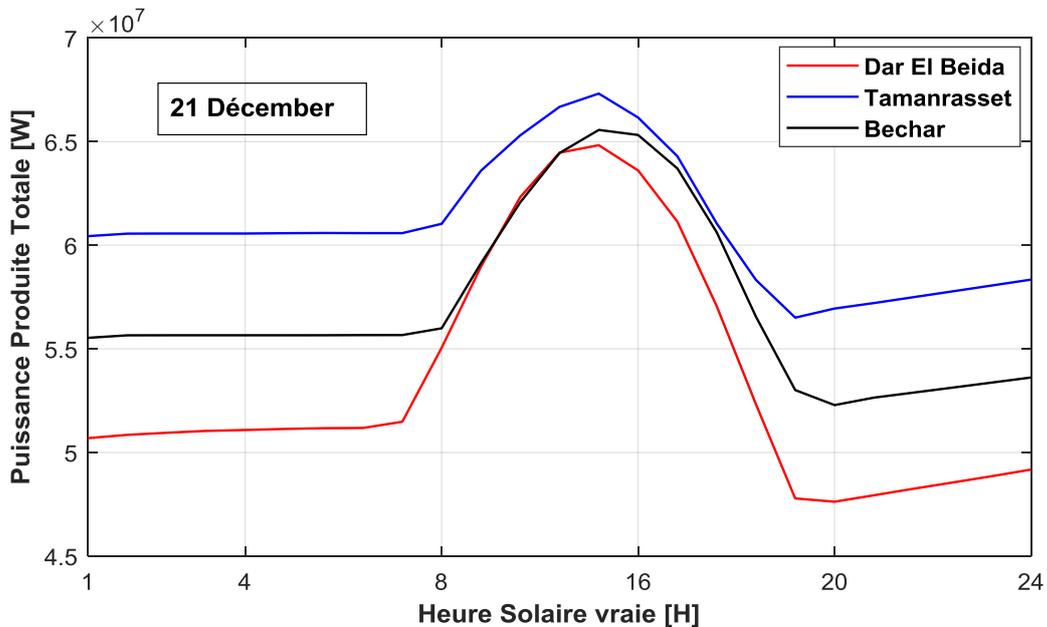


Figure IV.10 : Puissance de l'installation durant le 21 décembre pour les trois régions.

CHAPITRE VI : RESULTATS ET DISCUSSION

La figure IV.11 représente la puissance produite par l'installation pour chaque heure d'une année entière pour la région de Tamanrasset. On remarque que la puissance produite par le panneau photovoltaïque pendant la saison hivernale varie entre 10MW et 22MW et en contrepartie elle est très importante pendant la saison estivale (été) elle varie entre 23MW et 29MW. Pour la variation de la puissance de la turbine à gaz, on observe qu'elle est moins importante pendant la saison estivale, elle oscille entre 42MW et 45MW, alors qu'elle est plus importante pendant la saison hivernale et elle oscille entre 45MW et 49MW.

On remarque que la variation de la puissance totale est plus importante pendant la saison estivale et moins importante durant la saison hivernale.

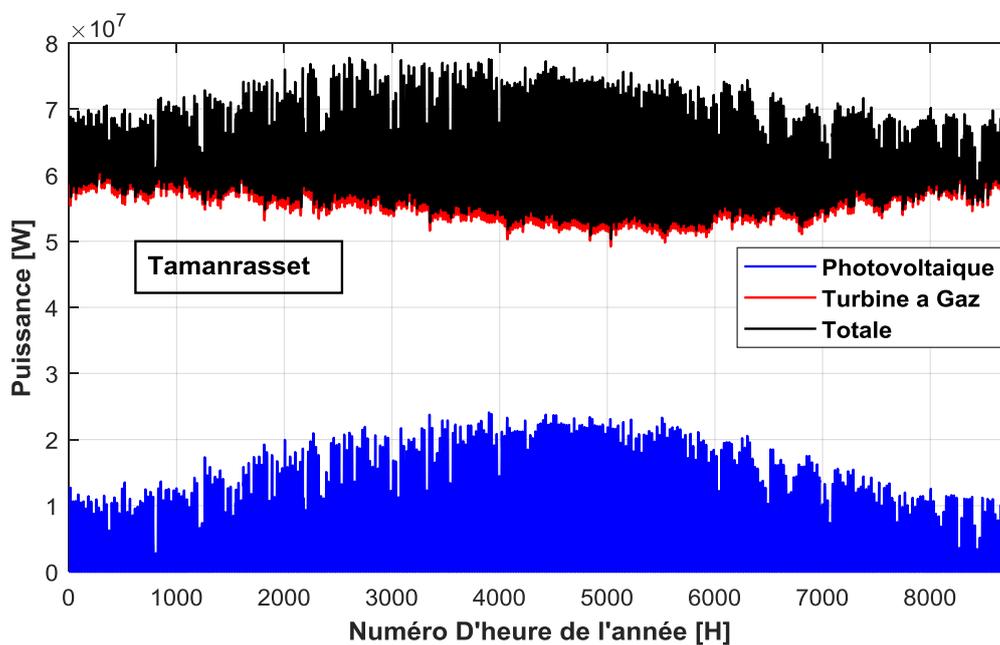


Figure IV.11: Puissance annuelle produite par l'installation.

La figure IV.12 illustre la variation du rendement de l'installation durant une année dans la région de Tamanrasset. On voit que les variations du rendement ne sont pas importantes durant l'année et ne dépasse pas la valeur de 17% pour le panneau photovoltaïque, 29% pour la turbine à gaz et 46% pour le rendement total. Ainsi, la région de Tamanrasset est l'endroit le plus approprié des trois régions choisies pour l'installation d'un système de panneaux solaires photovoltaïques.

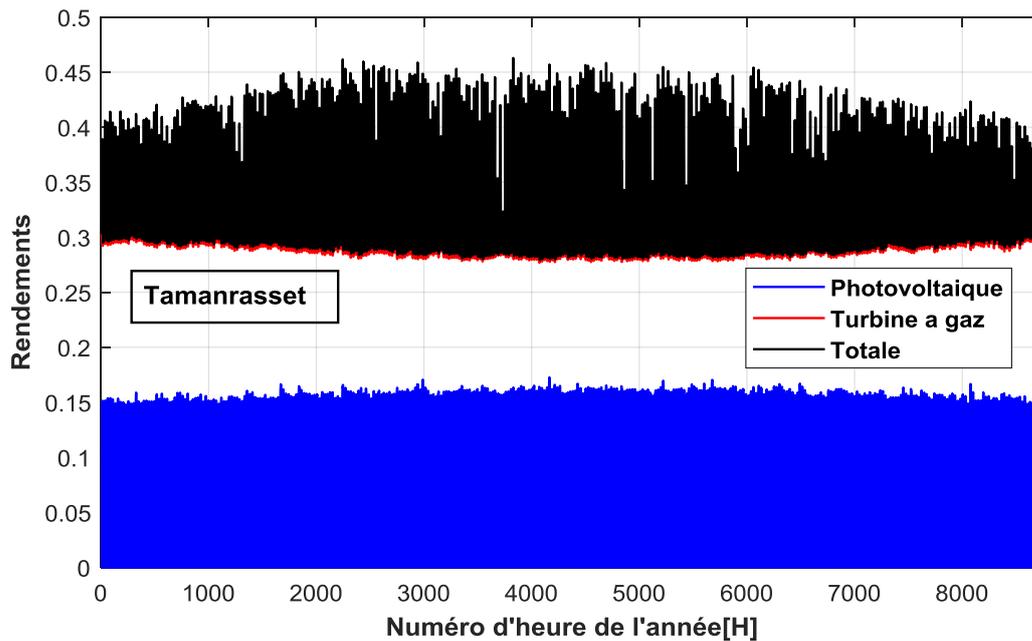


Figure IV.12: Rendement annuel de l'installation.

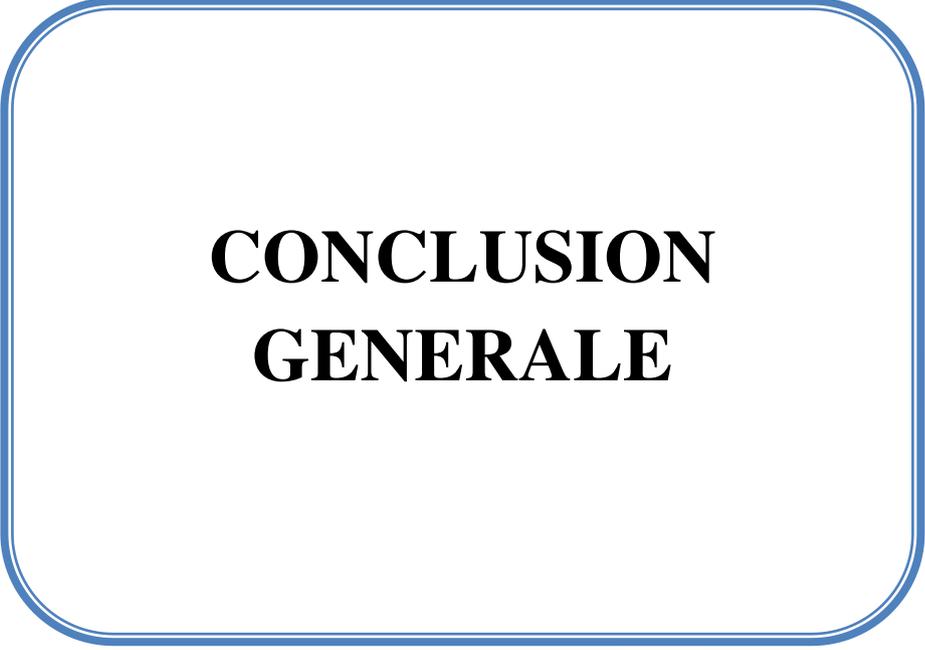
Le tableau IV.3 donne les valeurs moyennes annuelles de la puissance et du rendement de l'installation pour les trois régions. On remarque que la région de Tamanrasset donne les meilleures performances, cependant, bien que la région de Dar El Beida donne les plus faibles performances, ces valeurs sont assez conséquentes pour justifier une telle installation dans cette région.

Tableau IV.3 : Puissance et rendement annuelle de l'installation.

	Bechar	Dar el Beida	Tamanrasset
Puissance moyenne annuelle [MW]	76	75	79
Rendement moyen annuel %	44	42	46

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié une installation d'un panneau photovoltaïque et une turbine à gaz. Pour évaluer la production électrique, à travers une simulation qui a été réalisée par logiciel TRNSYS. Les résultats ont montré que le rendement moyen de l'installation est 46% et pour une puissance moyenne égale 79[MW] comme maximum pour la région de Tamanrasset.



**CONCLUSION
GENERALE**

CONCLUSION GENERALE

L'exploitation de l'énergie solaire, ressource inépuisable et non polluante, ne cesse de se développer de nos jours. Une raison majeure qui empêche l'utilisation massive de cette énergie est sa variabilité qui dépend des facteurs météorologique et induit donc une production intermittente.

Dans ce travail, nous avons déterminé les performances d'une installation hybride alimentée énergétiquement par un champ de panneaux solaires photovoltaïques d'une part et un cycle de Brayton utilisant un combustible fossile d'autre part. Nous avons modélisé et simulé notre centrale avec le logiciel TRNSYS16. Dans cette simulation, nous avons pris en compte l'influence des conditions météorologiques sur les performances de la centrale pour tous les jours de l'année pour trois villes Algériennes (Dar El-Beida, Bechar et Tamanrasset), Les données météorologiques ont été obtenus par le logiciel METEONORM. La puissance et le rendement thermique ont été les paramètres principaux pour évaluer le cycle de la centrale.

Les résultats ont montré que le rendement moyen de l'installation est 46%et pour une puissance moyenne égale à 75[MW].

Nous espérons que notre étude soit constructive et intéressante pour les promotions à venir du département de génie mécanique.

ANNEXE

Annexe

- La technologie photovoltaïque est encore coûteuse même si son coût de production ([LCOE](#)) a fortement baissé au cours des dernières années ([avec un coût de production de 70 à 90 \\$/MWh dans certaines zones aujourd'hui, des installations photovoltaïques atteignent parfois localement une « parité de prix » avec des moyens « conventionnels » de production électrique](#)).
- Les panneaux photovoltaïques les plus répandus, faits de silicium cristallin, sont lourds, fragiles et difficiles à installer.
- Une centrale requiert de vastes espaces bien que la densité tende à être améliorée (exemple de [la centrale photovoltaïque de Bresse-sur-Issole en Provence : 1,2 hectare par mégawatt installé](#)).
- L'impact environnemental et énergétique de la fabrication des panneaux de silicium n'est pas nul. Une cellule photovoltaïque doit fonctionner entre un an et demi et cinq ans pour compenser l'énergie utilisée pour la fabriquer⁽⁷⁾.
- L'énergie électrique n'est pas « directement » stockable, c'est-à-dire sous sa forme primaire. Il est en revanche possible de la stocker « indirectement » dans des batteries sous forme chimique ou dans des accumulateurs cinétiques sous forme mécanique. Les technologies existantes sont encore coûteuses.

Watt crête

[La puissance « crête »](#) d'une installation photovoltaïque (exprimée en Wc) est la puissance maximale (capteurs bien orientés, bien inclinés, sans ombrage) qu'elle peut produire sous un ensoleillement donné.

Cette unité a trois utilisations principales :

- la comparaison du rendement des matériaux photovoltaïques, dans les mêmes conditions ;
- la qualification de la taille d'une installation, indépendamment de ses conditions d'ensoleillement ;
- la comparaison des gisements solaires et de leur production électrique.

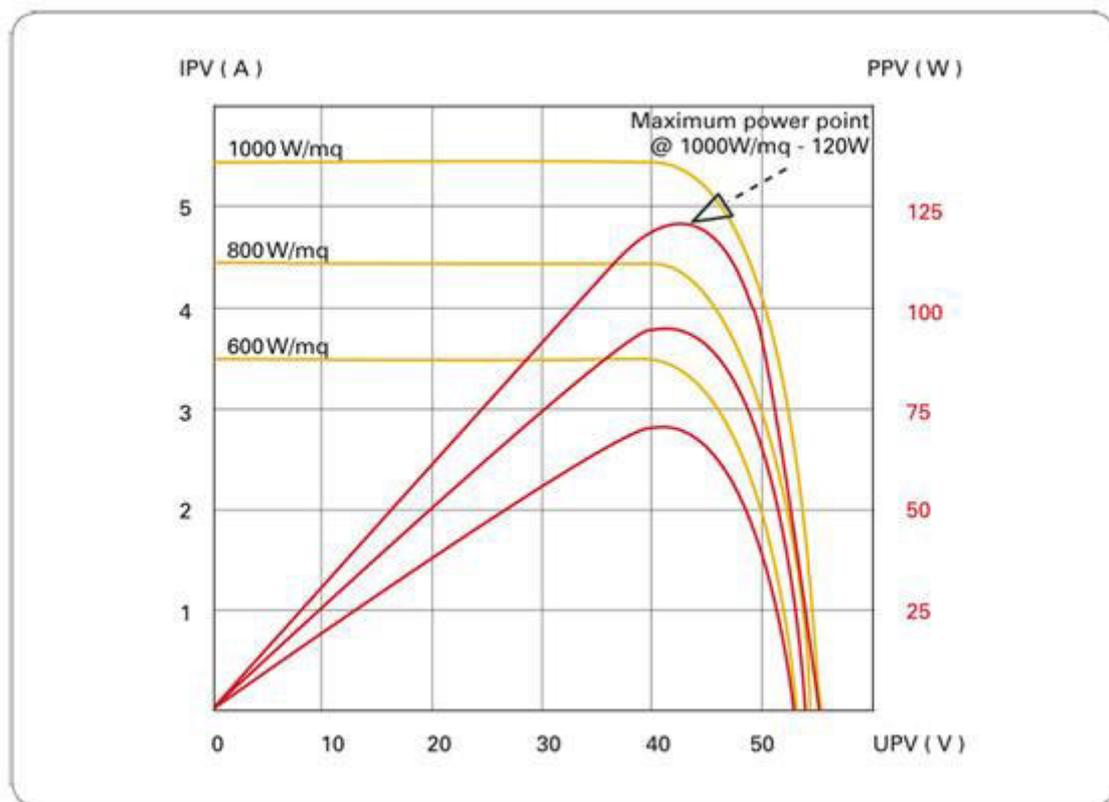
A fin 2016, la capacité installée du parc mondial solaire photovoltaïque a dépassé 300 gigawatts (GW) installés, selon la PV Market Alliance⁽⁸⁾.

En 2014, le solaire (photovoltaïque et thermodynamique inclus) a généré près de 197,1 TWh d'électricité dans le monde, soit environ 0,8% de la production mondiale d'électricité selon les dernières données de [l'Irena](#)⁽⁹⁾.

Selon [l'AIE](#), les filières photovoltaïque et thermodynamique auront des contributions équivalentes en 2050 en termes de production énergétique. Environ 80% de la production mondiale de modules photovoltaïques est encore à base de plaquettes de silicium cristallin. Le reste utilise des couches minces déposées sur une surface, solution plus économique en matière de coûts de fabrication mais avec des rendements inférieurs.

L'importance du MPPT (Maximum Power Point Tracker)

Le rayonnement solaire qui atteint les modules photovoltaïques a un caractère fortement variable en fonction de la latitude, de l'orientation du champ solaire, de la saison et de l'heure du jour. Sur chaque cellule, au cours de la journée, on peut déterminer des ombres qui peuvent être prévisibles, comme dans le cas d'un édifice situé à proximité du champ solaire ou imprévisibles comme celles provoquées par les nuages. Par ailleurs la quantité d'énergie produite par chaque cellule photovoltaïque dépend du rayonnement et de sa température. A partir de ces considérations il est nécessaire de détecter à chaque instant ce point particulier sur la caractéristique $V \times I$ du générateur photovoltaïque où le transfert de puissance vers le réseau est au maximum.



Dans un graphique, le point de puissance maximum correspond au point de tangence entre la caractéristique du générateur photovoltaïque pour une certaine valeur du rayonnement solaire et l'hyperbole d'équation $V \times I = \text{constante}$ correspondante. Comme nous l'avons vu, le point de tangence varie instantanément en fonction des conditions de rayonnement solaire et des variations de la température. Le rôle du MPPT est justement de détecter à chaque instant ce point d'efficacité énergétique maximum.

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIE

- [1]. A History Of Mechanical Inventions,” Abbott Payson Usher, 1988.
- [2] **HATHAT Abdelkader, DEBLAOUI Hicham**, Etude et amélioration FDM d’une turbine.
- [3] Série de la gestion de l’énergie 14 à l’intention des industries commerces et institutions «Compresseur et turbines » (canada).
- [4]. “Engines—The Search For Power,” John Day, 1980.
- [5] **Renaud GICQUEL** « systèmes énergétiques, tome 2» .MINES PARISTECH LES PRESSES.
- [6] **B. ABDELKADIR**, « Machine thermiques pour l’industrie du gaz», Rapport de stage pratique (Hassi R’mel), Université Tlemcen, 2013.
- [7] **B. ABEDLAALI**, « Calcul énergétique de l’installation hybride thermique pour la production d’électricité », Mémoire de master, Universitaire de Biskra, 2013.
- [8] « Turbine a gaz, technologie et fonctionnement », ENSPM formation industriel-IFP Training, page D5-5, 2005.
- [9] **HERZALLAH, A.**, "Étude thermodynamique Maintenance et Fiabilité d’une turbine à gaz MS 5002", mémoire d’ingénieur, Université de Boumerdes, 2006.
- [10] **F. Z. Bekhaled**« Analyse du Fonctionnement D’une Turbine à Gaz et d’une Turbine à Vapeur Dans une Centrale à Cycle Combiné (SKT)», Mémoire de master, université D’ain Temouchent, 2015.
- [11] **S. MADANI**, « Modélisation mathématique du concentrateur cylindro-parabolique de la centrale hybride de Hassi R’mel », Mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2014.
- [12] **Kevin HUYNEN** École Nationale d’Ingénieurs de Metz.
- [13] [A] **C. NARANJO-MENDOZA**, « Conception et simulation numérique d’un système de capitation et stockage d’énergie thermique pour l’utilisation dans la climatisation d’un bâtiment en équateur », Mémoire d’ingénieur, Université du Québec, 2013.
- [14] FEKIH « recherche bibliographique sur les applications de la climatisation solaire ».
- [15] **J.M Chassériau**, Conversion thermique du rayonnement solaire ; Dunod, 1984.
- [16] **I. BELDJILALI et I. BOUMEDIENE**,«Etude et réalisation d’un capteur solaire plan a air » Mémoire de Master, Université AboubakrBelkaid-Tlemcen, 2016.
- [17] **DUFFIE J. A., BECKMAN W. A.**, Solar energy thermal processes, John Wiley and

Sons, New York, 1974.

[18] **O. PERROT**, « cours de rayonnement », I.U.T. de Saint-Omer Dunkerque, département génie thermique et énergie, 2010/2011.

[19] **T. E. BOUKELIA**, « Simulation et optimisation d'un modèle de capteur Cylindro-Parabolique», Mémoire de Doctorat, Université Constantine, 2016

[20] <http://www.enr.fr/energie-solaire-thermodynamique>.

[21] **Bilel Bouassida**. Simulation d'une centrale solaire à concentrateur cylindro- parabolique sous TRNSYS.

[22] Principe de fonctionnement du solaire thermodynamique, in: Syndicat des énergies renouvelables [on line] (2012) www.enr.fr.

[23] **Richter C., Teske S., Short R.**, Concentrating solar power: global outlook 2009, Greenpeace International, Amsterdam, Netherlands, 2009.

[24] **Tanaka N.**, Concentrating Solar Power - Technology Roadmap, The International Energy Agency (IEA). (2010).

[25] <http://www.cipcsp.com/tutorial/centrales-solaires>

[26] **A. KABOUCHE**, «Architecture et efficacité énergétique des panneaux solaires» Mémoire de Magistère, Université de Mentouri, 2012.

[27] www.ecosources.info.

[28] Syndicat des énergies renouvelables.

[29] **B. CHEKCHEK**. « Analyse thermodynamique d'une centrale thermique hybride (solaire /gaz), Mémoire de magister, Université de Batna, 2014.

[29] Renewable Energy Essentials: Concentrating Solar Thermal Power, International Energy Agency (IEA). (2009).

[30] **Kevin HUYNEN** École Nationale d'Ingénieurs de Metz.

[31] [A] **C. NARANJO-MENDOZA**, « Conception et simulation numérique d'un système de capitation et stockage d'énergie thermique pour l'utilisation dans la climatisation d'un bâtiment en équateur », Mémoire d'ingénieur, Université du Québec, 2013.

[32] **M.L. YOUSFI**, « Performances technico-économiques de centrales cylindroparaboliques de puissance », Mémoire de Magister, Université de Chlef, 2009.

[33] **F. MOKHTARI**, « Formation sur le logiciel TRNSYS, environnement complet et extensible dédié à la simulation dynamique des systèmes », Division solaire thermique, N° 15 – 16 2009.