

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Energie renouvelables

Par : HOCINI Meriem et SACI Sarra

Sujet

Etude et simulation d'une cellule solaire à l'aide du logiciel COMSOL MULTIPHYSICS
pour l'application photovoltaïques

Soutenu publiquement, le 30 / 06 / 2022 , devant le jury composé de :

Mr ALIANE Abdenour	Grade MCB	Université de Tlemcen	Président
Mr ZINAI Abdelhadi	Grade MCB	Université de Tlemcen	Examineur
Mme MOKHTARI Lila	Grade MCB	Université de Tlemcen	Encadreur

Année universitaire : 2021 /2022

Dédicace

Je dédie ce modeste travail en premier lieu à

*Mes chers parents pour leurs sacrifices, leur amour, leur
tendresse, leur soutien et leurs prières le long de mes études
jusqu'à ce que
Je parvienne à ce jour.*

*A mes chères sœur et frères Khadîdja, Mohamed et Salim pour
leurs encouragements permanents et leur soutien moral.*

*Je remercie également mes cousins pour leurs bien vaillances et
leur conseil.*

Ainsi à tous ce qui mon soutenue de près ou de loin.

A ma chère collègue Meriem.

A tous et à toutes mes ami(e)s.

Sarra

Dédicace

Que ce travail témoigne de mes respects :

A mes parents :

Aucun mot ne saurait exprimer mon respect et mon amour Éternel. Votre générosité et votre bonté malgré les dilemmes Ont toujours été un modèle pour moi.

A mes frères (Ilyes, Abdallah et Imad),

Vous m'avez honoré de votre présence. Mes souhaits pour Vous ! Santé et bonheur, vous êtes ma fierté.

A toute la famille HOCINI et MOKADDEM.

A ma sœur binôme : Sarra

Ainsi que tous mes amis et mes Proches (Wahiba, Yamna et Meriem), je vous aime.

A tous ceux qui m'ont dit que je ne pourrai pas aller loin, car Grâce à eux, je l'ai fait, j'ai pu progresser et j'ai réussi.

Meriem

Remerciements

Nous remercions tout d'abord le grand Dieu pour l'achèvement de ce mémoire.

Nous exprimons nos gratitude à Monsieur le président de jury Monsieur A. Abdenour d'avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Nous remercions Monsieur le Examineur : Z. Abdelhadid d'avoir accepté de prendre part à ce jury ainsi que pour l'intérêt qu'ils l'ont porté à ce travail.

Nous remercions Madame L. BENSEDDIK notre encadreur, pour ses conseils et suggestions avisés qui nous aidés à mener à bien ce travail, et d'avoir rapporté à ce mémoire ces remarques et conseils.

ملخص

تعمل الخلايا الشمسية عن طريق تحويل الطاقة الضوئية مباشرة إلى كهرباء عن طريق امتصاص الفوتونات بواسطة مواد أشباه الموصلات. يعد استخدام الخلايا الشمسية أمرًا مهمًا للغاية في تطوير الأبحاث الخاصة وفي التكنولوجيا الكهروضوئية وتطبيقاتها الأرضية. في هذه المذكرة ، هدفنا هو إجراء مقارنة بين خلايا Si و InP و GaAs و Ge ، عن طريق المحاكاة الرقمية باستخدام برنامج **COMSOLMULTIPHYSICS** من خلال دراسة الخصائص الكهربائية $I(V)$ و $P(V)$ مع مراعاة تأثير بعض المعلومات التي تعمل بشكل كبير مثل تأثير الطول الموجي للإشعاع الساقط ، ودرجة الحرارة ونوع المادة.

الكلمات المفتاحية: الشمس, الخلايا الشمسية, اشباه الموصلات, المنشطات, كومسول .

Résumé

Les **cellules solaires** fonctionnent en convertissant directement l'énergie lumineuse en électricité par l'absorption des photons par des matériaux **semi-conducteurs**. L'utilisation des cellules solaire est très importante dans le développement de la recherche spatiale et dans la technologie photovoltaïque et ses applications terrestres. Dans ce mémoire notre but est de faire une comparaison entre les cellules Si, InP, GaAs, et Ge, par la simulation numérique à l'aide du logiciel **COMSOL MULTIPHYSICS** en étudiant les caractéristiques électrique I(V) et P(V) tout en prenant en considération l'influence de certains paramètres qui modifient notamment son rendement tel que : l'effet de la longueur d'onde du rayonnement incident, la température et le type du matériau.

Mots clé : Soleil, cellules solaire, semi-conducteur, dopage, comsol.

ABSTRACT

Solar cells work by directly converting light energy into electricity by absorption of photons by **semi-conductor** materials. The use of solar cells is very important in the development of special research and in photovoltaic technology and its terrestrial applications. In this thesis our aim is to make a comparison between Si, InP, GaAs, and Ge cells, by numerical simulation using **COMSOL MULTIPHYSICS** software by studying the electrical characteristics I (V) and P (V) while taking into consideration the influence of some parameters that clearly modify its performance such as: the effect of the wavelength of the incident radiation, the temperature and the type of material.

Keywords: Sun, solar cell, semi-conductor, doping, comsol.

TABLE DES MATIERES

Dédicace	III
Dédicace	I
Remerciements	II
Résumé.....	IV
TABLE DES MATIERES	VIII
LISTE DES FIGURES.....	X
LISTE DES TABLES	XIII
ABREVIATIONS	XIII
INTRODUCTION GENERALE.....	1

CHAPITRE I : GENERALITES

I. Introduction.....	4
I.1. Le soleil.....	4
I.1.1 Principes généraux.....	5
I.2. le spectre solaire	6
I.3. Le rayonnement solaire.....	7
I.3.1. La constante solaire.....	7
I.3.2. Le rayonnement global.....	9
I.4. Les différentes technologies de la conversion d'énergie solaire.....	10
I.5. Solaire à concentration thermodynamique.....	11
I.5.1. Définition et catégories.....	11
I.5.2. Principe de concentration	11
I.5.3. Fonctionnement des centrales solaires thermodynamiques	12
I.6. Solaire thermique.....	12
I.7. La cheminée (tour) solaire.....	13
I.7.1. Principe de fonctionnement de La cheminée (tour) solaire	14

I.8. Le solaire photovoltaïque.....	15
I.9. Niveaux d'ensoleillement dans le monde.....	15
I.9. 1.Niveaux d'ensoleillement en Afrique	17
I.9.2. Niveaux d'ensoleillement en Algérie	18
I.10. Croissance de la consommation d'énergie en Algérie.....	18
I.11. Le développement de la filiale photovoltaïque en Algérie.....	20
I.12. Quelques réalisations photovoltaïques en Algérie	23
I.12.1. Le photovoltaïque dans le secteur Etatique	23
I.12.2. Le photovoltaïque dans le secteur privé	26
Conclusion.....	27

CHAPITRE II: CELLULE SOLAIRE

II. introduction	27
II.1. la cellule photovoltaïque.....	27
II.2. Historique du photovoltaïque.....	28
II.3. l'effet photovoltaïque	28
II .4. Les différentes Technologie de cellule photovoltaïque.....	29
II.4.1. Cellule en silicium poly cristallin.....	29
II.4.2.Cellule en silicium monocristallin.....	29
II.4.3. Cellule en silicium amorphe.....	30
II.5. Description du principe de fonctionnement d'une cellule solaire...	30
II .6. Paramètre essentiels caractérisent une cellule PV....	31
II.6.1. Courant de court-circuit I_{cc}	31
II.6.2. Tension de circuit ouvert V_0	32
II.6.3. La puissance maximale P_{max}	32
II.8. Le silicium.....	34
II.8.1. Le point vu cristallographique.....	35
II.8.2. Le silicium dans la nature.....	36
II.8.3. Le silicium comme semi-conducteur.....	37

II.9 .Le dopage.....	37
II.9.1. Dopage de type P.....	37
II.9.2 Dopage de type N.....	38
II.9.3. La jonction PN.....	39
II.10. Les paramètre affectant le rendement	40
Conclusion.....	41

CHAPITRE III : résultats et interprétation de la simulation

III. Introduction	43
III.1. Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics....	43
III.1.1. Les avantages.....	44
III.1.2. Les inconvénients.....	44
III.2. Description de l’interface COMSOL.....	44
III.3. Description des différentes étapes de simulation....	45
III.4.Résultats et interprétation.....	51
III.4. 1 Influence du type du matériau sur la caractéristique I(V)...	50
III.4.a. Silicium(Si).....	52
III.4.b. INP (phosphore d’indium).....	53
III.4.c. Arsénique de Gallium (GaAs).....	53
III.4.d. Germanium (Ge).....	54
III.4.2 Influence du type du matériau sur la caractéristique P(V)...	58
III.4.3 Influence de la longueur d’onde sur la caractéristique I(V).....	58
III.4.4 Influence de la température sur la caractéristique P(V).....	60
Conclusion.....	62
Conclusion général	Erreur ! Signet non défini.

BIBLIOGRAPHIE

SERUGIF SED ETSIL

Figure 1: La structure interne du soleil	5
Figure 2: Répartition spectrale du rayonnement solaire.....	7
Figure 3: La distance Terre –soleil.....	8
Figure 4: Variation de la valeur de la constante solaire en fonction de nombre de jours.....	9
.....	9
Figure 5: Types de rayonnement solaire reçus au sol.	9
Figure 6 : Effet cosinus.	10
Figure 7: Centrales à charbon pour la production d'électricité en Allemagne.....	11
Figure 8: Types de capteur pour concentration thermodynamique.....	12
Figure 9: Types de capteur thermique.....	13
Figure 10: Principe de fonctionnement de capteur solaire thermique.....	13
Figure 11: Un schéma d'une cheminée solaire.....	15
Figure 12: La centrale photovoltaïque de Birr Raba a Ouargla de 10 mégawatts.	15
Figure 13: Ensoleillement moyenne annuelle mondial.....	16
Figure 14: potentiel solaire dans le monde.....	17
Figure 15: Niveau d'ensoleillement en Afrique.....	18
Figure 16: Ensoleillement reçu annuellement en Algérie par région climatique.....	18
Figure 17: Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontal aux mois de Juillet et Décembre.....	19
Figure 18 :La croissance démographique en Algérie entre 1960-2015.	20
Figure 19: L'usine de Rouïba Eclairage.....	26
Figure 20: La société Aurès solaire.....	27
Figure 21:L'usine de condor électronique.	27
Figure 22: Cellule photovoltaïque.....	27
Figure 23: Les principaux types de cellule.....	30
Figure 24: Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	31
Figure 25: Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque. Est la résistance série du circuit.est la résistance parallèle du circuit (shunt).....	31
Figure 26: Courbe caractéristique P-V.....	33
Figure 27: Le quartz.....	35
Figure 28: Structure cristalline du silicium.....	36
Figure 29: Dopage de type P (au bore).	38
Figure 30 : Dopage de type N (au phosphore).	39

Figure 31: La jonction PN.....	40
Figure 32: La version COMSOL 5.4.....	43
Figure 33: Fenêtre Description des dimensions.	45
Figure 34: Fenêtre de domaine étudier.....	46
Figure 35 : La structure réalisée.....	47
Figure 36: la Fenêtre graphique.	48
Figure 37: Fenêtre de type matériaux.....	49
Figure 38: Fenêtre de contacts.	49
Figure 39: Fenêtre de réalisation maillage.	50
Figure 40: Fenêtre d'une partie de la cellule.....	50
Figure 41: Fenêtre de type d'étude.....	50
Figure 42: Fenêtre de type résultats.	51
Figure 43 : Caractéristique courant -tension d'une cellule au Si.	53
Figure 44: Caractéristique courant-tension d'une cellule à l'INP.....	54
Figure 45: caractéristique courant -tension d'une cellule de GaAs.	56
Figure 46 : Caractéristique courant -tension d'une cellule de Ge.....	57
Figure 47 : Caractéristiques courant-tension pour les quatre matériaux.....	58
Figure 48: caractéristiques puissance-tension pour les quatre matériaux.	58
Figure 49: Caractéristiques I(V) d'une cellule au Silicium avec la variation de la longueur d'onde.....	59
Figure 50: Caractéristiques P(V) d'une cellule au Silicium avec la variation de la longueur d'onde.....	61
Figure 51 : La Caractéristiques I(V) d'une cellule au Silicium avec la variation de la température.....	62

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: La consommation énergétique en Algérie.....	20
Tableau 2: Projets réalisés en énergie solaire en Algérie.....	22
Tableau 3: Quelques projets photovoltaïques réalisés par l'UDES.	24
Tableau 4:Table périodique des éléments chimiques.....	34
Tableau 5:Propriétés chimiques du silicium.....	36
Tableau 6: Variation de la longueur d'onde avec le coefficient d'absorption	60

ABREVIATIONS

CO_2	Carbone dioxyde
I_{max}	Courant maximale
I_{ph}	Le courant photovoltaïque
N_A	Concentration des trous
N_D	Concentration des donneurs
O_2	Oxygène
P_{max}	La puissance maximale
$P_{max-ideal}$	Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV idéal
R_s	La résistance série
R_{sh}	La résistance shunt
SiO_2	La silice (dioxyde de silicium)
V_D	Tension de diffusion sur une jonction
V_{max}	Tension maximale
n_i	Concentration intrinsèque
A	Le facteur d'idéalité de la diode
Al	Aluminium
AM0	Spectre solaire Hors atmosphère
AM1	Spectre Solaire a l'incidence
AM1.5	Spectre standard arrivent avec un angle 48.2 a la surface de la terre a une atmosphère et demi
APRUE	L'agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie
ASA	L'agence spatiale Allemande
ASAL	L'Agence Spatiale algérienne
C	Le diamant
C	Vitesse de la lumière
CDER	Centre de recherche dans le domaine des énergies renouvelables
CDTA	Centre de Développement des Technologies Avancées
CESI	Centre d'études Supérieures Industrielles
Cfc	Cubique faces centrées
CREDEG	Centre de recherche et de développement de l'électricité et du gaz
CRND	Centre de Recherche Nucléaire de Dra ria
E	Energie

FF	Facteur de forme
GaAs	Arsénique de Gallium
Ge	Le germanium
h	La constante de Planck
I_{cc}	Courant au court-circuit
I	Intensité mesurée aux bornes de la cellule PV
INP	Phosphore d'indium
I_0	Le courant de saturation de la diode
ISO	Organisation internationale de normalisation
K	La constante de Boltzmann
L'ONS	Office national des statistiques
m	Masse
MDN	Ministère de la Défense nationale
MESRS	Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche scientifique
MPP	Le point de puissance maximum
P	Puissance mesurée aux bornes de la cellule
PV	Modules solaires photovoltaïques
Q	La charge de l'électron
Si	Silicium
SKTM	SharikET KahrabawaTaketmotadjadida
STC	Standard Test Conditions
T	Température
UDES	Unité de développement de l'équipement solaire
UDTS	Union démocratique des travailleurs du Sénégal
V_{c_0}	La tension a circuit ouvert
V	Tension mesurée aux bornes de la cellule PV
v	La fréquence
λ	La longueur d'onde

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le Soleil, source énergétique quasi illimitée, est à l'origine d'un nombre impressionnant d'effets biologiques qui participent directement ou indirectement à la vie animale et végétale : il procure la chaleur, permet la photosynthèse, la vision, conditionne les rythmes biologiques. Actuellement la production d'énergie est un grand et important défi pour les années à venir, pour pouvoir satisfaire les besoins énergétiques qui sont de plus en plus croissants.

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables et la plus utilisée. Permettant de produire de l'électricité par la transformation d'une partie de rayonnement solaire au niveau d'un module solaire photovoltaïque comprenant plusieurs cellules photovoltaïques reliées entre elles.

Les cellules solaires sont des dispositifs à semi-conducteur qui transfèrent la lumière en énergie électrique utilisable. Mais c'est le savant français Antoine Becquerel qui, le premier en 1839, observa que c'est la lumière brillée sur des diodes cela induit un courant électrique [1]. La première cellule solaire à base de silicium fut développée par Fuller et Pearson dans les laboratoires Bell à New York en 1954. Le rendement était de 6% mais fut rapidement augmenté à 10% [2].

Durant de longues années, la principale application des cellules solaires resta le domaine spatial. Leurs intérêts dans une utilisation terrestre rebondissent dans les années 1970 [2]. Depuis la création de la première cellule solaire rentable, la recherche sur la technologie et l'amélioration de l'efficacité des cellules solaires a augmenté rapidement. L'accent mis récemment sur l'utilisation des énergies renouvelables et le besoin de puissance dans les régions éloignées telles que l'espace a mis cette recherche dans le premier rang [2].

La cellule solaire est un composant électronique qui peut convertir la lumière du soleil en électricité, cette conversion se produit au sein de matériaux semi-conducteurs, qui ont comme propriété de libérer leurs porteurs de charge (électrons et trous) sous l'influence d'une excitation extérieure. Actuellement l'objectif de multiples recherches est de réaliser la meilleure cellule avec un haut rendement énergétique et un prix de revient bas.

L'efficacité des cellules solaires s'est améliorée au fil du temps en exploitant de nouveaux matériaux tels que le silicium (Si), le (InP) (phosphore d'indium), le Gallium Arsénique (GaAs), et le Germanium (Ge), qui ont subi des recherches

INTRODUCTION GÉNÉRALE

approfondies en tant que matériau photovoltaïque. De plus, plusieurs effets peuvent affecter le rendement des cellules solaires telles que la concentration du dopage et la structure des matériaux, la température, l'éclairement, le gap ...etc.

Le travail, présenté dans ce mémoire, est l'étude et simulation à l'aide de logiciel COMSOL MULTIPHYSICS sur les caractéristiques I(V) et P(V) du matériau et son gap, et les principaux paramètres qui augmentent ou diminuent les performances idéales de la cellule.

Le mémoire est structuré en trois chapitres plus une introduction et une conclusion générale.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté une généralité sur l'énergie solaire et son rayonnement et le gisement solaire dans le monde.

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié les cellules photovoltaïques, le principe de fonctionnement, caractéristique d'une cellule solaire, différents technologies de cellule PV, les paramètres qui influent sur les cellules PV, les avantages et les inconvénients pour les différents type de ces dispositifs.

Enfin nous présentons au troisième chapitre les résultats obtenus par le logiciel COMSOL MULTIPHYSICS.

CHAPITRE I: GENERALITE

I.Introduction

Les énergies renouvelables, comme leur nom l'indique ce sont des sources inépuisables d'énergies offertes par la nature elle-même et dont la maîtrise garantirait largement l'autonomie de la planète. On y trouve l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie géothermique, l'énergie marémotrice, l'énergie de la biomasse.

La première ressource peut trouver son origine dans les différents flux énergétiques naturels incidents à la surface de la terre, qui sont :

- Le rayonnement solaire qui fournit 99.97% de sa densité thermique.
- La chaleur interne terrestre qui fournit 0.03% de sa densité thermique.
- Le travail des forces de gravitation : Il y a des systèmes de captation pour récupérer cette forme d'énergie, et leurs applications de différents sorts.

L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, elle est à l'origine de la quasi-totalité des sources d'énergies utilisées par l'homme. Lorsque l'énergie lumineuse (photons) rencontre de la matière, celle-ci transforme une partie en chaleur. C'est ce qu'on appelle la conversion photo thermique, et c'est sur ce principe que sont basés les procédés de capteur plan solaire.

L'énergie solaire pour son utilisation exige un système de captation solaire de deux types:

- Capteur solaire photo thermique.
- Capteur solaire photovoltaïque.

Pour un pays grand consommateur d'énergie comme l'Algérie, l'énergie solaire représente une solution à l'augmentation des besoins croissants en énergie ainsi la limitation des émissions de gaz à effet de serre et représente même un moteur pour la création de nouveaux emplois dans la fabrication et l'installation de différents systèmes de la conversion de l'énergie solaire.

I.1. Le soleil

Le Soleil est une masse en rotation. Cependant la partie équatoriale tourne en 24 jours, alors que les parties les plus proches des pôles tournent en 30 jours.

Sa densité moyenne est de $1\,400\text{ kg/m}^3$ ($5\,500\text{ kg/m}^3$ pour la Terre). Elle atteint $76\,000\text{ kg/m}^3$ au centre. Son rayon, $700\,000\text{ km}$ (rayon terrestre : $6\,400\text{ km}$).

Sa masse représente 99,85 % de la masse totale du système solaire et 330 000 fois celle de la Terre.

Son âge est estimé par divers recoupements à environ 6 milliards d'années et sa durée probable de vie est du même ordre de grandeur [3].

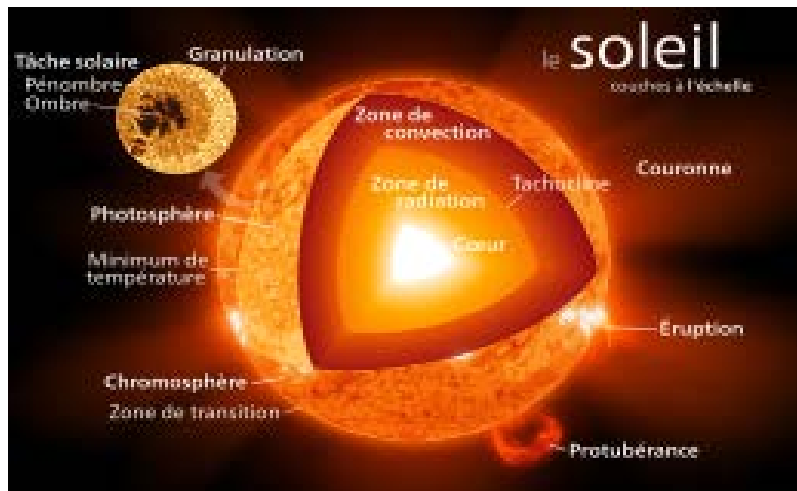


Figure 1:La structure interne du soleil

D'après Albert Einstein, il y a une équivalence entre la masse et l'énergie d'un corps.

$$E = mc^2 \quad (I.1)$$

E : énergie.

m :masse.

C : vitesse de la lumière (300 000 km/s).

I.1.1. Principes généraux

Au sein du Soleil, des réactions nucléaires se produisent : l'hydrogène se transforme en hélium en libérant 4 millions de tonnes par seconde d'énergie masse.

4 hydrogène \rightarrow 1 hélium + conversion en énergie de $\frac{1}{141}$ de la masse mise en jeu dans la réaction.

Ceci correspond à 2 cal/cm²/min. Afin de ne pas s'effondrer sur lui-même (pression de gravitation trop grande), le Soleil rayonne de l'énergie dont une partie infime est recueillie par la face éclairée de la Terre [3].

Le Soleil rayonne de l'énergie suivant la loi de Maxwell-Boltzmann relative au corps noir :

$$E = \sigma T^4 \quad (I.2)$$

$$\sigma = 4,9 \times 10^{-8} \text{kcal/h (K)}^4$$

T:température absolue en degrés Kelvin

$$T = 273,15 + tC$$

Connaissant E par la réaction du cycle hydrogène-hélium, on calcule T :

$$T = 5762 \text{ K} \quad (I.3)$$

I.2. le spectre solaire

Le spectre du soleil c'est sa décomposition en longueurs d'onde ou « couleurs ». La lumière solaire est en effet composée de toutes sortes de rayonnements de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. Les photons, grains de lumière qui composent ce rayonnement électromagnétique, sont porteurs d'une énergie qui est reliée à leur longueur d'onde par la relation:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (I.4)$$

h : la constante de Planck $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$.

ν : la fréquence.

C : la vitesse de la lumière $C = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

λ : la longueur d'onde.

C'est cette relation, mise à jour par Louis de Broglie en 1924 qui a confirmé la nature à la fois corpusculaire et ondulatoire de la lumière: présence de corpuscules – les photons- et propagation d'onde avec une fréquence de vibration et une longueur d'onde[3].

Une courbe standard de la répartition spectrale du rayonnement solaire extraterrestre, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom d'AM0. Sa distribution en énergie est répartie comme suit :

ultraviolet UV	$0,20 < \lambda < 0,38 \mu m$	6,4 %
visible	$0,38 < \lambda < 0,78 \mu m$	48,0 %
Infrarouge IR	$0,78 < \lambda < 10 \mu m$	45,6 %

Montre l'atténuation observée après le passage à travers une épaisseur d'atmosphère correspondant à une masse d'air 1,5, soit l'équivalent d'une hauteur du soleil de $41,8^\circ$ au niveau de la mer. L'irradiante spectrale est le flux solaire pour une longueur d'onde donnée (et donc une couleur donnée, en ce qui concerne la lumière visible).

Ce spectre de ciel clair, noté AM1.5, sert de référence pour la mesure de cellules photovoltaïques. Les simulateurs servant à mesurer les modules tentent de le reproduire aussi fidèlement que possible. On peut également remarquer le spectre du

diffus par beau temps, nettement renforcé vers le bleu du fait de diffusion de Rayleigh sur l'air [4].

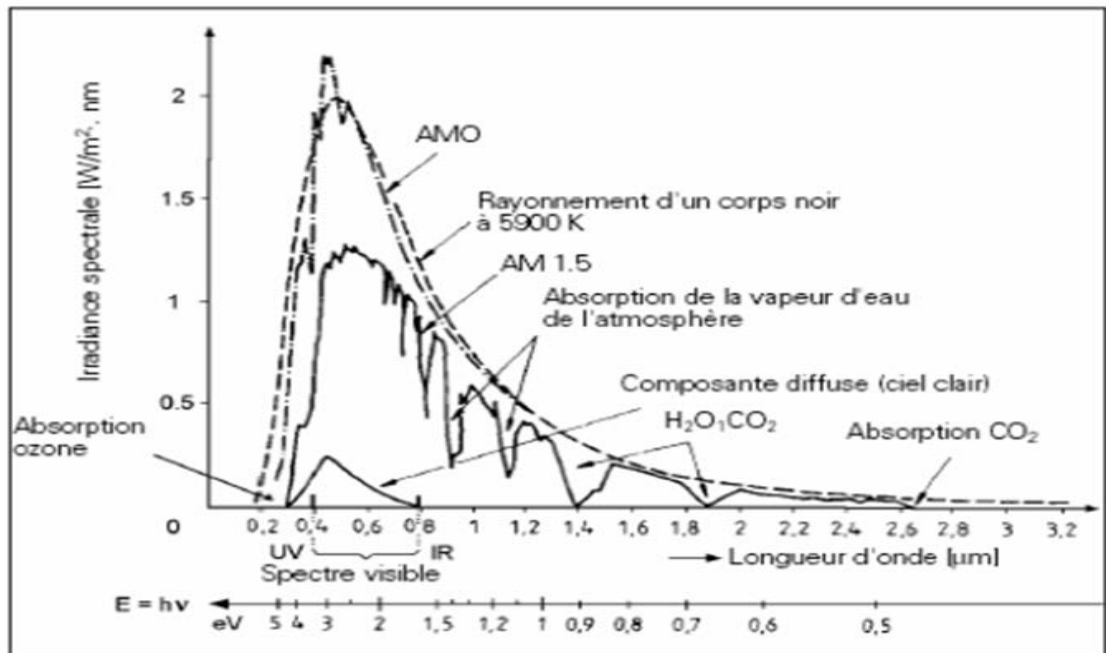


Figure 2: Répartition spectrale du rayonnement solaire

a) Hors atmosphère (AM0) b) A l'incidence 41,8° (AM1)

On voit clairement sur le spectre AM 1,5 les bandes d'absorption correspondant aux gaz de l'atmosphère, notamment le CO_2 et la vapeur d'eau. Est représenté aussi sur la figure 2 le spectre d'un corps noir dont la température de couleur serait de 5900 K, très proche du spectre solaire AM0. Le soleil est donc souvent assimilé à ce corps noir, ce qui permet aux physiciens d'élaborer des modèles pour expliquer son comportement et ses émissions de rayonnement [4].

I.3. Le rayonnement solaire

I.3.1. La constante solaire

La distance moyenne Terre-Soleil est $d = 149$ millions de kilomètres.

La trajectoire de la Terre autour du Soleil est une ellipse faiblement excentrée.

Au solstice d'été (21 juin), la Terre est éloignée du Soleil au maximum :

$$d_{\max} = 1,017 \times d \quad (I.5)$$

Au solstice d'hiver (22 décembre), au contraire, elle est à la distance minimale :

$$d_{\min} = 0,983 \times d \quad (I.6)$$

L'observateur terrestre placé sur un cercle dont le Soleil occuperait le centre verrait celui-ci sous un angle de $32'$ d'arc, soit environ $\frac{1}{2}$ degré [4].

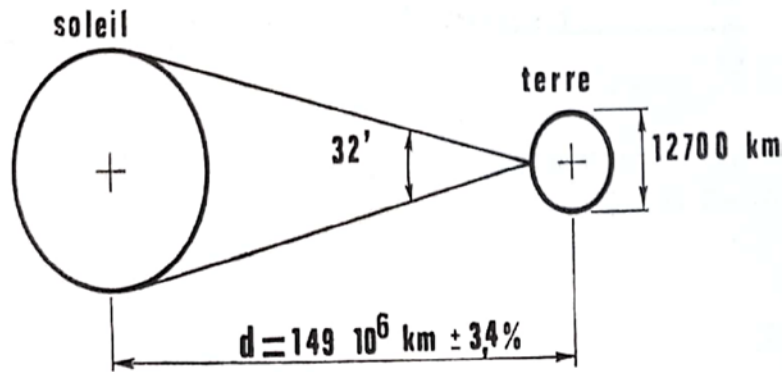


Figure 3: La distance Terre –soleil.

La constante solaire, c'est-à-dire le rayonnement direct I_0 reçu par l'unité de surface placée perpendiculairement aux rayons du Soleil à la limite extérieure de l'atmosphère terrestre, est de 1353 w/m^2 . Ceci provient de mesures effectuées par satellites et fusées [4].

La correction de la distance Terre-Soleil entraîne une variation dans la valeur de I_0 .

La constante solaire I_0 représente le rayonnement total du spectre solaire.

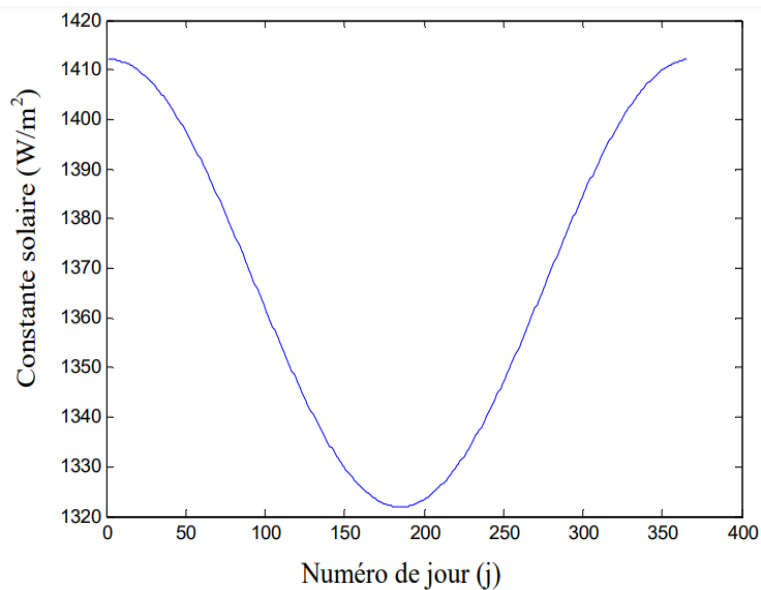


Figure 4: Variation de la valeur de la constante solaire en fonction de nombre de jours.

I.3.2. Le rayonnement global

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes [5].

- **Le rayonnement direct** est reçu directement du Soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs
- **Le rayonnement diffus** qui correspond au rayonnement reçu de la voûte céleste. Des rayons lumineux issus du Soleil traversent les nuages et se diffusent sur toute la surface de la Terre. Il contribue à l'éclairage mais ne peut pas être concentré.
- **Le rayonnement réfléchi** qui correspond au rayonnement renvoyé par le sol et l'environnement. Cette composante est nulle sur un plan horizontal.
- **Le rayonnement global** est la somme du rayonnement direct et diffus. C'est celui-ci qui est utilisé pour faire fonctionner les panneaux solaires thermiques et photovoltaïques.

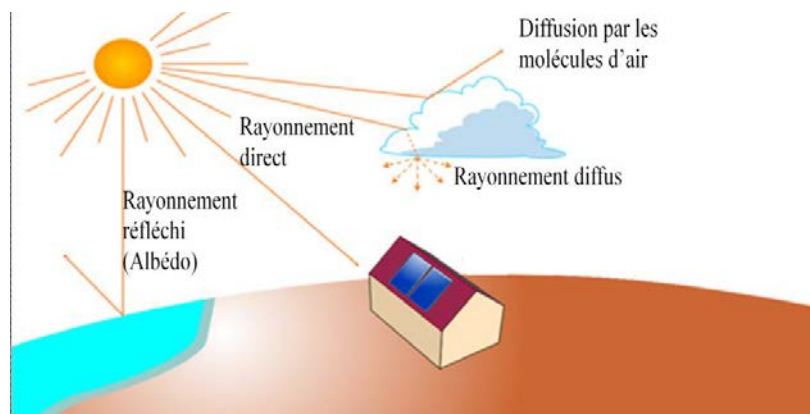


Figure 5: Types de rayonnement solaire reçus au sol.

Lorsque l'on considère le rayonnement direct on appelle rayonnement direct normal le rayonnement direct mesuré perpendiculairement aux rayons du soleil. Mesuré selon un plan non perpendiculaire, le même rayonnement irradie une plus grande surface, il est donc moins intense, est ce que l'on appelle l'effet cosinus [4].

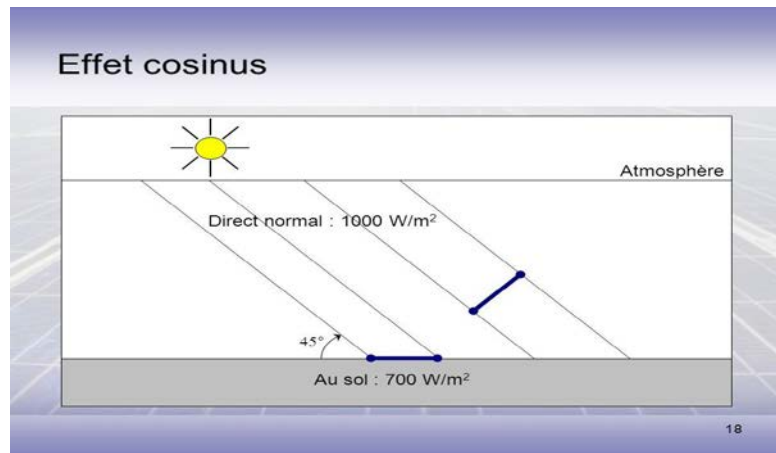


Figure 6 : Effet cosinus.

I.4. Les différentes technologies de la conversion d'énergie solaire

La technologie de conversion d'énergie désigne tout système qui convertit l'énergie d'une forme en une autre. L'énergie peut être décrite de plusieurs façons et peut avoir de formes différentes, telles que la chaleur, le travail et le mouvement.

L'objectif principal des centrales est de prendre un combustible, tel que le charbon, le gaz naturel ou l'uranium, et de le transformer en électricité. Cela fait des centrales électriques une technologie de conversion d'énergie. Les centrales sont de loin les plus grandes technologies de conversion d'énergie. D'autres technologies de conversion d'énergie comprennent des voitures, des piles, des radiateurs et des générateurs. Les centrales électriques doivent utiliser plusieurs processus de conversion d'énergie pour atteindre l'objectif final : l'électricité. Une centrale à charbon en est un bon exemple [6]:

- L'énergie chimique est stockée dans les molécules d'hydrocarbures du charbon. Lorsque le charbon est brûlé, cette énergie chimique est transformée en chaleur. (Énergie chimique → Chaleur).
- Les gaz d'échappement chauds de la réaction de combustion sont utilisés pour chauffer l'eau et la convertir en vapeur, qui se déplace dans les tuyaux à pression et vitesse élevées. (Chaleur → Chaleur).
- La vapeur se dilate ensuite à travers une turbine, produisant l'énergie mécanique de mouvement. (Chaleur → Mouvement).
- Le mouvement de la turbine fait tourner un générateur électrique, ce qui fait circuler l'électricité. (Mouvement → Électricité).

En fait, nos propres corps sont des technologies de conversion d'énergie extrêmement complexes. Ils prennent l'énergie chimique des aliments et la convertissent en différentes formes d'énergie chimique dont nous avons besoin pour fonctionner. Notre corps peut alors convertir cette énergie en plusieurs autres formes : la chaleur, le mouvement, le son, l'énergie potentielle gravitationnelle, etc.



Figure 7: Centrales à charbon pour la production d'électricité en Allemagne.
I.5. Solaire à concentration thermodynamique

I.5.1. Définition et catégories

Un système solaire à concentration thermodynamique exploite le rayonnement du Soleil en orientant, au moyen de miroirs, les flux de photons. Ce système thermique concentré permet d'atteindre des niveaux de température bien supérieurs à ceux des systèmes thermiques classiques non concentrés.

Alors que les chauffe-eau domestiques produisent une eau à une cinquantaine de degrés, il est possible, par la concentration, de chauffer des fluides à des températures de l'ordre de 250 à 1 000°C. Il devient alors envisageable de les utiliser dans des processus industriels comme la génération d'électricité (on parle parfois « d'électricité solaire thermodynamique »).

D'autres utilisations directes ou indirectes des fluides chauds sont possibles comme le dessalement de l'eau de mer, le refroidissement ou encore la génération d'hydrogène[7].

I.5.2. Principe de concentration

Le principe de la concentration de l'irradiation solaire est connu depuis l'Antiquité, comme l'illustre le mythe des « miroirs ardents » d'Archimède. Le plus souvent grâce à des miroirs réfléchissants ou des loupes, un système à concentration

réoriente le rayonnement solaire collecté par une surface donnée sur une cible de dimension plus réduite : le démarrage d'un feu de feuilles mortes avec une loupe utilise ce principe [7].

I.5.3.Fonctionnement des centrales solaires thermodynamiques

Les centrales solaires thermodynamiques utilisent une grande quantité de miroirs qui font converger les rayons solaires vers un fluide caloporteur chauffé à haute température. Pour ce faire, les miroirs réfléchissants doivent suivre le mouvement du soleil afin de capter et de concentrer les rayonnements tout au long du cycle solaire quotidien. Le fluide produit de l'électricité par le biais de turbines à vapeur ou à gaz. Il existe quatre grands types de centrales solaires thermodynamiques : les centrales à miroirs cylindro-paraboliques et leur variante miroirs de Fresnel, les centrales à tour[7].



Figure 8: Types de capteur pour concentration thermodynamique.

I.6. Solaire thermique

L'énergie solaire thermique est l'énergie thermique du rayonnement solaire. Elle est captée dans le but d'échauffer un fluide (liquide ou gaz). L'énergie reçue par le fluide peut être ensuite utilisée directement (eau chaude sanitaire, chauffage, etc.) ou indirectement (production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir de l'énergie électrique, production de froid, etc.) [8].

C'est ainsi une forme d'énergie solaire, provenant de la chaleur transmise par le Soleil par rayonnement. Une autre forme notable est l'énergie solaire photovoltaïque, qui utilise l'effet photoélectrique afin de transformer les photons émis par le soleil en électricité.



Figure 9: Types de capteur thermique.

Le principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique est montré dans la figure 10, le rayon solaire traverse une plaque de verre transparente où les rayons lumineux seront alors absorbés après avoir passé la plaque de verre, par une plaque de métal noir qui absorbera environ 80 à 90% des rayons solaires. Puis, la chaleur ainsi générée est transmise à un circuit d'eau qui alimente un circuit secondaire qui alimente une habitation en eau sanitaire ou en chauffage.

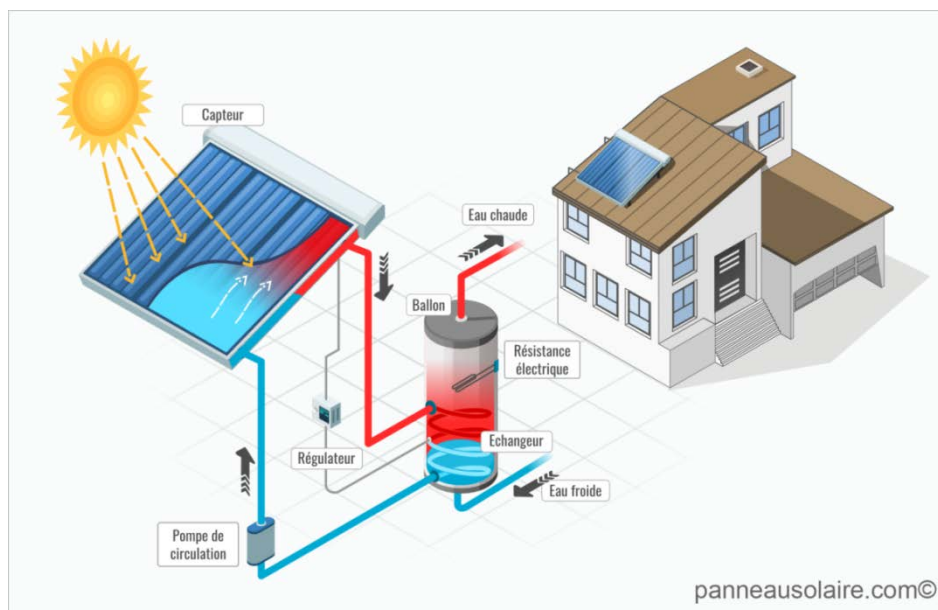


Figure 10: Principe de fonctionnement de capteur solaire thermique.

I.7. La cheminée (tour) solaire

Une cheminée solaire est un type de système de chauffage et de refroidissement solaire passif qui peut être utilisé pour réguler la température d'un bâtiment ainsi que pour assurer la ventilation. Tout comme le mur Trombe ou le mur solaire, les cheminées solaires sont un moyen de réaliser la conception de bâtiments

éco énergétiques. En principe, les cheminées solaires sont des conteneurs creux qui relient la partie intérieure du bâtiment à sa partie extérieure [9].

I.7.1. Principe de fonctionnement de La cheminée (tour) solaire

Les cheminées solaires sont des moyens faciles et peu coûteux de chauffer et ventiler un bâtiment. Tout d'abord, une cheminée est construite et revêtue d'un matériau sombre ou noir. Elle est de couleur noire car cela minimise la quantité de lumière du soleil qui est réfléchi par la cheminée, absorbant plus de chaleur et assurant aussi que plus de chaleur sera transférée dans l'air à l'intérieur du bâtiment. De plus, ces cheminées sont généralement placées sur un mur sud si la maison est dans l'hémisphère nord[9].

Le processus de chauffage d'un espace à l'aide d'une cheminée solaire est assez simple. Lorsque le rayonnement solaire atteint le côté de la cheminée, il chauffe la colonne d'air à l'intérieur. Si les événements extérieurs du haut de la cheminée sont fermés, l'air chauffé est renvoyé dans l'espace habitable. Ceci fournit un type de chauffage à air par convection. Au fur et à mesure que l'air se refroidit dans la pièce, il est ramené dans la cheminée solaire et réchauffé à nouveau. Lorsque les cheminées solaires sont utilisées pour le chauffage, elles fonctionnent de la même manière que les murs Trombe[9].

Le refroidissement d'un espace par une cheminée solaire est légèrement différent de celui effectué à l'aide d'un mur Trombe. Comme un toit en surplomb ne peut pas être installé à côté d'une cheminée solaire, deux événements supplémentaires sont mis en place. Le premier événement a été mentionné, celui du haut de la cheminée. Le second est à l'extrémité opposée du bâtiment, offrant une ouverture entre le bâtiment et l'air extérieur pour permettre la ventilation. Lorsque le rayonnement solaire atteint le côté de la cheminée, la colonne d'air à l'intérieur de la cheminée est à nouveau chauffée. L'événement en haut de la cheminée est gardé ouvert pour que l'air chauffé ne soit pas emprisonné. Cet air chauffé est tiré vers le haut et hors de la cheminée, tandis que l'air de l'extérieur est aspiré, créant une sorte de « courant d'air » qui fournit de l'air frais dans le bâtiment.

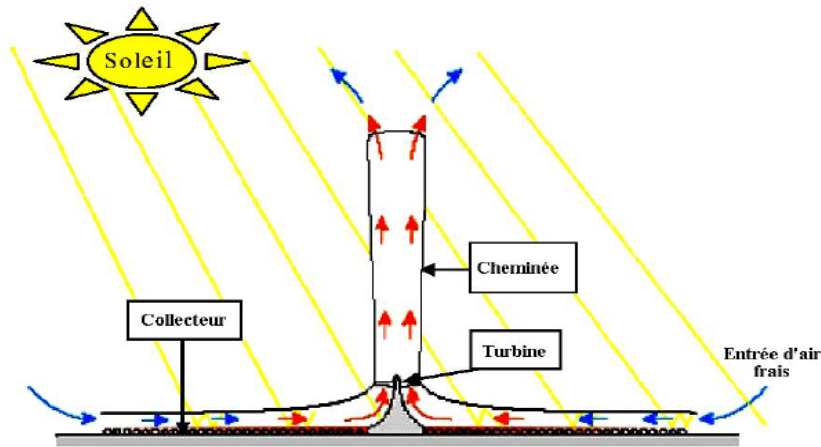


Figure 11: Un schéma d'une cheminée solaire.

I.8. Le solaire photovoltaïque

Une centrale solaire photovoltaïque est un dispositif technique de production d'électricité par des modules solaires photovoltaïques (PV) reliés entre eux (en série et en parallèle) et raccordé au réseau électrique par des onduleurs[10].

L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire dans une cellule photovoltaïque. Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs, comme le silicium, produits à partir d'une matière première de très grande pureté[10].



Figure 12: La centrale photovoltaïque de Birr Raba a Ouargla de 10 mégawatts.

I.9. Niveaux d'ensoleillement dans le monde

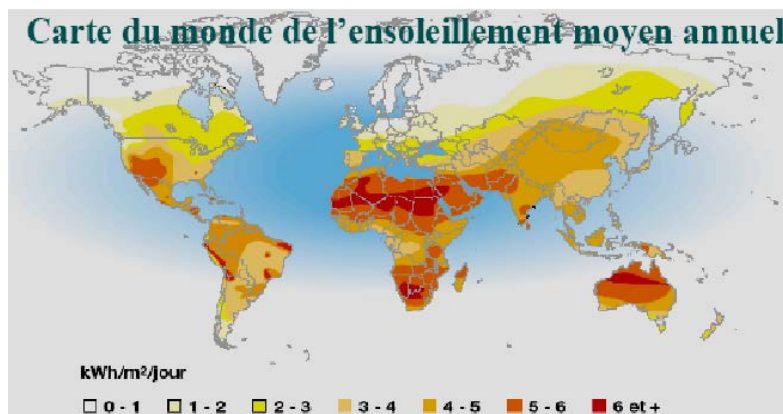


Figure 13: Ensoleillement moyenne annuelle mondial.

Les régions désertiques du globe (Grand Sahara, Sud-ouest des Etats-Unis d'Amérique, Australie, Afrique du Sud) recevant jusqu'à 2900 kWh/m²/an de rayonnement direct fournissent largement la surface nécessaire à une production massive d'énergie par les technologies à concentration. Les pays du Maghreb ont un potentiel solaire élevé. Les taux d'irradiation solaire effectués par satellites par l'Agence Spatiale Allemande, montrent des niveaux d'ensoleillement exceptionnels de l'ordre de 1200 kWh/m²/an dans le Nord du Grand Sahara. Par contre, les meilleurs taux d'irradiation solaire en Europe sont de l'ordre de 800 kWh/m²/an limités à la partie sud de l'Europe. L'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit: 169.000 kWh/an pour le solaire thermique, 13,9 kWh/an pour le solaire photovoltaïque et 35 kWh/an pour l'éolien[11].

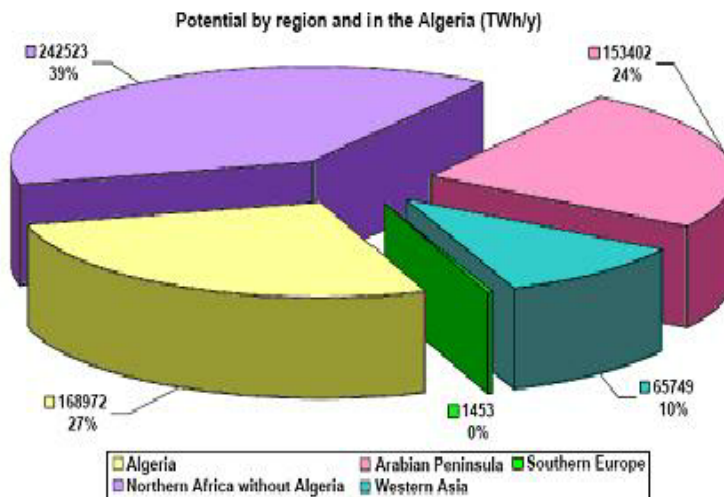


Figure 14: potentiel solaire dans le monde.

I.9. 1.Niveaux d'enseillement en Afrique

L'Afrique est souvent considérée et désignée comme le «Continent du soleil» c.à.d. le continent où l'influence du Soleil est la plus importante. Selon la Carte du monde du Soleil, l'Afrique reçoit beaucoup plus de temps d'enseillement au cours de l'année que tout autre continent de la Terre. Tous les endroits les plus enseilés de la planète se trouvent en Afrique. Le Sahara oriental / Afrique du nord est particulièrement connue pour ses records d'enseillement, la région expérimente non seulement la plus grande durée annuelle de soleil mais aussi les valeurs moyennes annuelles les plus élevées de rayonnement solaire[11].

La figure ci-dessous montre l'irradiation solaire globale annuelle dans tous les pays d'Afrique.

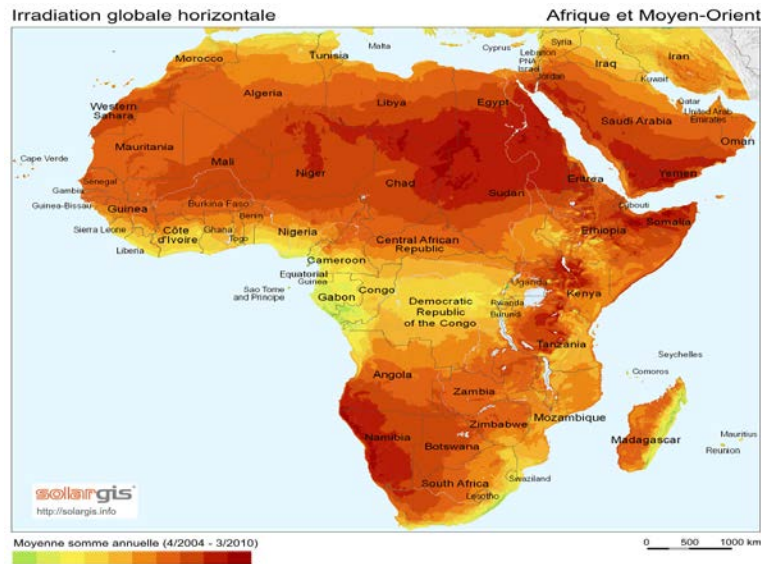


Figure 15: Niveau d'ensoleillement en Afrique.

I.9.2. Niveaux d'ensoleillement en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de $1 m^2$ est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/ m^2 /an au Nord et 2263 KWh/ m^2 /an au sud du pays. Ce gisement solaire dépasse les 5000 KWh.

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (Kwh/m²/an)	1700	1900	2650

Figure 16: Ensoleillement reçu annuellement en Algérie par région climatique.

Les figures suivantes montrent l'irradiation solaire maximale que reçoit l'Algérie sur le plan normal, en juillet et son irradiation minimale, en décembre, en KWh/ m^2 /jour. On constate que même au mois de décembre et sur les montagnes du

nord l'énergie l'irradiation reçue est aux environs de 4 KWh/m²/jour. Ce qui indique l'importance, l'utilité et la justesse de l'énergie solaire en Algérie[12].

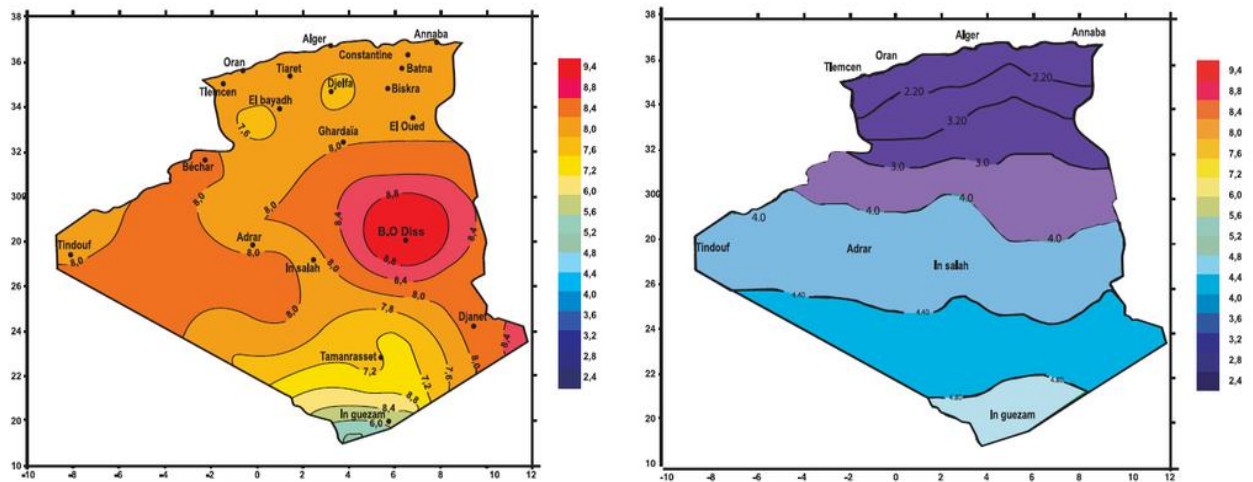


Figure 17: Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontal aux mois de Juillet et Décembre.

L.10. Croissance de la consommation d'énergie en Algérie

Pour estimer le besoin en termes d'énergie, il faut bien connaître l'allure de la croissance démographique ainsi que l'évolution du secteur industrielle qui représente deux facteurs majeurs dans la consommation de l'énergie en Algérie. D'après l'ONS, la population algérienne observe une nette croissance de la natalité. Donc le facteur démographique doit être pris en compte sérieusement en ce qui concerne la consommation d'énergie qui va augmenter davantage. Le développement industriel qu'a connu l'Algérie que soit dans le secteur étatique ou privé a également contribué à la croissance de la consommation de l'énergie[13].

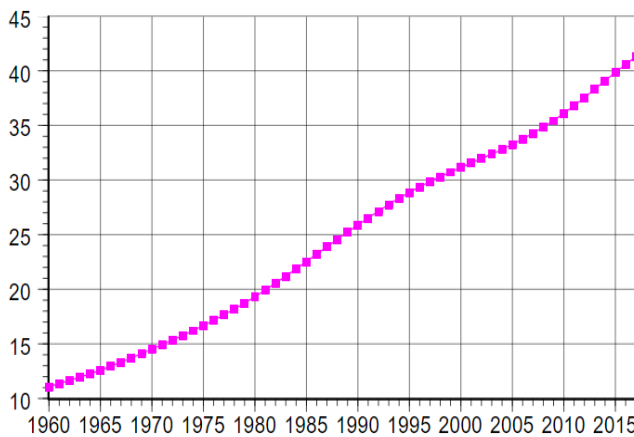
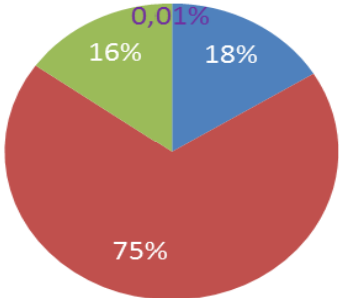
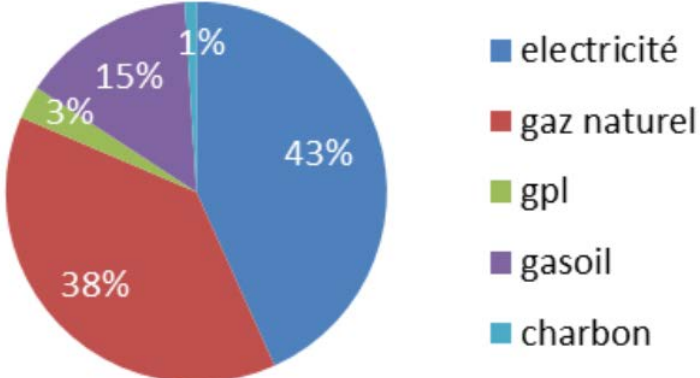
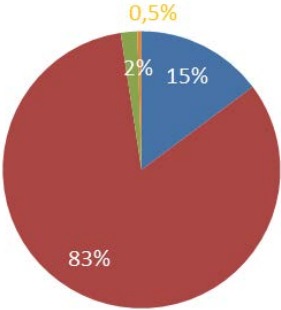


Figure 18 : La croissance démographique en Algérie entre 1960-2015.

• Tableau 1: La consommation énergétique en Algérie.

<p>1/La consommation Finale du secteur résidentiel a atteint 10,5 millions de TEP :</p>	
<p>2/La consommation énergétique du secteur tertiaire a atteint 2,3 millions de TEP :</p>	
<p>3/La Consommation énergétique du secteur de l'industrie a atteint 5,2 millions de TEP :</p>	

Il est bien évident que selon les analyses de la croissance démographique ainsi que la consommation en énergie, nous sommes devant la nécessité de rechercher des ressources d'énergies autres que les énergies conventionnelles. Une des sources des énergies renouvelables est l'énergie photovoltaïque qui devient une exigence pour pouvoir assurer le besoin en termes d'énergie électrique avec une source inépuisable.

I.11. Le développement de la filiale photovoltaïque en Algérie

L'intérêt pour le développement des énergies renouvelables a été perçu très tôt en Algérie avec la création de l'institut de les l'énergie solaire dès 1962.

A cet effet, le développement de la photovoltaïque en Algérie a connu deux étapes selon les objectifs fixés par l'état [14] :

- Première phase entre (2015-2020): l'installation d'une capacité de 3000 MW en énergie photovoltaïque. Il est prévu la construction d'une usine de fabrication de silicium. Par ailleurs, il est attendu qu'un réseau de sous-traitance nationale soit mis en place pour la fabrication des onduleurs, des batteries, des transformateurs, des câbles et ces autres équipements entrant dans la construction d'une centrale photovoltaïque.
- Deuxième phase entre (2021-2030): l'installation d'une capacité de 10575 MW en énergie photovoltaïque et 2000 MW en énergie thermique. Cette période serait marquée par le développement d'un réseau national pour la fabrication des équipements photovoltaïques.
- La mise en place d'un organisme spécialisée pour promouvoir la recherche-développement dans ce domaine, tel :
 - Création des centres de recherche affiliés aux entreprises comme le CREDEG, filiale du Groupe Sonelgaz, l'agence de promotion et de rationalisation de l'utilisation de l'énergie (APRUE) et une société filiale de Sonelgaz spécialisée dans la réalisation des projets d'énergies renouvelables (SKTM).
 - Création des centres de recherche spécialisés dans le domaine de l'énergie solaire, tel que: UDES et ces filiales, CDER, UDTS, etc. ...
 - Création du ministère de l'Environnement et des Énergies renouvelables en 2017.
- Ainsi veiller à la coopération entre ces différents acteurs, en vue de développer les technologies et les procédés innovants en matière d'énergies renouvelables.

Cependant, en termes de réalisation d'études ; et de projets d'énergie solaire avant et après l'adoption du programme précité, il est à noter que (Ministère de l'Énergie, 2018a):

- une capacité de près de 375 MW a été mise en service, répartie entre les différentes régions sud et hauts plateaux comme le montre le tableau suivant :

• **Tableau 2: Projets réalisés en énergie solaire en Algérie**

Projet	Capacité Installé	Région	Année de mise en service	Maitre d'ouvrage
Centrale solaire composé de 109 systèmes PV :	0.453MWc	wilayas du SUD : d'Adrar, Tindouf, Tamanrasset, Illizi	1998	Sonelgaz
Centrale solaire PV :	0.5 MWC	wilayas du SUD : M'Silla, El-Oued, Tamanrasset, Illizi, Ghardaïa	2006-2010	Sonelgaz
Centrale hybride solaire-gaz	150 MWC dont l'apport solaire et de 30MWc (solaire thermique)	HassiRamel(Laghouat)	2011	ABENER/NEAL/COFIDES/SO NATRACH
Centrale photovoltaïque pilote (22)	1,1MWc	Ghardaïa	2014	Sonelgaz
Centrales Photovoltaïques	343 MWC	Hauts Plateaux et Grand Sud	2015-2018	Sonelgaz

En ce qui concerne la réalisation d'études portant sur le développement de cette énergie, les points suivants peuvent être cités [14] :

- L'élaboration de l'Atlas solaire de l'Algérie, par le ministère de l'Énergie en collaboration avec l'Agence Spatiale algérienne (ASAL).
- L'identification d'un ensemble de sites à haut potentiel solaire pouvant accueillir des centrales électriques solaires, par le ministère de l'Énergie en collaboration avec l'Agence Spatiale algérienne (ASAL).
- Étude d'impact de l'intégration de l'énergie solaire sur le réseau électrique algérien, guidée par Sonelgaz en collaboration avec la CESI.

I.12. Quelques réalisations photovoltaïques en Algérie

I.12.1. Le photovoltaïque dans le secteur Etatique

- **Unité de développement des équipements solaires (L'UDES)**

Le siège de l'UDES est localisé à 40Km à l'ouest d'Alger, été créée par arrêté N° 008 du 9 Janvier 1988 de la Présidence de la République (Journal officiel N°06 du 10 février 1988). Depuis le 05 décembre 2007, date de publication de l'arrêté ministériel portant création des Entreprises Publiques à caractère Scientifique et Technique, l'UDES a été intégrée dans l'EPST Centre de L'UDES a été dotée de 02 divisions, de 04 ateliers de fabrication et de deux services administratif [15] :

- Division Equipements Energies Renouvelables.
- Division Froid et Traitement des Eaux par Energies Renouvelables.
- Atelier de fabrication des équipements solaires.
- Atelier de mécanique.
- Atelier d'électricité, électronique, électrotechnique et automatique.
- Atelier de menuiserie métallique générale.

Les missions principales de l'Unité de Développement des Equipements Solaires sont de:

- Réaliser des travaux de conception, de dimensionnement et d'optimisation des équipements en énergies renouvelables pour la production de la chaleur, l'électricité, le froid et le traitement des eaux.
- Mettre en œuvre toutes études et recherches de développement de procédés technologiques de fabrication de prototypes, équipements et des préséries.
- Etablir des études technico-économiques, d'engineering pour mettre en place des installations pilotes en vue d'assurer le transfert et la maîtrise de nouvelles technologies.
- Mettre en place les techniques de caractérisation, de tests, de contrôles qualité et de conformité, en vue d'assurer la qualification, l'homologation et la certification des équipements développés.

- **Tableau 3: Quelques projets photovoltaïques réalisés par l'UDES.**

ORGANISME	TYPE	PUISSANCE
CRND	Installation de dix-neuf systèmes d'éclairage public par énergie photovoltaïque.	2.09 KWc
CDTA	Installation de vingt-six systèmes d'éclairage public par énergie photovoltaïque	2.86 KWc

NAFTAL	Installation de vingt-deux systèmes d'éclairage public par énergie photovoltaïque et l'alimentation électrique de deux volucompteurs en énergie solaire.	7.22 KWc
MDN	Alimentation par énergie photovoltaïque d'une cabine de cuisson tractable.	0.7 KWc
Hôpital militaire d'Ain na adja	Installation d'un système d'éclairage public par énergie photovoltaïque.	0.11 KWc
Algérie Telecom	Alimentation d'un relais de transmissions par énergie photovoltaïque	4.2 KWc
MESRS	Installation de quarante systèmes d'éclairage public par énergie photovoltaïque.	4.4 KWc
Postes de surveillance routières et unités de la Gendarmerie nationale	Installation de systèmes d'éclairage public et alimentation des cabines 10.	07 KWc
Ecole Nationale supérieure de l'hydraulique	Installation d'un système d'éclairage public par énergie photovoltaïque.	0.11 KWc
Complexe Touristique	Installation de 12 systèmes d'éclairage public par énergie photovoltaïque	1.32 KWc
AFSI BOUCHAOUI Gendarmerie Nationale	Installation de 20 systèmes d'éclairage public par énergie photovoltaïque	2.2 KWc
Station de Veille de l'Atmosphère Global ONM Assekrem W-Tamanrasset	Installation d'une mini-centrale solaire photovoltaïque pour l'alimentation électrique des équipements de mesure	05 KWc
Direction des Mines et de l'Industrie : Gara-Djebilet Tindouf	Installation d'une mini-centrale solaire photovoltaïque pour l'alimentation électrique de la maison et l'éclairage extérieure	09 KWc

- **Le projet de Rouïba éclairage**

Rouïba éclairage est une entreprise publique économique relevant du portefeuille du groupe Sonelgaz, spécialisée dans la conception, fabrication et commercialisation de gammes diversifiées de produits d'éclairage public et de distribution d'énergie électrique, ainsi que le traitement des aciers par la galvanisation à chaud, son siège social est situé au niveau de la zone industrielle de Rouïba Wilaya d'Alger. Rouïba Eclairage est certifiée selon les références ISO 9001 version 2015 [16].



Figure 19: L'usine de Rouïba Eclairage.

I.12.2. Le photovoltaïque dans le secteur privé

- **La société Aurès solaire**

Est une société Algérienne spécialisée dans la fabrication de panneaux solaires photovoltaïques d'une nouvelle génération avec une capacité de 25MW, la SARL AURÈS SOLAIRE est en partenariat avec la société française REVA dans le cadre de la loi du 51/49. Une joint-venture entre les deux sociétés, Française et Algérienne a été signée lors de la visite en Algérie les 16 et 17 décembre 2013 d'une importante délégation française composée de chefs d'entreprises conduite par le Premier ministre français Jean-Marc Ayrault. Cette société est installée dans la zone industrielle d'Ain Yakout de la wilaya de Batna [17].



Figure 20: La société Aurès solaire.

- **L'usine Condor Electronique pour la production des panneaux solaires photovoltaïque**

L'usine condor est implantée dans la zone industrielle de Bordj Bou-Arredj, sur une superficie de 55842met avec un effectif de 200 personnes. La capacité nominale de production est de 50MW par an. Condor électroniques a procédé au lancement de la construction de son usine de panneaux solaire photovoltaïque, et annonce aussi la réalisation prochaine d'un autre complexe destiné à produire des composants photovoltaïque[18].



Figure 21:L'usine de condor électronique.

Conclusion

Nous avons présenté dans le premier chapitre de notre mémoire, des notionsfondamentale sur le potentiel solaire, telle que le spectre solaire, les différents

types de rayonnements, et le niveau d'ensoleillement dans le monde. Nous avons présenté par la suite les différentes technologies de la conversion d'énergie solaire, ainsi que les principales entreprises de production des panneaux solaires en Algérie.

CHAPITRE II : Cellule solaire

I. Introduction

Les cellules photovoltaïques (PV) sont des composants optoélectroniques capables de convertir directement la lumière en électricité, en utilisant l'interaction de la lumière avec certains matériaux semi-conducteurs. Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque fait appel aux propriétés du rayonnement solaire et celles des semi-conducteurs. Dans ce chapitre on commence par une description de la cellule solaire et du principe de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

II.1. la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui exposé à la lumière (photons), génère de l'électricité. C'est l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. Le courant obtenu est fonction de la lumière incidente. L'électricité produite est fonction de l'éclairement, la cellule photovoltaïque produit un courant continu.

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium (Si) et plus rarement d'autres semi-conducteurs : séléniure de cuivre et d'indium, tellure de cadmium etc. Elles se présentent généralement sous la forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté, prises en sandwich entre deux contacts métalliques, pour une épaisseur de l'ordre du millimètre.

Les cellules sont souvent réunies dans des modules solaires photovoltaïques ou panneaux solaires, en fonction de la puissance recherchée [19].



Figure 22: Cellule photovoltaïque.

Une cellule éclairée convenablement fournit une tension électrique continue de 0,6V (cellule en silicium).cette tension dépend peu de l'éclairement fourni (sauf quand celui-ci est trop faible).l'intensité, donc la puissance, dépend fortement de l'éclairement et elle est proportionnelle

CHAPITRE II: CELLULE SOLAIRE

à la surface de la cellule. Elle est de quelques centièmes d'ampère pour une surface très bien ensoleillée de 1cm^2 .

La surface d'une cellule est comprise entre quelques mm^2 (photopile de montre) et 400cm^2 . Il n'y a pas de limite théorique pour cette surface, mais les difficultés techniques, donc les coûts, augmentent avec les dimensions [19].

Les cellules les plus répandues actuellement sont à la base de silicium (différence de potentiel de 0,6V).

II.2. Historique du photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans soleil [20].

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

- **1839:** Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- **1875:** Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- **1954:** Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- **1958:** Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- **1973:** La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de Delaware.
- **1983:** La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

II.3. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux Appelés « semi-conducteurs » qui exposés à la lumière, produisent de l'électricité. Le plus connu d'entre eux est le silicium cristallin qui est utilisé aujourd'hui dans 90% des panneaux solaires produits dans le monde.

CHAPITRE II: CELLULE SOLAIRE

Cet effet est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors des paires électrons-trous (excitation d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction) créant une tension ou un courant électrique. Plusieurs types de composants peuvent être créés à partir de ce principe. Ils sont appelés photodiodes, phototransistors ou des photopiles. Cet effet photovoltaïque est notamment utilisé dans les panneaux solaires photovoltaïques [21].

II.4. Les différentes Technologie de cellule photovoltaïque

Pratiquement toutes les cellules solaires disponibles aujourd'hui sont réalisées à base de silicium. Ce semi-conducteur est principalement employé dans la fabrication des puces Informatiques. Les cellules solaires sont construites avec la même matière première et les mêmes procédés de base. Elles existent en différentes formes et technologies[22] :

II.4.1. Cellule en silicium poly cristallin

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs par les différents cristaux [19].

- **Avantages**
 - Bon rendement (environ 13%).
 - Moins cher que le monocristallin.
 - Durée de vie importante (environ 30 ans).
- **Inconvénients**
 - Rendement faible sous un faible éclaircissement.

II.4.2. Cellule en silicium monocristallin

Lors du refroidissement du silicium fondu on s'arrange pour qu'il se solidifier en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en générale d'un bleu uniforme [19].

- **Avantages**
 - Première génération de photopiles.
 - Un taux de rendement excellent de 15% et jusqu'à 24% en labo.
- **Inconvénients**
 - les cellules sont chères.
 - Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.
 - Rendement faible sous un faible éclaircissement.

II.4.3. Cellule en silicium amorphe

Le silicium n'est pas cristallisé il est déposé sur une feuille de verre. la cellule est gris très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites solaires [19].

- **Avantages**

- elles fonctionnent avec un éclairage faible.
- elles sont moins chères que les autres.
- Moins sensible aux températures élevées.

- **Inconvénients**

- leur rendement (environ 10%) est moins bon que les autres en plein soleil.
- Durée de vie courte (environ 10 ans), leurs performances diminuent sensiblement avec le temps.
- Souple.

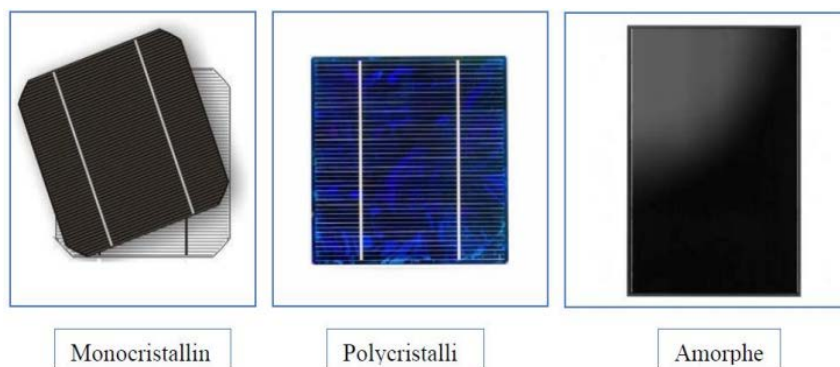


Figure 23: Les principaux types de cellule.

II.5. Description du principe de fonctionnement d'une cellule solaire

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est fondé sur les propriétés de semi-conducteurs qui, percutés par les photons, mettent en mouvement un flux d'électrons. Les photons sont des particules élémentaires qui transportent l'énergie solaire à 300 000 km/s. Lorsqu'ils frappent un élément semi-conducteur comme le silicium, ils arrachent des électrons à ses atomes. Ces électrons se mettent en mouvement, de façon désordonnée, à la recherche d'autres « trous » où se repositionner [23].

Mais pour qu'il y ait un courant électrique, il faut que ces mouvements d'électrons aillent tous dans le même sens. Pour les y aider, on va associer deux types de silicium. La face exposée au soleil est « dopée » avec des atomes de phosphore qui comportent plus d'électrons que le silicium, l'autre face est dopée avec des atomes de bore qui comportent moins d'électrons. Cette

CHAPITRE II: CELLULE SOLAIRE

double face devient une sorte de pile : le côté très chargé en électrons devient la borne négative (N), le côté avec moins d'électrons devient la borne positive (P). Entre les deux il se crée un champ électrique[23].

Quand les photons viennent exciter les électrons, ceux-ci vont migrer vers la zone N grâce au champ électrique, tandis que les « trous » vont vers la zone P. Ils sont récupérés par des contacts électriques déposés à la surface des deux zones avant d'aller dans le circuit extérieur sous forme d'énergie électrique. Un courant continu se crée. Une couche antireflet permet d'éviter que trop de photons se perdent en étant réfléchis par la surface

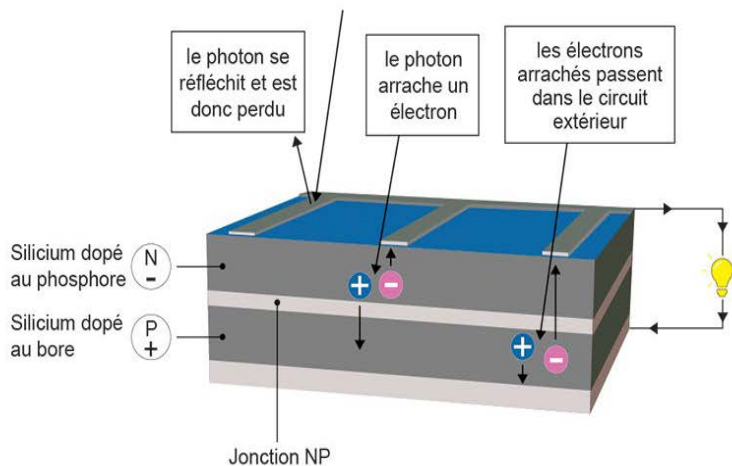


Figure 24: Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.

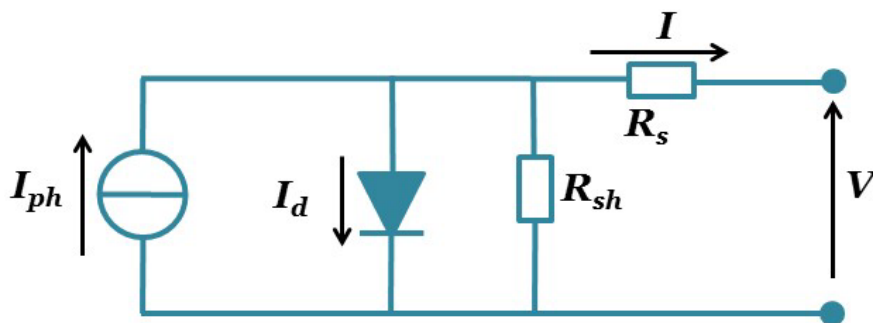


Figure 25: Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque. Est la résistance série du circuit. est la résistance parallèle du circuit (shunt).

II .6. Paramètre essentiels caractérisent une cellule PV

II.6.1. Courant de court-circuit I_{cc}

Il s'agit de courant obtenu en court circuits les bornes de la cellule (en prenant $V=0$ dans le schéma équivalent) .il croit linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de

CHAPITRE II: CELLULE SOLAIRE

la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température comme le montre l'équation suivante [22]:

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\left(\frac{R_s I_{cc}}{AKT} \right)} - 1 \right) - \frac{R_s I_{cc}}{R_{sh}} \quad (\text{II.1})$$

I_{ph} : Le courant photovoltaïque [A].

I_0 : Le courant de saturation de la diode [A].

A : Le facteur d'idéalité de la diode.

R_s : La résistance série en(Ω).

R_{sh} : La résistance shunt en(Ω).

K : La constante de Boltzmann.

T : La température de la cellule (K).

II.6.2. Tension de circuit ouvert V_{c_0}

La tension de circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul, c'est à dire quand la cellule n'alimente aucune charge. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse. On supposant R_{sh} qu'est suffisamment grand on obtient [22]:

$$V_{c_0} = \frac{AKT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (\text{II.2})$$

V_{c_0} : La tension a circuit ouvert.

I_{ph} : Le courant photovoltaïque [A].

I_0 : Le courant de saturation de la diode [A].

A : Le facteur d'idéalité de la diode.

K : La constante de Boltzmann.

q : La charge de l'électron.

T : La température de la cellule (K).

II.6.3. La puissance maximale P_{max}

Dans les conditions ambiantes de fonctionnement fixe (éclairage, température) la puissance électrique P disponible aux bornes d'une cellule PV est égale au produit du courant continu fourni I par une tension continue donnée V [22] :

$$P=V.I \quad (II.3)$$

Où :

P : puissance mesurée aux bornes de la cellule PV (watt).

V : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV (volt).

I : Intensité mesurée aux bornes de la cellule PV (ampère).

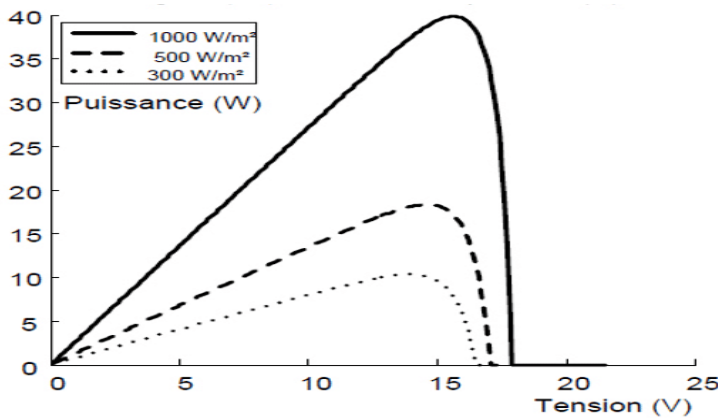


Figure 26: Courbe caractéristique P-V.

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximum $P_{\text{max-ideal}}$ correspondrait donc à la tension de circuit ouvert V_{co} multipliée par le courant de court-circuit :

$$P_{\text{max-ideal}} = V_{co} \cdot I_{cc} \quad (II.4)$$

$P_{\text{max-ideal}}$: Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV idéal (watt).

V_{co} : Tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV (volt).

I_{cc} : Intensité de court-circuit mesurée aux bornes de la cellule PV (ampère).

Par simplification, les professionnels caractérisent un module PV par sa puissance nominale aux conditions de fonctionnement standard. Ce paramètre n'est autre que la puissance maximale mesurée sous ces conditions (en générale un ensoleillement de 1000 W/m^2 et une température de 25°C) [19].

II.7. Facteur de forme FF

Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $V_{co} \cdot I_{cc}$ [22].

CHAPITRE II: CELLULE SOLAIRE

$$FF = \frac{P_{\max}}{(V_{cc} \cdot I_{cc})} \quad (II.5)$$

$$FF = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (II.6)$$

Où :

P_{\max} : La puissance maximale.

I_{cc} : Courant au court-circuit.

V_{co} : Tension à circuit ouvert.

I_m : Courant maximale.

V_m : Tension maximale.

Le facteur de forme indique la qualité de la cellule, plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes, et diminue avec la température.

II.8. Le silicium

Les semi-conducteurs sont classés selon leur composition chimique, il y a des semi-conducteurs élémentaires tels que le diamant (C), le silicium (Si), le germanium (Ge) qui appartiennent tous au groupe IV du tableau périodique[24].

Il existe également des semi-conducteurs composites, binaires, ternaires, quaternaires, voire quinaires, respectivement constitués de deux, trois, quatre ou cinq espèces chimiques différentes.

• Table périodique des éléments chimiques

Le tableau périodique des éléments chimiques est présenté avec une bordure rouge autour des éléments du groupe IV (C, Si, Ge, Sn, Pb). Les éléments sont classés par groupes (I à VIII) et périodes. Les légendes indiquent les propriétés des éléments : Alkali, Alcalino, Actinides, Post-transition metals, Lanthanides, Halogènes, Métaux, Transition metals, Non-métal, Liquide, Solide, Gaz, et Synthétique.

- Le Silicium est le deuxième élément le plus fréquent de la croûte terrestre : O_2 (46%), Si (28%), Al (8%).
- Le silicium présent sous forme de silice (SiO_2) contenue dans le sable ou le quartz.
- Il possède un oxyde naturel SiO_2 présentant d'excellentes propriétés électroniques.

CHAPITRE II: CELLULE SOLAIRE

- Les technologies de production sont aujourd'hui matures et leur industrialisation ne pose pas de difficulté.
- Le silicium a été choisi pour réaliser les cellules solaires photovoltaïques pour ses propriétés électroniques, il est caractérisé par la présence de quatre électrons sur sa couche périphérique.
- Dans le silicium solide, chaque atome est lié à quatre voisins, et tous les électrons de la couche périphérique participent aux liaisons.
- Ce semi-conducteur de type IV se dope facilement avec du bore et du phosphore.
- Les cellules PV offrent un rendement de conversion élevé.
- La durée de vie et le vieillissement des cellules PV sont maîtrisés.
- Le silicium est un matériau qui absorbe facilement la lumière que d'autres matériaux semi-conducteurs.
- A l'heure actuelle, le silicium (Si) cristallin (c-Si) représente environ 85% du marché PV. Bien que le matériau Si ne soit techniquement pas le mieux adapté à la conversion PV.



Figure 27: Le quartz.

II.8.1. Le point vu cristallographique

Le silicium, est de la forme diamant du carbone, a une structure de type « diamant », sa forme dérivée de la structure cubique faces centrées (cfc), avec un paramètre de maille de 0,5430710 nm [25].

Le silicium possède 4 électrons de valence (comme le carbone) : dans un cristal, il se lie donc de façon tétraédrique à 4 autres atomes de silicium :

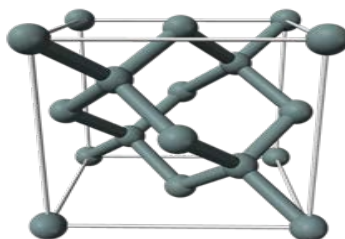


Figure 28: Structure cristalline du silicium.

II.8.2. Le silicium dans la nature

Les sources naturelles sont essentiellement les silicates (sable, etc...) mais aussi zircon, jade, mica, quartz, donc du SiO_2 plus ou moins pur. Le silicium existe donc essentiellement sous forme oxydée et nécessite en conséquence d'une part d'être réduit et d'autre part d'être purifié afin d'obtenir un matériau dit de qualité électronique. Le problème est que la silice n'est pas réduite simplement par l'hydrogène et qu'il faut donc trouver une technique de réduction, notamment par le carbone à haute température[25].

• **Propriétés chimiques du silicium [25] :**

Numéro atomique	14
Masse atomique	28,0855 $g.mol^{-1}$
Electronégativité de Pauling	1,8
Masse volumique	2,33 $g.cm^{-1}$ à 20 °C
Température de Fusion	1410 °C
Température d'ébullition	2355 °C
Rayon atomique	0,132 nm
Rayon ionique	0,271 (-4) nm 0,041 (+4)
Isotopes naturels	3
Configuration électronique	[Ne] 3s ² 3p ²
Energie de première ionisation	786,3 $KJ.mol^{-1}$
Energie de deuxième ionisation	1576,5 $KJ.mol^{-1}$
Energie de troisième ionisation	3228,3 $KJ.mol^{-1}$
Energie de quatrième ionisation	4354,4 $KJ.mol^{-1}$
Découverte	Bien que connu depuis la préhistoire, le silicium ne fut isolé pour la première fois qu'en 1823 par Berzelius

II.8.3. Le silicium comme semi-conducteur

Le silicium est le matériau semi-conducteur le plus utilisé commercialement, du fait de ses bonnes propriétés, et de son abondance naturelle.

Le comportement électrique des semi-conducteurs est le plus souvent modélisé avec la théorie des bandes d'énergie. Selon celle-ci, un matériau semi-conducteur possède une bande interdite suffisamment petite pour que des électrons de la bande de valence puissent aisément rejoindre la bande de conduction. Si un potentiel électrique est appliqué à ses limites, un faible courant électrique apparaît, généré à la fois par le déplacement de tels électrons et celui des «trous» qu'ils laissent dans la bande de valence[26].

La conductivité électrique des semi-conducteurs peut être contrôlée par dopage, en introduisant une petite quantité d'impuretés dans le matériau pour produire un excès d'électrons ou un déficit. Des semi-conducteurs dopés différemment peuvent être mis en contact pour créer des jonctions, servant à contrôler la direction et la quantité de courant qui traverse la totalité. Cette propriété est à la base du fonctionnement des composants de l'électronique moderne : diodes, transistors, etc...

II.9 .Le dopage

La formation des bandes interdites étant due à la régularité de la structure cristalline, toute perturbation de celle-ci tend à créer des états accessibles au sein de ces bandes interdites, rendant le gap plus «perméable». Le dopage consiste à implanter des atomes correctement choisis (nommés «impuretés») à l'intérieur d'un semi-conducteur intrinsèque afin d'en contrôler les propriétés électriques.

La technique du dopage augmente la densité des porteurs à l'intérieur du matériau semi-conducteur. Si elle augmente la densité d'électrons, c'est un dopage de type N. Si elle augmente celle des trous, c'est un dopage de type P. Les matériaux ainsi dopés sont nommés semi-conducteurs extrinsèques[27].

$$\text{Niveau de dopage} = \frac{\text{nombre de impureté}}{\text{nombre des électrons de matériau pure}} \quad (\text{II.7})$$

On désigne deux types de dopage : dopage de type P et dopage de type N.

II.9.1. Dopage de type P

On ajout des atomes possèdent 3 électrons un niveau accepteur dans la bande interdite très proche de la bande de valence [28], on y a introduit généralement du Bore, de l'Aluminium, du Gallium ou encore de l'Indium, prenons le cas du Silicium dans lequel on introduit du Bore qui

CHAPITRE II: CELLULE SOLAIRE

déficitaire en électrons donc moins d'électrons par rapport les atomes de le matériau pure, il lui manque un électron pour la réalisation des liaisons, le bore va capter un électron dans le reste du matériau (cet électron laisse derrière lui un trou d'électrons qui est mobile et de charges positives).

Le dopage introduit dans cette couche, les atomes susceptibles de libérer des tous mobiles. Donc on parle de couche P car la charge mobile est positive.

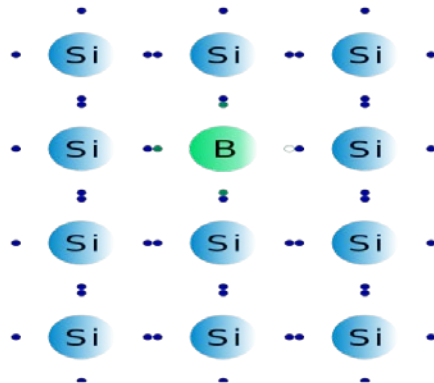


Figure 29: Dopage de type P (au bore).

II.9.2 Dopage de type N

Matériau dopé n est un semi-conducteur dont la concentration en électrons est largement supérieure à la concentration en trous. On y a introduit généralement du phosphore, de l'Arsenic ou encore de l'Antimoine. Prenons par exemple le cas du Silicium dans lequel on introduit le phosphore possède (5 électrons sur la couche extérieure) [28].

On associe à phosphore un niveau donneur E_d dans la bande interdite très proche de la bande de conduction. L'intérêt est que pour les températures supérieure à 0 K, les atomes d'arsenic sont ionisés ce qui revient à faire passer l'électron du niveau donneur à la bande de conduction. La concentration de donneurs sera donc supérieure à la concentration d'accepteurs ($N_d - N_a > 0$) ce qui correspond à la définition d'un semi-conducteur dopé n.

A la température ambiante pratiquement tous les donneurs sont ionisés et si la concentration en atomes donneurs est N_d , la densité de porteurs libres du semi-conducteur sera :

$$n = n_0 + N_d \tag{II.8}$$

Où n_0 est la densité d'électrons générés par le processus de rupture de liaisons de covalence qui engendre des paires électrons-trous.

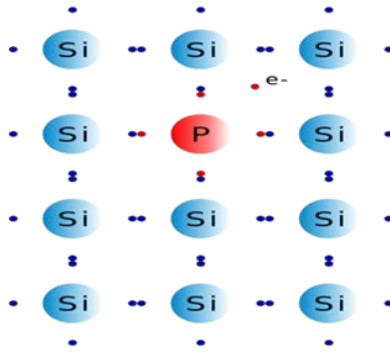


Figure 30 : Dopage de type N (au phosphore).

II.9.3. La jonction PN

Une jonction P-N est créée par la mise en contact d'un semi-conducteur dopé N (donneurs d'électron) et d'un semi-conducteur dopé P (composé de trous). L'interface entre ces deux régions s'appelle une jonction.

Pour réaliser des cellules photovoltaïques, il existe trois configurations de jonctions :

1. Une jonction PN (homojonction: les deux régions sont constituées d'un même matériau semi-conducteur, du silicium dans la majorité des cas).
2. Une hétérojonction (jonction entre deux semi-conducteurs différents)
3. Une jonction métal-semi-conducteur.

Dans ces trois configurations, les phénomènes physiques intervenant dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques sont similaires [29].

Les électrons de la jonction se déplacent vers la région P et les trous vers la région N. Il ne reste que des atomes ionisés fixes. Cette zone (dite de déplétion) de porteurs libres est appelée « zone de charge d'espace » créant un champ électrique[30]. En dehors, le champ électrique est nul.

Dans une homojonction à l'équilibre thermodynamique, à la frontière des deux régions, il s'est formé pendant le processus de déplétion, une barrière de potentiel (V_D) (tension de diffusion).

$$V_D = \frac{KT}{q} \left(\frac{N_D \times N_A}{N^2} \right) \quad (\text{II.9})$$

V_D : Tension de diffusion sur une jonction [V].

K : Constante de Boltzmann $K=1,380662 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$.

T : Température absolue du cristal [°K].

q : Charge élémentaire $q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

CHAPITRE II: CELLULE SOLAIRE

N_D : Concentration des donneurs [cm^{-3}].

N_A : Concentration des trous [cm^{-3}].

n_i : Concentration intrinsèque [cm^{-3}].

Les cellules solaires photovoltaïques sont souvent des jonctions dissymétriques, C'est-à-dire qu'un dopage est plus fort que l'autre. Dans ce cas, la zone de charge d'espace se trouve pratiquement dans la région la plus faiblement dopée.

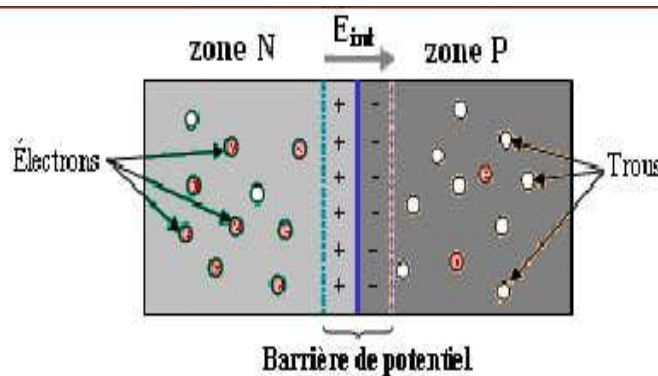


Figure 31: La jonction PN.

II.10. Les paramètres affectant le rendement

Les principaux facteurs affectant le rendement des cellules photovoltaïques sont liés à la qualité du silicium utilisé, notamment à la présence d'impuretés et de défauts à la surface ou dans le volume du matériau[31].

- **Les impuretés :**

Les impuretés peuvent être classées selon deux catégories dans le silicium dédié à la conversion photovoltaïque : les dopants et les contaminants. Les dopants sont des éléments introduits intentionnellement pour moduler la conductivité électrique du silicium. Cependant, la concentration en dopants est limitée à une valeur de 10^{16} à 10^{17} atomes/ cm^3 , à partir de laquelle le temps de vie des porteurs minoritaires diminue d'une façon très brusque. C'est pour cette raison que leur concentration dans le silicium doit être parfaitement contrôlée pour ne pas dégrader le rendement de la cellule photovoltaïque. La contamination du silicium peut se produire pendant son élaboration.

- **Défauts cristallins :**

Les défauts cristallins se forment au cours de l'étape de cristallisation des lingots de silicium. Ils ont eux aussi une influence très néfaste quant à la conversion photovoltaïque. Les défauts engendrent notamment des niveaux d'énergie supplémentaires dans la bande interdite, ce

CHAPITRE II: CELLULE SOLAIRE

qui conduit à une augmentation de la recombinaison des porteurs minoritaires et donc une dégradation des propriétés photovoltaïques du silicium.

Le nombre de défauts a donc une incidence importante sur le rendement photovoltaïque. Ces défauts peuvent être classés en différentes catégories selon leur géométrie mais sont principalement sous forme de dislocations et de joints de grains.

- **Défauts ponctuels :**

Ils se présentent comme un écart localisé à la périodicité de la matrice cristalline. Les défauts ponctuels peuvent par exemple être des atomes d'impuretés, des lacunes ou des interstitiels. Ces défauts sont susceptibles de s'associer pour former des défauts ponctuels complexes, paires de lacunes.

Le rendement du silicium dépend principalement de ces défauts qui surgissent lors de l'élaboration du silicium par les différents procédés. Plusieurs types de procédés sont utilisés pour la cristallisation du silicium qui est catégorisés selon le produit final obtenu après élaboration.

Conclusion

Le dopage est l'étape la très importante pour l'amélioration de la conductivité et sur les propriétés électriques de silicium

La cellule photovoltaïque basée sur la jonction PN une excitation lumineuse crée, aux alentours de la jonction, des paires électron-trou qui se déplacent sous l'influence du champ électrique de la jonction.

Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

Chapitre III : Résultats et interprétation de la simulation

CHAPITRE III : Résultats et interprétation de la simulation

III. Introduction

La simulation numérique est devenue un élément indispensable dans les domaines des sciences et de l'ingénierie. Elle permet de comprendre et de modéliser le fonctionnement des systèmes réels. Aujourd'hui une large gamme d'outils numériques est disponible. Elle repose sur la mise en œuvre des modèles théoriques utilisant différents outils mathématiques dont la technique des éléments finis. La simulation numérique permet d'étudier le fonctionnement et les propriétés d'un système modélisé ainsi qu'à en prédire son évolution. Il est très intéressant d'avoir un environnement de simulation qui inclut la possibilité d'ajouter différents phénomènes physiques au modèle étudié. C'est dans cette philosophie la que COMSOL MULTIPHYSICS a été développé.

III.1. Présentation du logiciel COMSOL MULTIPHYSICS

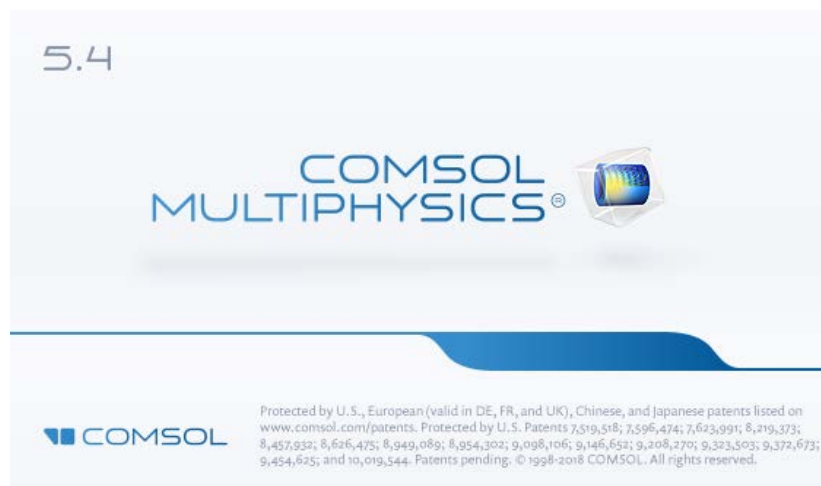


Figure 32: La version COMSOL 5.4.

COMSOL MULTIPHYSICS est une plate-forme de simulation qui englobe toutes les étapes de simulation qui englobe toutes les étapes du flux de travail de modélisation de la définition des géométries, des propriétés des matériaux et de la physique qui décrivent des phénomènes spécifiques à la résolution et au post traitement de modèles pour produire des résultats précis et fiables [32].

Pour créer des modèles à utiliser dans des domaines d'application spécialisés ou des domaines ingénierie, vous pouvez compléter COMSOL MULTIPHYSICS

CHAPITRE III : Résultats et interprétation de la simulation

avec n'importe quelle combinaison de module complémentaire de la suite de produit. Les produits d'interfaçage permettent également d'intégrer la simulation avec d'autres logiciels d'ingénierie et mathématiques utilisés dans la conception de produits et de processus. Lorsque vous avez développé un modèle, vous pouvez même le convertir en une application de simulation avec une interface utilisateur dédiée, qui peut être conçue pour une utilisation très spécifique par des personnes extérieures au service R et D.

L'arborescence du modèle, dans le constructeur du modèle, offre un aperçu complet du modèle et permet d'accéder à toutes les fonctionnalités (géométrie, maillage, paramètres physiques) [32].

III.1.1. Les avantages

Touche plusieurs domaines (électronique, électrotechnique, Médecine...)

- Etude 0D, 1D, 2D, 3D.
- Programmation directe.
- Utilise une interface graphique.

III.1.2. Les inconvénients

- Il manque de certaines fonctions utiles comme le dérivé...etc.
- Nécessité de disposer d'un ordinateur puissant et performant (carte graphique, espace RAM...)[32].

III.2. Description de l'interface COMSOL

Le Bureau COMSOL aide à organiser notre simulation en présentant un clair aperçu au modèle à tout moment. Il utilise la forme fonctionnelle, la structure et l'esthétique comme le moyen d'atteindre la simplicité pour la modélisation des réalités complexes.

Par exemple, des outils spécifiques à la tâche apparaissent sur le bureau à droite quand nous en avons besoin, montrant seulement ce qui est actuellement possible, ce qui élimine l'incertitude de la construction de modèles et apporte un certain ordre à notre simulation.

Le bureau est composé de plusieurs fenêtres, ce qui peut ou ne peut pas être affiché en fonction des besoins. Ces fenêtres comprennent le constructeur du modèle, Paramètres, graphiques, messages, Progrès, Aide et d'autres [32].

CHAPITRE III : Résultats et interprétation de la simulation

III.3. Description des différentes étapes de simulation

Lors du lancement de COMSOL, l'assistant Modèle (Model Wizard) permet de définir toutes les étapes de la modélisation. Ces étapes sont les suivantes[32].

Etape 1 : Mettre en place un environnement du modèle

COMSOL MULTIPHYSICS propose des outils de modélisation géométrique en 1D, 2D et 3D, à partir d'un moteur géométrique COMSOL natif. Différentes primitives sont disponibles et il est également possible d'extruder des objets géométriques 2D en 3D. De plus, une révolution ou une extrusion peut être appliquée aux objets en 2D le long de courbes paramétrées. Les opérations booléennes (union, différence ou intersection par exemple) permettent de créer des formes plus complexes impliquant des ensembles de solides, de surfaces, de courbes et de points. Les fonctions de modélisation à main levée font appel aux surfaces et aux courbes paramétrées, ainsi qu'aux courbes interpolées. Les opérations géométriques sont toujours organisées selon une séquence dans l'arborescence du modèle.



Figure 33: Fenêtre Description des dimensions.

Etape 2 : La fenêtre « Ajouter des physiques »

Cette fenêtre nous permet de choisir le domaine physique étudié en défilant le menu « Ajouter une physique » puis cliquer sur ➡.

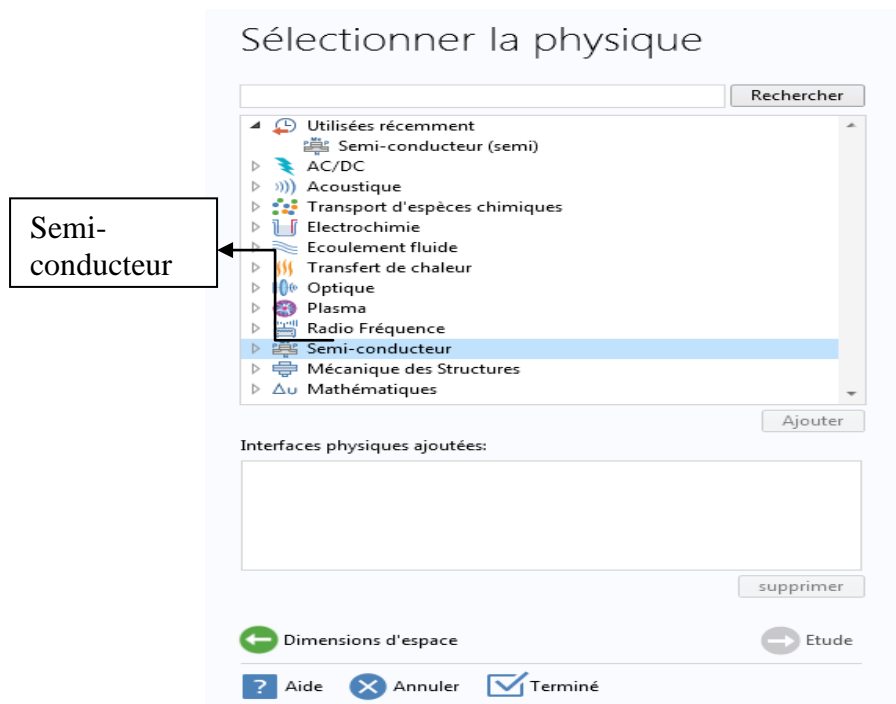
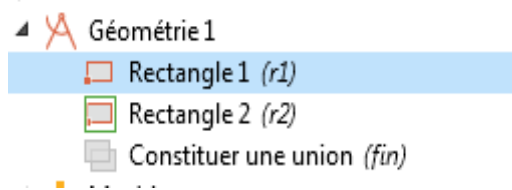


Figure 34: Fenêtre de domaine étudiant.

Etape 3 : La fenêtre « Géométrie »

Cette fenêtre permet de tracer la structure étudiée en se basant sur ses dimensions déclarées. Avec un clic droit pour ajouter une fonctionnalité nous permettant de choisir des formes différentes (Le rectangle dans notre cas).



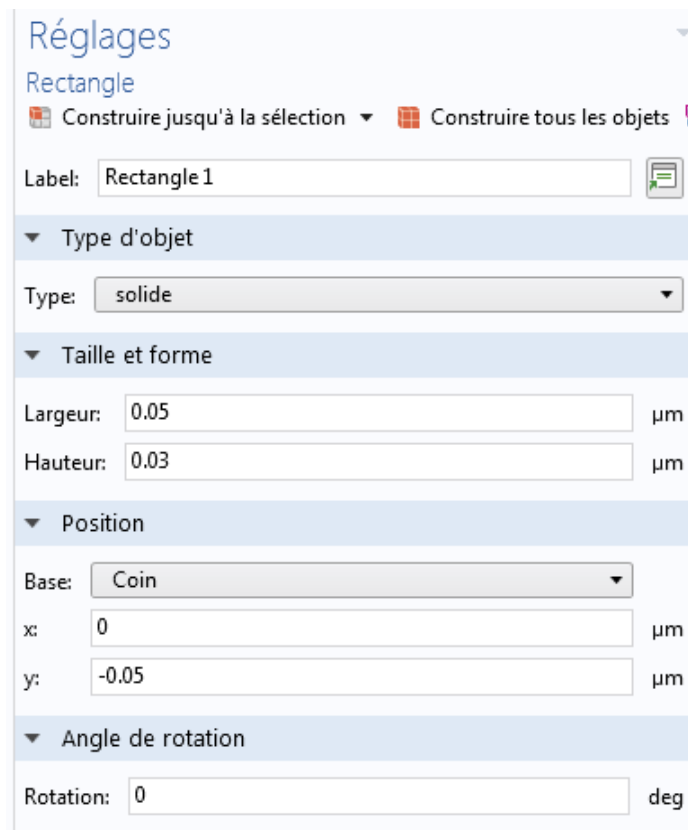


Figure 35 : La structure réalisée.

La fenêtre graphique présente une vue graphique de la géométrie, maillage, et les résultats du modèle. Elle a des outils utiles pour changer la vue et la sélection de plusieurs objets lors de la création de la géométrie ainsi que des domaines, des limites, des arêtes et des points pour la définition de la physique ou de la sélection des entités géométriques pour affiner le maillage ou l'évaluation des quantités en une certaine partie du modèle.

La barre d'outils graphique en haut de la fenêtre Graphique contient un ensemble d'outils pour changer la visualisation (par exemple, pour faire un zoom avant ou arrière ou pour ajouter de la transparence et faire des sélections.....).

CHAPITRE III : Résultats et interprétation de la simulation

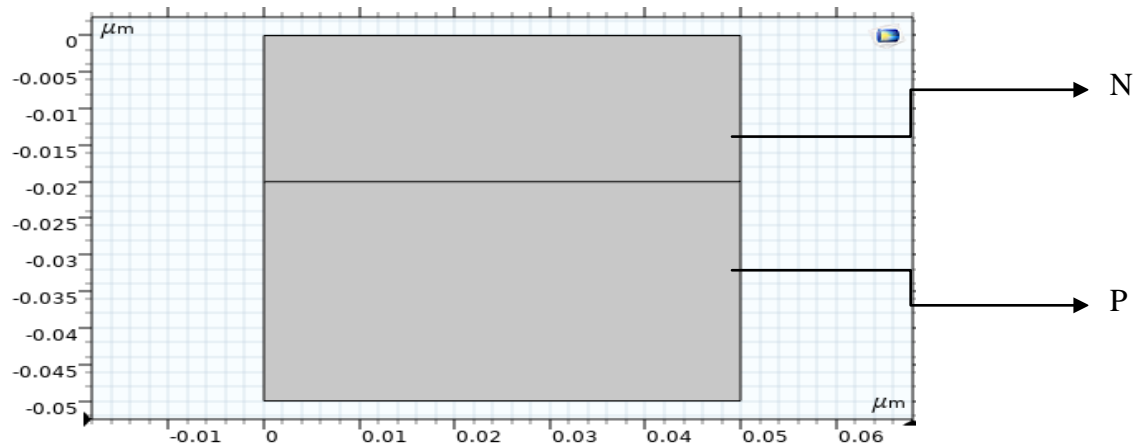
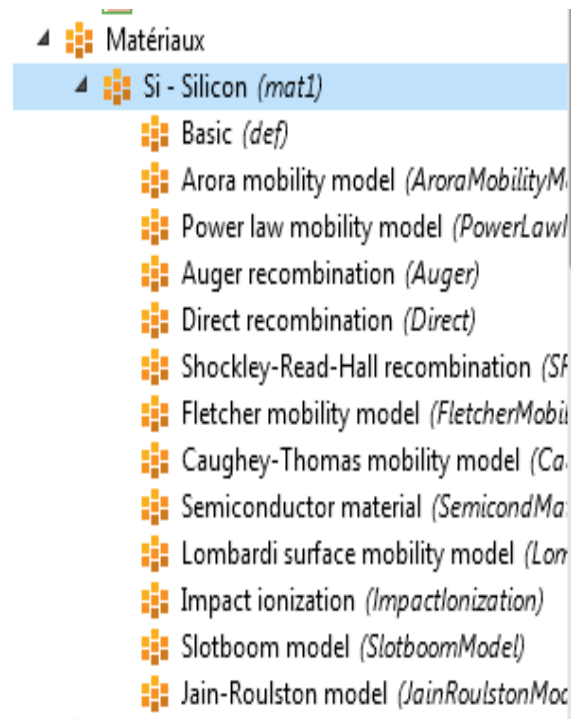


Figure 36: la Fenêtre graphique.

Etape 4 : La fenêtre « Matériel »

Ce menu nous permet de choisir le matériau voulu et l'introduire dans les différentes régions de la structure. Le logiciel est muni d'une bibliothèque des matériaux existants déjà et il nous donne la possibilité de rajouter d'autres matériaux de notre choix.



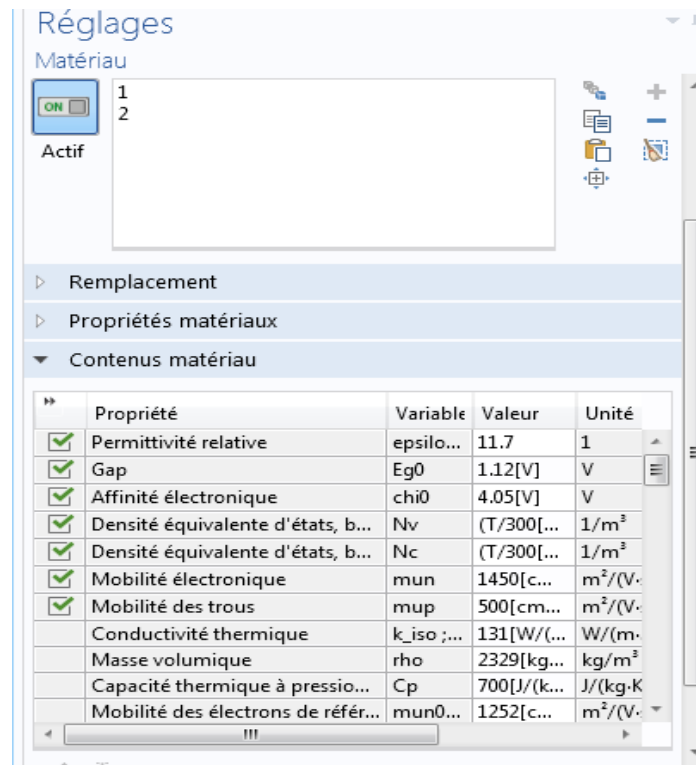


Figure 37: Fenêtre du type matériaux.

Etape 5: La fenêtre « Contacts »

Sous ce menu, on définit l'emplacement et la nature des différents contacts de la structure étudiée.

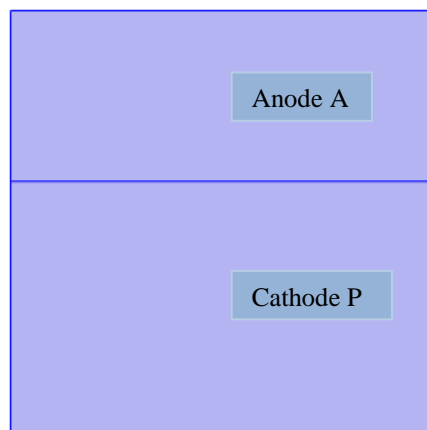


Figure 38: Fenêtre de contacts.

Etape 6 : La fenêtre « Maillage »

CHAPITRE III : Résultats et interprétation de la simulation

La fenêtre de maillage possède toutes les caractéristiques qui définissent une séquence de maillage. Faites un clic droit pour ajouter une fonctionnalité ou pour construire maille des éléments que vous utiliserez pour réaliser le maillage[32].

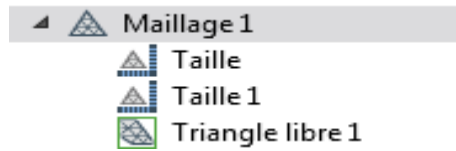


Figure 39: Fenêtre de réalisation maillage.

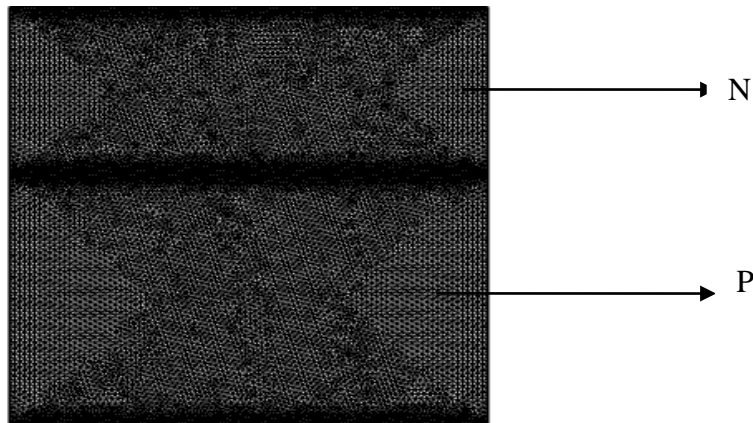


Figure 40: Fenêtre d'une partie de la cellule.

Etape 7: La fenêtre « étude »

Avec un clic droit sur ce menu, la fonctionnalité « Comput » s'affiche et nous permet de lancer la simulation qui consiste à résoudre les équations propres au modèle : Poisson et continuité des porteurs dans notre cas.

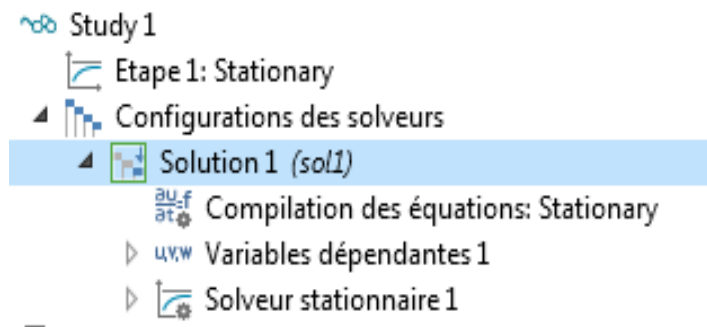


Figure 41: Fenêtre de type d'étude.

CHAPITRE III : Résultats et interprétation de la simulation

Étape 8 : La fenêtre « Résultats »

Sous ce menu, on trouve les résultats de simulation qui sont les concentrations des porteurs (N), (P) et le potentiel électrostatique en chaque point du maillage.

Nous pouvons par la suite exploiter ces résultats pour tracer toutes les grandeurs voulues.

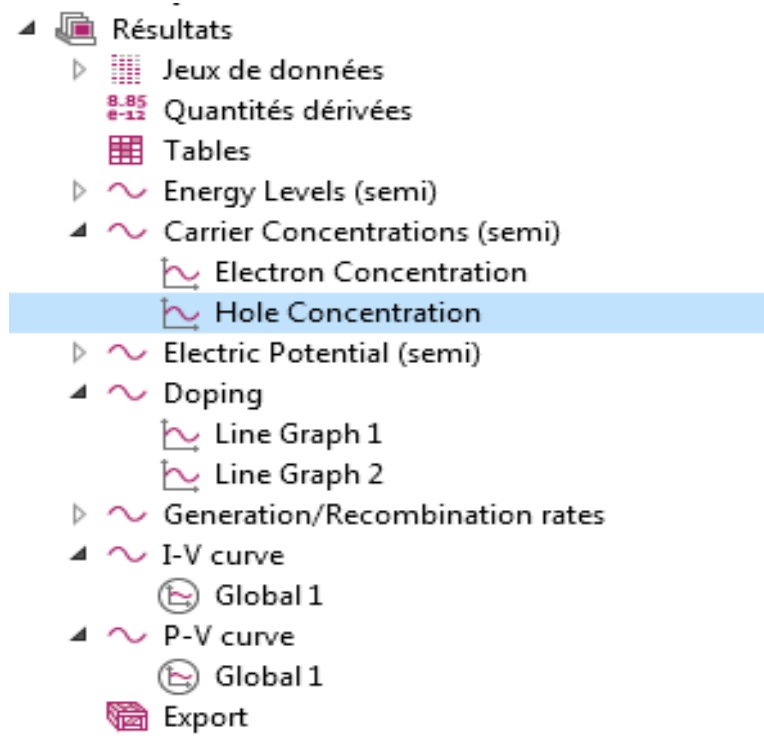


Figure 42: Fenêtre de type résultats.

III.4. Résultats et interprétation

III.4. 1 Influence du type du matériau sur la caractéristique I(V)

Pour l'absorption de la lumière, une caractéristique importante du matériau est son gap c'est l'écart entre le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction d'un matériau.

Lorsque l'énergie du photon est inférieure à celle du gap du matériau, la transition n'est pas possible et le photon n'est pas absorbé. L'interaction photon semi-conducteur, dans le cas d'un photon suffisamment énergétique $h\nu > E_g$, se traduit par la génération d'un pair électron trou qui modifie localement la conductivité du matériau.

CHAPITRE III : Résultats et interprétation de la simulation

Nous avons simulé les I(V) pour quatre matériaux de gap différent silicium (Si), (INP) phosphore d'indium, Arsénique de Gallium (GaAs) et Germanium (Ge) et en considérant un rayonnement de même longueur d'onde $\lambda = 0.33\mu m$.

III.4.a.Silicium(Si)

- paramètres de Siliciumutilisés

»	Propriété	Variable	Valeur	Unité
<input checked="" type="checkbox"/>	Permittivité relative	epsilo...	11.7	1
<input checked="" type="checkbox"/>	Durée de vie des électrons, SRH	taun	10[us]	s
<input checked="" type="checkbox"/>	Durée de vie des trous, SRH	taup	10[us]	s
<input checked="" type="checkbox"/>	Gap	Eg0	1.12[V]	V
<input checked="" type="checkbox"/>	Affinité électronique	chi0	4.05[V]	V
<input checked="" type="checkbox"/>	Densité équivalente d'états, b...	Nv	(T/300[...	1/m ³
<input checked="" type="checkbox"/>	Densité équivalente d'états, b...	Nc	(T/300[...	1/m ³
<input checked="" type="checkbox"/>	Mobilité électronique	mun	1450[c...	m ² /V·
<input checked="" type="checkbox"/>	Mobilité des trous	mup	500[cm...	m ² /V·
	Conductivité thermique	k_iso ;...	131[W/(...	W/(m·
	Masse volumique	rho	2329[kq...	kq/m ³

La figure 43 illustrée en dessousreprésente la caractéristique du courant en fonction de la tension électrique $I = f(V_0)$ d'une cellule au Silicium , nous voyons clairement que pour les tensions inferieurs à $V_0 =0,5V$ de tension de seuil de la diode, la cellule fournie sensiblement toujours le même courant $I_{cc} = 34, 1mA$ dans le point maximale ($V_0=0$) .mais une fois que la tension de polarisation de la diode dépasse la tension de seuil , le courant diminue fortement jusqu'à la valeur nulle pour $V_0 =0,56V$.

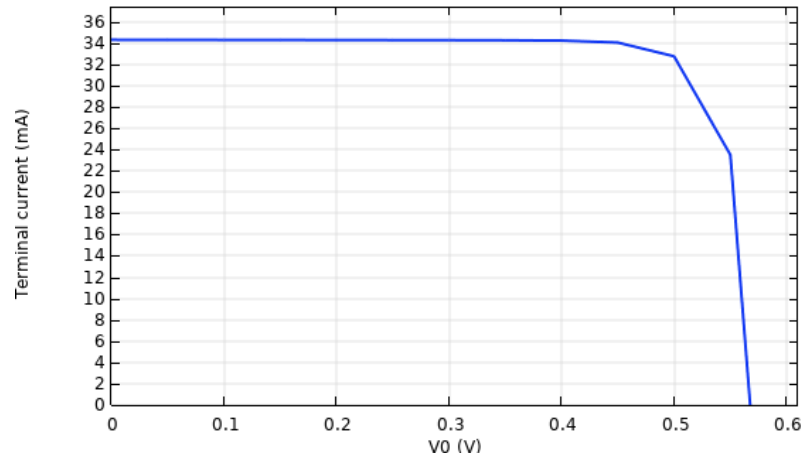


Figure 43 : Caractéristique courant -tension d'une cellule au Si.

Nous avons donc réussi à réunir tous les grandeurs nécessaires de la cellule utilisée dans la simulation :

- La tension de circuit ouvert : $V_0=0,56V$
- Le courant de court-circuit : $I_{cc}=35mA$
- La puissance maximale fournie par la cellule : $P_{max}=0,0170W$
- Courant au court-circuit : $I_{max}=34,1 mA$
- Courant maximale : $V_{max}=0,5 V$
- Le facteur de forme : $FF = \frac{V_m \times I_m}{V_{c0} \times I_{cc}} = 0,892$

III.4.b. INP (phosphord'indium)

CHAPITRE III : Résultats et interprétation de la simulation

- paramètres d'INP utilisé

Propriété	Variable	Valeur	Unité
✓ Durée de vie des électrons, SRH	taun	0.01[us]	s
✓ Durée de vie des trous, SRH	taup	0.01[us]	s
✓ Permittivité relative	epsilo...	12.5	1
✓ Gap	Eg0	1.344[V]	V
✓ Affinité électronique	chi0	4.38[V]	V
✓ Densité équivalente d'états, b...	Nv	(T/1[K])...	1/m ³
✓ Densité équivalente d'états, b...	Nc	(T/1[K])...	1/m ³
✓ Mobilité électronique	mun	5400[c...	m ² /(V.s)
✓ Mobilité des trous	mup	200[cm...	m ² /(V.s)
Conductivité thermique	k_iso ;...	68[W/(...	W/(m...
Masse volumique	rho	4810[kq...	kg/m ³

Le figure 44 représente la caractéristique $I = f(V_0)$ d'une cellule au INP, on remarque que la cellule garde les mêmes caractéristiques que celle du silicium, le courant est relativement stable ($I_{cc} = 21,9$ mA) jusqu'au point de tension 0,5V où il diminue, après il chute brusquement jusqu'à la valeur nulle pour $V_0=0,56$ V.

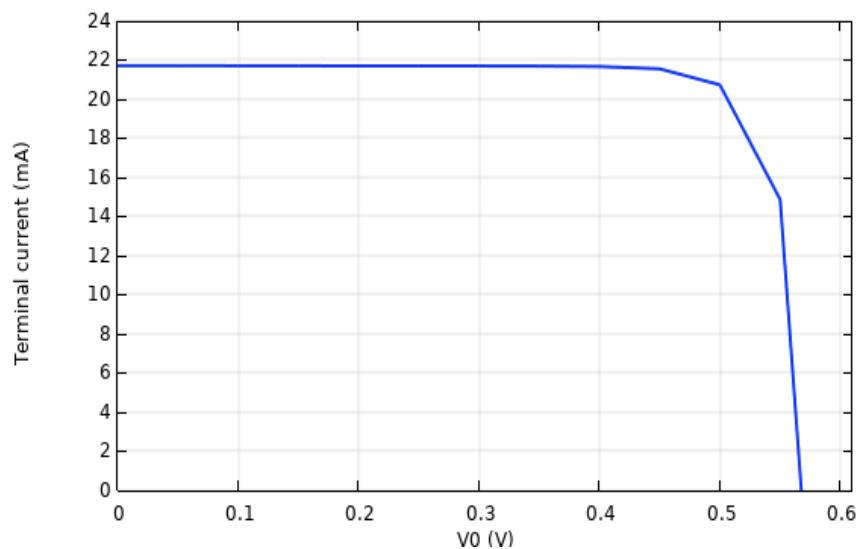


Figure 44: Caractéristique courant-tension d'une cellule à l'INP.

Nous avons donc réussi à réunir tous les grandeurs nécessaires de la cellule utilisée dans la simulation :

- La tension de circuit ouvert : $V_0=0,56$ V

CHAPITRE III : Résultats et interprétation de la simulation

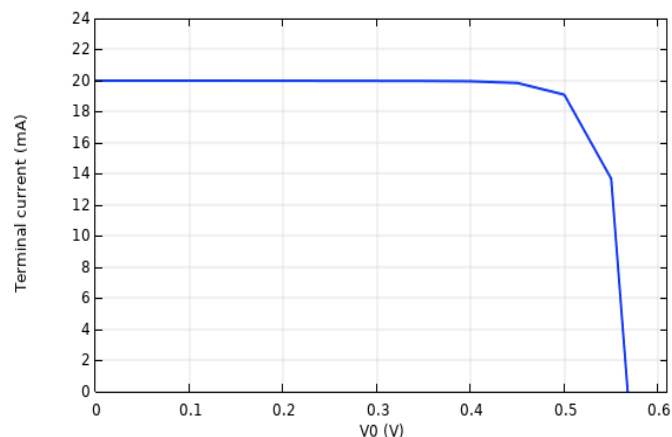
- Le courant de court-circuit : $I_{cc}=21,9$ mA
- La puissance maximale fournie par la cellule : $P_{max}=0,0107$ W
- Courant au court-circuit : $I_{max}=21,4$ mA
- Courant maximale : $V_{max}=0,5$ V
- Le facteur de forme : $FF = \frac{V_m \times I_m}{V_{c0} \times I_{cc}} = 0,872$

III.4.c.Arséniquede Gallium (GaAs)

- Paramètres de GaAs utilisé

»	Propriété	Variable	Valeur	Unité
✓	Affinité électronique	chi0	4.07[V]	V
✓	Densité équivalente d'états, b...	Nv	(T/1[K])...	1/m ³
✓	Densité équivalente d'états, b...	Nc	(8.63e13...	1/m ³
✓	Mobilité électronique	mun	8500[c...	m ² /(V·s)
✓	Mobilité des trous	mup	400[cm...	m ² /(V·s)
✓	Durée de vie des électrons, SRH	taun	0.01[us]	s
✓	Durée de vie des trous, SRH	taup	0.01[us]	s
	Capacité thermique à pressio...	Cp	330[J/(k...	J/(kg·K)
	Masse volumique	rho	5500[kg...	kg/m ³
	Conductivité thermique	k_iso ; ...	46[W/(...	W/(m·...
	Coefficient de Jain-Roulston (...)	An_jr	16.5e-9[V]	V

A travers la figure 45 nous observons que le courant de la cellule GaAs se trouve dans le point maximale $I_{cc}= 20$ mA à $V_0=0$. Le courant est relativement stable jusqu'au point de tension 0,5V où il chute fortement jusqu'à la valeur nulle pour $V_0=0,56$ V.



CHAPITRE III : Résultats et interprétation de la simulation

Figure 45: Caractéristique courant -tension d'une cellule de GaAs.

Nous avons donc réussi à réunir tous les grandeurs nécessaires de la cellule utilisée dans la simulation:

- La tension de circuit ouvert : $V_0=0,56V$
- Le courant de court-circuit : $I_{cc}=20mA$
- La puissance maximale fournie par la cellule : $P_{max}=0,0099W$
- Courant au court-circuit : $I_{max}=19,8 mA$
- Courant maximale : $V_{max}=0,5V$
- Le facteur de forme : $FF = \frac{V_m \times I_m}{V_{c0} \times I_{cc}} = 0,883$

III.4.d. Germanium (Ge)

- paramètres de Ge utilisé

»	Propriété	Variable	Valeur	Unité
<input checked="" type="checkbox"/>	Permittivité relative	epsilo...	16	1
<input checked="" type="checkbox"/>	Durée de vie des électrons, SRH	taun	50[us]	s
<input checked="" type="checkbox"/>	Durée de vie des trous, SRH	taup	50[us]	s
<input checked="" type="checkbox"/>	Gap	Eg0	0.7[V]	V
<input checked="" type="checkbox"/>	Affinité électronique	chi0	1.23[V]	V
<input checked="" type="checkbox"/>	Densité équivalente d'états, b...	Nv	(T/300[...	1/m ³
<input checked="" type="checkbox"/>	Densité équivalente d'états, b...	Nc	(T/300[...	1/m ³
<input checked="" type="checkbox"/>	Mobilité électronique	mun	3900[c...	m ² /(V·s)
<input checked="" type="checkbox"/>	Mobilité des trous	mup	1900[c...	m ² /(V·s)
	Conductivité thermique	k_iso ;...	131[W/(...	W/(m·...
	Masse volumique	rho	2329[kq...	kq/m ³

Le comportement de la cellule Germanium pour la caractéristique est représenté dans la figure 46, nous constatons que la cellule garde les mêmes caractéristiques que celle des autres matériaux, le courant $I_{cc}=16,5 mA$ et $V_0=0$ il reste stable jusqu'au seuil 0,5V de tension où il décroît et disparaît à 0,56V.

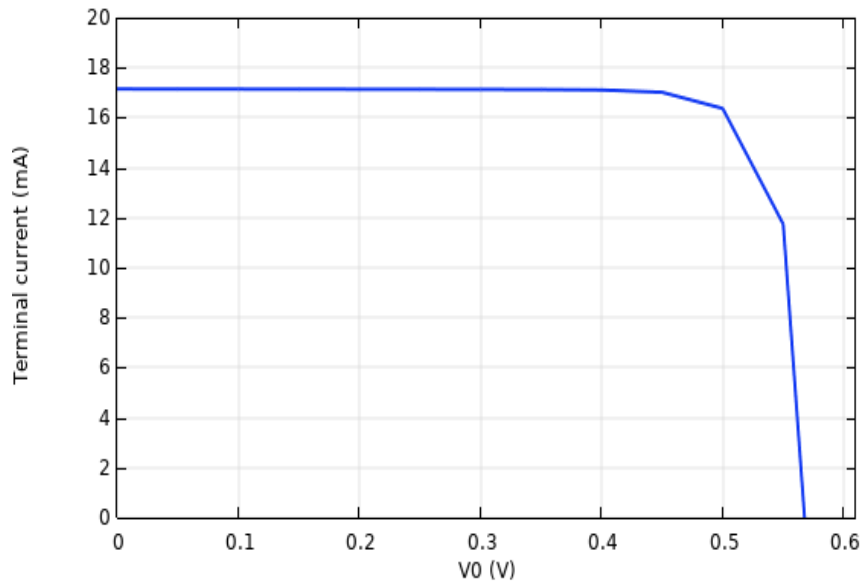
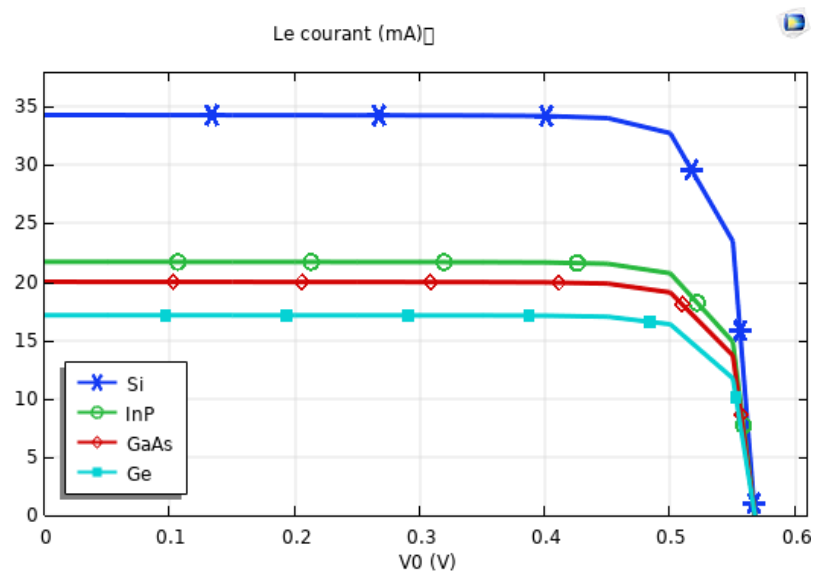


Figure 46 : Caractéristique courant -tension d'une cellule de Ge.

Nous avons donc réussi à réunir tous les grandeurs nécessaires de la cellule utilisée dans la simulation :

- La tension de circuit ouvert : $V_0=0,56V$
- Le courant de court-circuit : $I_{cc}=17mA$
- La puissance maximale fournie par la cellule : $P_{max}=0,0081W$
- Courant au court-circuit : $I_{max}=16,2 mA$
- Courant maximale : $V_{max}=0,5 V$
- Le facteur de forme : $FF = \frac{V_m \times I_m}{V_{c0} \times I_{cc}} = 0,850$



CHAPITRE III : Résultats et interprétation de la simulation

Figure 47 : Caractéristiques courant-tension pour les quatre matériaux.

Nous avons collecté les courbes précédentes pour les différentes cellules (Si, INP, GaAs, Ge) dans la figure 47. Le courant de court-circuit (I_{cc}) est compris entre 17 mA et 34,1 mA varie principalement selon les technologies et les caractéristiques de cellules.

- Le (GaAs) et le (INP) possèdent des propriétés électroniques qui sont supérieures à celle de silicium, la vitesse de saturation des électrons est plus élevée et leur mobilité est plus grande, et dans le fait qu'ils présentent un gap d'énergie direct, ce qui signifie qu'il peut être utilisé pour émettre de la lumière de façon efficace.
- Le (Ge) a la plus faible énergie de gap et le plus grand coefficient d'absorption et malgré cela, il fournit le plus faible photocourant sachant qu'il a le plus grand coefficient de réflexion ce qui limite la quantité de lumière qui peut pénétrer au matériau.
- Le (Si) est le meilleur matériau, fournissant le meilleur courant et une puissance maximale.

III.4.2 Influence du type du matériau sur la caractéristique P(V)

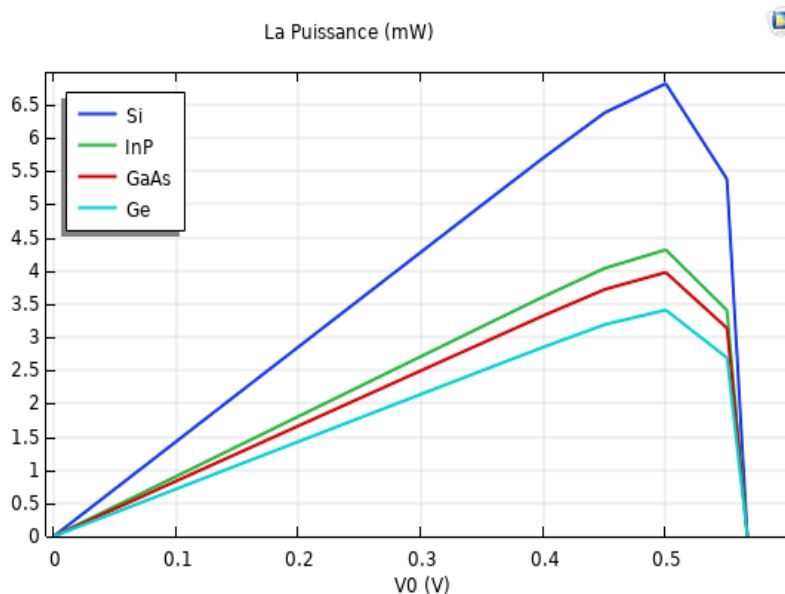


Figure 48: caractéristiques puissance-tension pour les quatre matériaux.

CHAPITRE III : Résultats et interprétation de la simulation

La Figure 48 présente les caractéristiques de la puissance en fonction de courant pour les différentes cellules. Nous constatons une évolution de la courbe avec l'augmentation de la tension en circuit ouvert (V_0), le maximum est atteint à $V_0=0.5$ puis la puissance décroît et disparaît à 0,56V.

III.4.3. Influence de la longueur d'onde sur la caractéristique I(V)

Les photons du rayonnement solaire sont munis d'une énergie inversement proportionnelle à la longueur d'onde, elle est donnée par l'expression :

$$E_{ph} = h \cdot \nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (\text{III.1})$$

L'énergie des photons du rayonnement solaire qui sont munis d'une énergie inversement proportionnelle à la longueur d'onde si cette énergie est supérieure à l'énergie de gap du semi-conducteur, ces photons sont absorbés par certains électrons de valence pour passer à la bande de conduction en créant ainsi des paires (e^- , e^+). Ces électrons libres, photo-générés donnent naissance à la photo courant de la cellule.

Donc il est logique que plus le rayonnement de longueur d'onde petite, son énergie est de ce fait importante et plus la photo courant produit n'est plus important.

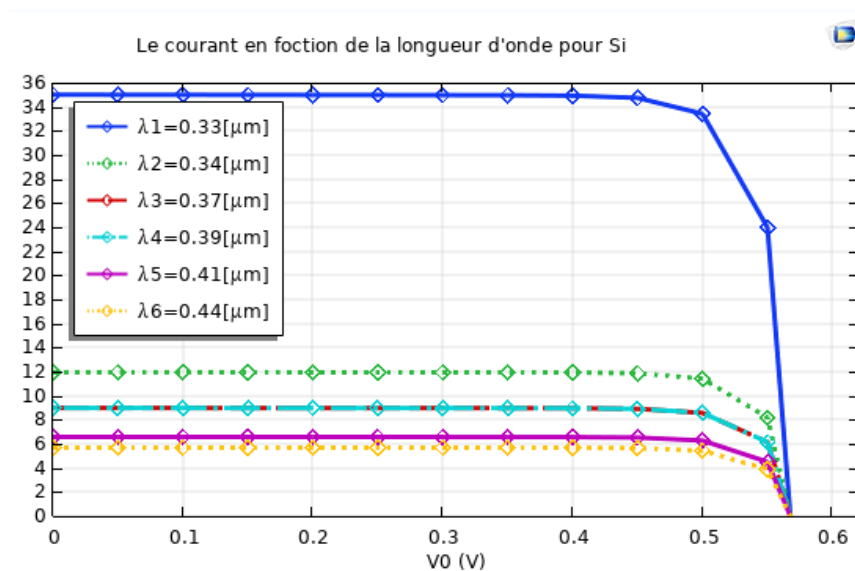


Figure 49: Caractéristiques I(V) d'une cellule au Silicium avec la variation de la longueur d'onde.

La variation du courant en fonction de la longueur d'onde pour Si donnée par la figure 49 l'avancement remarquable de la courbe I(V) pour $\lambda=0.33\mu\text{m}$ est dû à la

CHAPITRE III : Résultats et interprétation de la simulation

valeur élevée du coefficient d'absorption pour cette longueur d'onde comme le montre le tableau 4. Nous remarquons que l'accroissement de la longueur d'onde provoque une diminution proportionnelle à la photo courant. Donc il est logique d'après la relation $E_{ph} = h \frac{c}{\lambda}$ que plus le rayonnement de longueur d'onde petite, son énergie est de ce fait importante et plus la photo courant produit est élevé.

- **Tableau 4: Variation de la longueur d'onde avec le coefficient d'absorption :**

Silicium (Si)	
λ [μm]	α [cm^{-1}]
0.33	1225×10^3
0.34	1089×10^3
0.37	932×10^3
0.39	204×10^3
0,41	81.7×10^3
0.44	46.2×10^3

Dans la figure 50 on remarque que l'accroissement de la longueur d'onde conduite à la diminution de la puissance maximale fournie par la cellule Si. Finalement on a déduire que l'influence de la longueur d'onde est plus réduit par rapport à l'influence de l'éclairement sur la puissance maximale disponible par la cellule.

Le (Si) est le meilleur matériau, fournissant le meilleur courant et une puissance maximale. Le (Ge) a la plus faible énergie de gap et le plus grand coefficient d'absorption, le (GaAs) et le (INP) possèdent des propriétés électronique supérieure à celle de silicium malgré cela, ils fournissent la plus faible photo courant.

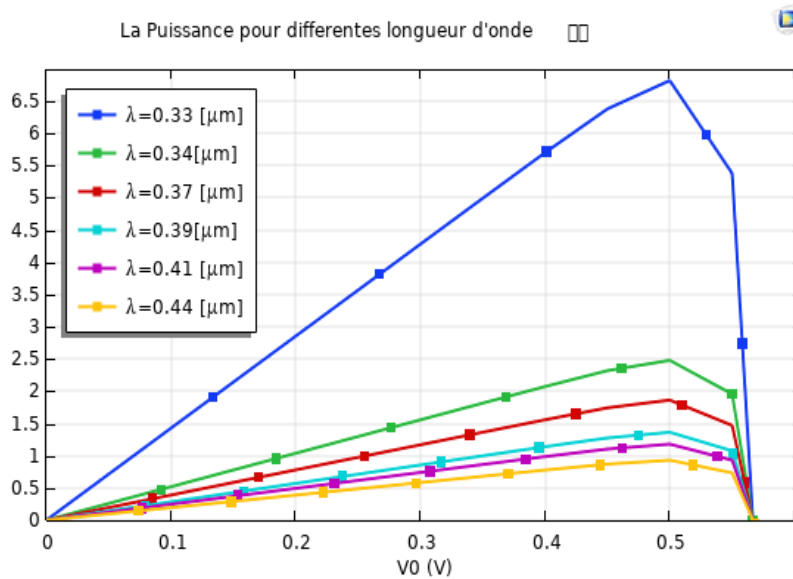
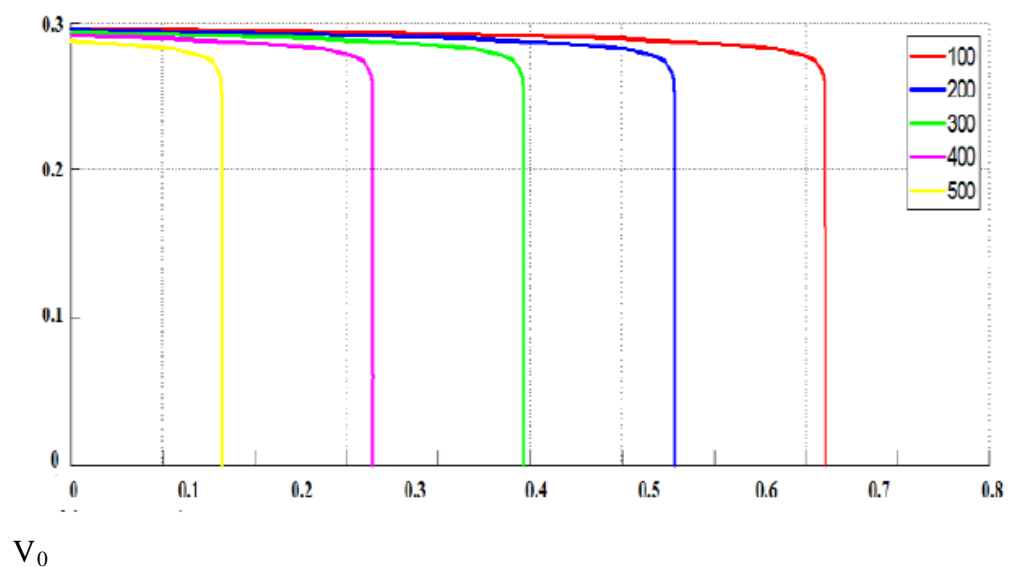


Figure 50: Caractéristiques P(V) d'une cellule au Silicium avec la variation de la longueur d'onde.

III.4.4. Influence de la température sur la caractéristique I(V)

La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques parce que les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont très sensibles à la température, On a varié la température entre (100 k) et (500 k) et on fixe l'éclairement ($G=1000 \text{ W/m}^2$) La Figure 51 représente les résultats qui traduisent la variation de caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque pour différentes températures. À un éclairement constant égal à $1000 \text{ [W/m}^2]$.

Le courant pour différentes température



CHAPITRE III : Résultats et interprétation de la simulation

Figure 51 : La Caractéristiques I(V) d'une cellule au Silicium avec la variation de la température.

Nous constatons que l'augmentation de la température provoque une diminution de la tension en circuit ouvert V_0 , par contre le courant de court-circuit I_{cc} reste quasiment identique. D'autre part, l'accroissement de la température conduit à la diminution de la puissance maximale fournie par la cellule PV. Finalement on a déduit que l'influence de la température est plus réduite par rapport à l'influence de l'éclairement sur la puissance maximale disponible par la cellule PV.

Le (Si) est le meilleur matériau, fournissant le meilleur courant et une puissance maximale. Le (Ge) a la plus faible énergie de gap et le plus grand coefficient d'absorption, le (GaAs) et le (INP) possèdent des propriétés électroniques supérieures à celle de silicium malgré cela, ils fournissent la plus faible photo courant.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation réalisés par logiciel COMSOL. Nous avons simulé les caractéristiques (I (V) et P(V)) de chaque matériau utilisé avec la variation des paramètres qui affectent sur l'efficacité de la cellule.

CONCLUSION GENERALE

L'étude et l'amélioration des cellules photovoltaïques est un sujet d'actualité puisqu'elles constituent une solution d'avenir pour la production d'électricité. La connaissance des phénomènes physiques, la sélection de matériaux nouveaux ainsi que l'amélioration des procédés technologiques de leur fabrication constituent les trois principaux axes de recherche dans ce domaine.

Quel que soit la structure d'une cellule solaire, une optimisation de ses paramètres est nécessaire pour avoir un bon rendement. Généralement, les paramètres qui servent à optimiser sont l'épaisseur de la cellule, les niveaux et les profils de dopage, et le confinement optique. Les valeurs des paramètres optimaux dépendent, bien sûr, de la structure de la cellule solaire, de la qualité du matériau, du substrat (duré de vie, mobilité, affinité électronique), de la vitesse de recombinaison en surface faces et arrière, etc....

Dans cette étude, nous avons fait la simulation à l'aide du logiciel COMSOL MULTIPHYSICS. Le but est de faire la comparaison entre les matériaux Si, InP, GaAs, et Ge en étudiant les caractéristiques ($I(V)$ et $P(V)$) sous l'éclairement. A partir de cette simulation nous pouvons extraire les paramètres de sortie de chaque cellule (la densité de courant du court-circuit (I_{cc}), la tension du circuit ouvert (V_{c0}), le facteur de forme (FF), la puissance maximale (de conversion photovoltaïque (P_{max})) ainsi que le rendement η .

Nous avons remarqué que le comportement de ces cellules face au changement de température et de la longueur d'onde réside en croissance du I_{cc} en fonction de l'augmentation de ces dernières.

Le silicium dans le photovoltaïque reste le matériau le plus utilisé dans les applications, car il a une plus grande durabilité et une plus grande efficacité que les autres photovoltaïques.

Pour sélectionner un matériau semi-conducteur pour fabriquer des cellules solaires, il faut non seulement prendre en compte la valeur du gap du matériau (un gap inférieur à l'énergie incidente) mais également le coût du procédé de fabrication de la cellule puis du module photovoltaïque.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. LABOURET, M. VILLOZ « énergie solaire photovoltaïque » le manuel du Professionnel, édition Dunod, Paris, 2003.
- [2] S. Quozola, Epitaxie en phase valeur de silicium sur silicium monocristallin pour report sur Substrats économiques et application photovoltaïque bas coût, Thèse de doctorat, Ecole Doctorale : Electronique, Electrotechnique et Automatisme, L'institut National des Sciences appliquées de Lyon, N d'ordre : (03ISAL0078) 2003.
- [3] Charles Chauliaguët, Pierre Baratsabal et Jean-Pierre Batellier, "L'énergie solaire dans le bâtiment", 01/01/1977.
- [4] A. Labouret and M. Viloz, "Energie solaire photovoltaïque", 4ème édition, 7 octobre 2009.
- [5] <https://energie-renouvelable-maroc.blogspot.com/>
- [6] https://energyeducation.ca/Encyclopedie_Energie/index.php/Technologie_de_conversion_d%27%C3%A9nergie
- [7] <https://www.connaissancesdesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-thermodynamique-concentration>.
- [8] https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire_thermique.
- [9] https://energyeducation.ca/encyclopedia/Solar_chimney
- [10] https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_solaire_photovolta%C3%AFque
- [11] R. Amina, Z. Aldjia, "Etude et modélisation du procédé d'élaboration du silicium polycristallin pour la fabrication des cellules photovoltaïques", mémoire de master, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2019.
- [12] AMARDJIA ADNANI Hania, ALGERIE énergie solaire et hydrogène, développement durable, pages 113, 114, 115
- [13] Camara Mohamed Anoumane, "modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par super condensateurs", thèse de doctorat, université de paris, 2011.
- [14] A. Hanane, "la stratégie d'implantation des énergies renouvelables en Algérie cas de la photovoltaïque", thèse de magister, université d'Oran-2-mohamed ben Ahmed, 2015
- [15] www.udes.dz
- [16] <https://www.rouibaclairage.com/spip.php?article50>
- [17] https://www.ares-solaire.com/wa_files/presentation_AS20171.pdf
- [18] <https://www.condor.dz/fr/actualites-inf/la-presse-3/107-condor-un-geant-algerien-de-la-high-tech-en-devenir>
- [19] https://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_photovolta%C3%AFque
- [20] <https://tenesol.fr/le-solaire-photovoltaique/histoire/>
- [21] https://www.photovoltaique.info/fr/info-ou-intox/lenergie-solaire/de-la-lumiere-a-lelectricite/#principe_de_l_effet_photovoltaique

BIBLIOGRAPHIE

- [22] MAKHLOUFI.S, "optimisation des installations photovoltaïque", 16 avril 2014.
- [23] <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/la-cellule-photovoltaique-comment-ca-marche>
- [24] R.Amina, Z. Aldjia, "Etude et modélisation du procédé d'élaboration du silicium poly cristallin pour la fabrication des cellules photovoltaïques", mémoire de master, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2019.
- [25] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Silicium>
- [26] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Semi-conducteur.html>
- [27] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Dopage-semi-conducteur-page-2.html>
- [28] TALEB. Sidi Med, " Etude du profil thermique d'un composant semi-conducteur : le transistor à effet de champ à semi-conducteur métal –oxyde (MOSFET) ", mémoire de master, UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCEN, 2017.
- [29] Ludovic Protin, Stephane Astier "Convertisseurs photovoltaïques", Traite Génie Electrique D 3360, Techniques de l'ingénieur.
- [30] A .Imane,B.Faiza,"Simulation de l'effet des paramètres climatiques (température, poussière et éclairement) sur le rendement d'une cellule solaire", mémoire de master,UNIVERCITE ABOU-BEKR BELKAID – TLEMCEN- 2019.
- [31] R.Amina, Z.Aldjia, "Etude et modélisation du procédé d'élaboration du silicium poly cristallin pour la fabrication des cellules photovoltaïques", mémoire de master, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2019.
- [32] BOULGHEB ABDELAZIZ, KROUM AMINE, Initiation à l'utilisation du logiciel de simulation COMSOL Application à la structure MOS, Mémoire présenté pour l'obtention du Diplôme de Master en Electronique, Université de JIJEL, Promotion 2015 / 2016.