

قرآزو مبلعلا لاعلا و ثحبلا ملعلا

BADJI MOKHTAR - ANNABA UNIVERSITY

ةعمآج بي جاب اتخم ر - اءءةب

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



Année 2010

Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département d'électrotechnique

MEMOIRE

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

THEME

MODELISATION D'UN SYSTEME DE PRODUCTION ELECTRIQUE PAR LA CELLULE PHOTOVOLTAIQUE

Option : réseaux électrique

Présenté par : Zerguine Bilal

Directeur de mémoire : **Dr. HOUABES Mourad M.C A** Université de Annaba

Devant le jury :

Président	:	Dr. Ouari Ahmed	M.C A	Université de Badji Mokhtar Annaba
Examineurs	:	Dr. Chenni Rachid	M.C A	Université de Mentouri Constantine
		Dr. Omeiri Amar	M.C A	Université de Badji Mokhtar Annaba
		Dr. Labar Houcine	M.C A	Université de Badji Mokhtar Annaba

Remerciements :

Je remercie premièrement le bon Dieu pour son bien fait.

J'adresse aussi et chaleureusement toute ma gratitude à mon respecté encadreur *Monsieur MOURAD HOUABES*, pour son aide et son précieux concours.

Mon vif remerciements vont aussi à mes parents qui nous ont donné la lumière et guidés et à tous mes professeurs qui m'ont orientés, assistés et aidés à concevoir ce mémoire ainsi qu'à tous ceux qui, durant ma vie scolaire et universitaire m'ont apporté leurs précieux conseils et m'ont permis d'être ce que je suis aujourd'hui.

Finalement je remercie l'université de Badji Mokhtar Annaba et le département de l'électrotechnique.

Dédicace :

JE DEDIE CE MODESTE TRAVAIL A :

MES PARENTS QUI MON SOUTENU TOUT AU LONG DU MON
PARCOURS ;

A MES SŒURS SARRA ET AMEL ;

SPECIALLEMENT A MA GRANDE MERE ;

A TOUTES LA FAMILLE,

A MON AMI BILEL, MOHAMED, ADEM, MOHMED AMINE,
KADER, PATO, HAMDIA CHENWA, TAREK, MEHDI, LOTFI,
SABRI AKCHICHE, HAMOUDA ET A TOUS LES AUTRES AMIS
QUI SON AU CŒUR ;

Résumé

Nous avons traités dans ce travail un sujet très intéressant et très touchant, nouveau dans le domaine électrotechnique. C'est l'énergie verte ou renouvelable, d'après notre recherche et notre découverte des différents types de production de l'énergie électrique par des ressources terrestres comme : le pétrole, Gaz, Uranium, etc...., nous avons trouvé que ces ressources sont de plus en plus éphémères et épuisables et il n'y a pas de remplacement sauf par l'énergie renouvelable.

L'énergie renouvelable consiste l'énergie éolienne et l'énergie hydraulique et enfin l'énergie solaire. En utilisant les panneaux solaires qui sont considérés dans l'avenir comme meilleure solution pour le consommateur de l'électricité et pour sécuriser la planète des produits toxiques qui résultent d'avoir la pollution.

Le silicium ou le Quartz est considéré comme la source essentielle dans cette construction (panneaux solaires). Après plusieurs étapes dans la fabrication on obtient un panneau solaire à utiliser, dans notre travail on a expliqué ces étapes et étudié les semi-conducteurs et leurs propriétés physiques et comment se passe le phénomène de la conversion lumineuse à l'intérieur de ces matières.

Finalement nous avons étudiés un type de module photovoltaïque qui s'appelle: BP SX 150S

Et le faire simuler à l'aide de MATLAB, en lui considérant comme un modèle à 4 paramètres et à partir de ce modèle nous avons obtenu des résultats, en analysant et traitant ces derniers pour connaître les critères de ces panneaux et l'influence de la température sur ces critères.

المخلص

تطرقنا في عملنا هذا إلى موضوع حساس حديث النشأة في مجال الكهروتقني ألا وهو الطاقة الخضراء أو المتجددة. فبعد بحثنا و معرفتنا لأساليب إنتاج الطاقة الكهربائية بواسطة موارد الأرض كالبترول الغاز و الأورانيوم وجدنا أن هذه الموارد ذاهبة إلى طور الزوال ولا بديل لها إلا الطاقة المتجددة

تتضمن الطاقة المتجددة الطاقة الهوائية و الطاقة المائية و أخيرا الطاقة الشمسية التي تطرقنا لها في عملنا هذا. حيث تعتبر اللوائح الشمسية الآن و في المستقبل الحل الأمثل للمستهلك و لسلامة الأرض من انبعاث الغازات السامة والتي تؤدي إلى تلوث البيئة.

يعتبر السيليسيوم أو الكوارتز مصدر أساسي في هذه الصناعة فبعد عدة مراحل في التصنيع يتم الحصول على لوح شمسي قابل للاستعمال. حيث قمنا بشرح هذه المراحل ودرس المواد النصف ناقلة للكهرباء و خصائصها الفيزيائية كيفية حدوث ظاهرة تحويل الضوء إلى كهرباء داخل هذه المواد.

و أخيرا قمنا بدرس نوع من الألواح الشمسية ألا وهو BP Solar BP SX 150S

و تجربته بواسطة **MATLAB** واتحدنا له نموذج تحصلنا من خلاله على نتائج قمنا بتحليلها ومعالجتها لمعرفة خصائص الألواح الشمسية و تأثير الحرارة على خصائصها.

Abstract

In this work we treat a very important and interesting subject, new in electrotechnic theory, it's the green energy. In our research and our discovery of the different types of producing the electrical energy by the earth resources such as: petrol, Gaz, Uranium, etc. so we found that those resources will gone time by time, so there's no replacement only by solar energy.

We have three green energy: wind energy, water energy and finally solar energy. So the PV cells are the best solution for the users and to protecting our planet from the toxic pollution.

The Silicium or Quartz the raw material in this construction (PV cells) after many operations in this construction we got a PV cell and it ready to be using.

In our research we explained those operations and we study the semi-conductor and theme physics proprieties and we know how this operation happened in those matters.

Finally we treated one type of solar PV cell it's named BP SX S150 and experiment it by MATLAB.

We got results from this model, so we calculated and analysed it to know those characteristics and how the heat affect those characteristics.

Table des matières

Introduction générale	1
I. Chapitre1 : L'ENERGIE RENEVELABLE ET LE SOLEIL	3
I.1. introduction	4
I.2. production de l'énergie électrique	5
I.2.1. Les centrales thermiques.....	5
I.2.1.1. Avantages.....	6
I.2.1.2Inconvénients	6
I.2.2. Les centrales nucléaires.....	7
I.2.1.1. Avantages.....	7
I.2.1.2. Inconvénients.....	7
I.2.3. Les centrales hydroélectriques.....	8
I.2.3.1 Les types de centrales hydrauliques	8
I.2.3.2. Avantages.....	9
I.2.3.3. Inconvénients.....	9
I.2.4. Les centrales éoliennes.....	9
I.2.4.1. Avantages.....	10
I.2.4.2. Inconvénients.....	10
I.2.5. Les centrales solaires ou photovoltaïques.....	10
I.2.5.1. Avantages.....	11
I.2.5.2. Inconvénients.....	11
I.3 L'énergie renouvelable	11
I.3.1 Les énergies renouvelables, c'est quoi ?.....	12
I.3.2 Quelle est la place des énergies renouvelables ?	12
I.3.3 l'énergie solaire.....	13
I.4 Le soleil	15
I.4.1 Caractéristiques générales.....	15
I.4.2 Son énergie : Energie « humainement » inépuisable	16
I.5 rappel astronomie	18
I.5.1 Équateur et méridien	18
1-L'équateur.....	18
2-Le méridien.....	18
3-La longitude.....	18
I.5.2 Azimut	18
I.5.3 Hauteur solaire et le zénith	18
I.5.4 Déclinaison	19
I.6 Le spectre solaire	20
I.6.1 Les principaux types de rayons qui parviennent sur Terre et leurs effets	20
I.6.2 Lumière.....	21
I.6.3 La constante solaire et le nombre masse d'air AM.....	22
I-7 l'éclairement et l'irradiation	23
I.7.1 L'irradiation ou rayonnement.....	23
I.7.2 L'éclairement ou irradiance.....	23
I.8.Situation de l'Algérie	26
I.8.1. Potentiel solaire en Algérie	27
I.9.conclusion	28

Table des matières

II. Chapitre2 : LES SEMI-CONDUCTEURS

II.1 introduction	30
II.2 les semi-conducteurs	31
II.2.1 Définition de semi-conducteur.....	31
II-2-2 les types des semi-conducteurs et le tableau du Mendeleïev.....	32
II.2.3 le silicium.....	34
II.2.3.1 les différents types de silicium.....	34
II.2.3.2 Structure cristalline du silicium.....	35
II.2.3.3 diagramme de bande d'énergie.....	35
II.2.4 la conduction dans le silicium et le niveau de Fermi.....	36
II.2.4.1 conduction par électron et par trou.....	36
II.2.4.2 le niveau de Fermi E_F	38
II.2.4.3 Procédés de production du silicium pur.....	38
II.2.5 le dopage.....	39
II.2.5.1 Semi-conducteur dopé N.....	40
II.2.5.2 Semi-conducteur dopé P.....	40
II.2.5.3 niveau donneurs et niveau accepteurs.....	41
II.2.6 la jonction PN.....	42
II.2.6.1 Polarisation d'une jonction PN :.....	43
II.2.6.1.1 La jonction PN polarisée en sens inverse.....	43
II.2.6.1.2 La jonction PN polarisée en sens direct.....	44
II.2.6.2 l'hétérojonction.....	44
II-3 les semi-conducteurs organiques	45
II.3.1. Caractère semi conducteur des matériaux organiques	46
II.3.2. conduction électrique	49
II.3.3. Dopage des semi-conducteurs organiques	49
II.4. la différence entre semi-conducteur inorganique et organique	49
II.5. l'Utilisation de l'énergie solaire	50
II.5.1. Autre utilisation	51

III. Chapitre3 : la cellule photovoltaïque

III-1 introduction	55
III.2 la solution photovoltaïque	56
III.2.1 historique.....	56
III-2-2 Processus de fabrication des systèmes photovoltaïques.....	58
III.2.2.1 raffinage de silicium.....	59
III.2.2.2 Cristallisation du silicium et mise en forme des plaques.....	60
III.2.2.3 Fabrication des cellules.....	61
III.2.2.4 Assemblage des modules et la réalisation du système PV.....	61
III.3 la cellule photovoltaïque :	61
III.3.1 Définition.....	61
III.3.2 Principe de fonctionnement.....	62
III.3.3 Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque.....	63
III.3.3.1 la tension de circuit ouvert.....	64
III.3.3.2 le courant de court circuit.....	64
III.3.3.3 la puissance maximale.....	64
III.3.3.4 le facteur de forme FF.....	65

Table des matières

III.3.3.5 le rendement de conversion	65
III.4 module PV le générateur PV	66
III.4.1 protection classique d'un GPV	67
III.4.2 connexion directe entre la source GPV et une charge DC	68
III.5 mis en série et mis en parallèle de la cellule PV	68
III.6 les différentes technologies :	70
III.6.1 comparaison	70
III.6.2 Les modules PV double face	67
III.7 connexion au réseau	71
III.7.1 les onduleurs photovoltaïques	71
III.7.2. Les batteries	72
III.7.3. Le régulateur	73
III.7.4. Le convertisseur	73
III.7.5. Les récepteurs	73
III.8 conclusion	75
IV. chapitre 4 : MODELISATION D'UN PANNEAU SOLAIRE	
IV-1 introduction	77
IV.2 Les types des modèles	78
IV.2.1 Modèle a 2 paramètres	78
IV.2.2 modèle 3 paramètres	80
IV.2.3 modèle a 4 paramètres	80
IV.2.4 modèle a 5 paramètres	80
IV.2.5 modèle a double diode	81
IV.3 modélisation d'un modèle à 4 paramètres	82
IV.3.1 essai en court-circuit	82
IV.3.2 essai en circuit ouvert	82
IV.3.3 le point de la puissance max	82
IV.3.4 calcul des paramètres	83
IV.3.4.1 calcul du courant de la saturation de la diode	83
IV.3.4.2 le courant photonique	83
IV.3.4.3 calcul de la résistance série	83
IV.3.4.4 calcul de facteur de qualité de la diode n	84
IV.3.4.5 calcul de la résistance shunte	84
IV.4 modélisation d'un module photovoltaïque par MATLAB	84
IV.4.1 le choix de modèle	85
IV.4.1.1 Calcul du tension d'une cellule	86
IV.4.1.2 Calcul du facteur de forme d'une cellule	87
IV.4.2 les caractéristiques I(V) du modèle BP SX 150	87
IV.4.3 Influence de l'éclairement sur la valeur de court circuit	88
IV.4.4 Influence de l'éclairement sur la valeur de V_{co}	89
IV.4.4 L'influence de G sur les caractéristiques $I=f(V)$	90
IV.4.5 L'influence de la température sur les caractéristiques $I=f(V)$	91
IV.4.6 Influence de la température sur les caractéristiques $P(V)$	92
IV.4.7 Influence de l'éclairement sur $P(V)$	93
IV.5 conclusion	94
Conclusion générale	96

Liste des figures

FIGURES	TITRES	N°
Figure (1.1)	Les centrales thermiques à flamme.....	5
Figure (1.2)	Photo d'une centrale thermique.....	6
Figure (1.3)	Photo d'une centrale nucléaire en France.....	7
Figure (1.4)	Centrale hydroélectrique.....	8
Figure (1.5)	Photo d'une centrale hydroélectrique en Allemagne.....	8
Figure (1.6)	Photo d'une centrale éolienne.....	9
Figure (1.7)	Capacité mondiale installée d'énergie éolienne.....	10
Figure (1.8)	Photo d'une centrale solaire.....	11
Figure (1.9)	la part de l'énergie renouvelable dans la production mondiale.....	13
Figure (1.10)	Puissance photovoltaïque installée dans le monde par année.....	14
Figure (1.11)	Évolution du prix du module photovoltaïque.....	15
Figure (1.12)	spectre solaire haute résolution.....	16
Figure (1.13)	le soleil.....	17
Figure (1.14)	l'azimut et la hauteur solaire.....	18
Figure (1.15)	la déclinaison solaire.....	19
Figure (1.16)	représentation du mouvement de la terre autour du soleil.....	19
Figure (1.17)	représentation des rayons visibles et invisibles.....	21
Figure (1.18)	la constante solaire.....	22
Figure (1.19)	le nombre de masse d'air.....	23
Figure (1.20)	Carte du monde de l'irradiation moyenne annuelle en kWh/m ² /jour sur un plan horizontal.....	24
Figure (1.21)	représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5.....	25
Figure (1.22)	Irradiation solaire globale reçue par l'Algérie : moyenne annuelle...	26
Figure (2.1)	Structure électronique d'un atome de silicium.....	31
Figure (2.2)	Tableau périodique des éléments de Mendeleïev.....	33
Figure (2.3)	structure cristalline de silicium.....	35
Figure (2.4)	Diagramme de bandes d'énergie du silicium.....	36
Figure (2.5)	la conduction dans le silicium.....	36
Figure (2.6)	le courant généré par le champ électrique.....	37
Figure (2.7)	le niveau de Fermi.....	38
Figure (2.8)	schéma représentatif des procédés de production du silicium pur.....	39
Figure (2.9)	Le dopage N et P du silicium.....	41
Figure (2.10)	niveau donneurs.....	41
Figure (2.11)	niveau accepteurs.....	41
Figure (2.12.a)	Représentation d'une jonction PN à l'équilibre thermodynamique.....	42
Figure (2.12.b)	Coupe transversale d'une jonction PN.....	43
Figure (2.13)	Polarisation inverses.....	43
Figure (2.14)	polarisation direct.....	44
Figure (2.15)	représentation de la bande d'énergie d'une hétérojonction.....	45
	GaAs/AlAs	
Figure (2.16)	chaîne de polymère (a) et molécule de pantacène (b).....	45
Figure (2.17)	La base structurale des matériaux organiques.....	47
Figure (2.18)	Association de deux atomes de carbone le recouvrement des orbitales.....	47
Figure (2.19)	Représentation simplifiée des niveaux LUMO et HOMO d'une molécule dans l'état fondamental, d'un trou, d'un électron, et d'un exciton.....	48

FIGURES	TITRES	N°
Figure (2.20)	l'utilisation de l'énergie renouvelable.....	51
Figure (2.21)	Cellule solaire tandem pour la production d'hydrogène.....	52
Figure (3.1)	Limites du système pour l'analyse du cycle de vie.....	59
Figure (3.2)	raffinage de silicium.....	60
Figure (3.3)	les étapes de fabrication d'un système PV.....	61
Figure (3.4.a)	structure d'une cellule photovoltaïque au silicium.....	62
Figure (3.4.b)	Structure généralisée d'une cellule solaire (coupe transversale).....	63
Figure (3.5)	caractéristiques $I=f(V)$ sous obscurité et sous éclairement d'une cellule PV.....	64
Figure (3.6)	caractéristique J-V et P-V sous l'éclairement	65
Figure (3.7)	les différent types des dispositifs PV selon la puissance générer.....	67
Figure (3.8)	association de deux modules PV en parallèle.....	68
Figure (3.9)	caractéristiques de groupements série ou parallèle de cellule photovoltaïque.....	69
Figure (3.10)	câblage série/parallèle d'une cellule PV.....	69
Figure (3.11)	Face avant et arrière d'un module PV double face 36 Vcc.....	71
Figure (3.12)	module PV connecté au réseau.....	71
Figure (3.13)	onduleurs photovoltaïque.....	72
Figure (3.14)	Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec batterie de stockage.....	73
Figure (3.15)	Exemple d'installations de cellule PV.....	74
Figure (4.1)	Modèle à 2 paramètres	78
Figure (4.2)	modèle à 4 paramètres	80
Figure (4.3)	modèle a une diode	81
Figure (4.4)	modèle a deux diodes	81
Figure (4.5)	les caractéristiques $I(V)$ de BP SX 150	87
Figure (4.6)	l'influence de l'éclairement sur I_{cc}	88
Figure (4.7)	l'influence de l'éclairement sur V_{co}	89
Figure (4.8)	variation des caractéristique $I(V)$ par rapport à la variation de G	90
Figure (4.9)	$I=f(V)$ et l'influence de la température	91
Figure (4.10)	$P=f(V)$ et l'influence de la température	92
Figure (4.11)	$P=f(V)$ et l'influence de l'éclairement	93

Liste des tableaux

TABLEAUX	TITRE	N°
Tableau I.1	les différents ensoleillements des régions Algériennes.....	07
Tableau II.1	Tableau périodique des éléments de Mendeleïev.....	50
Tableau III.1	Rendements de cellules et générateurs PV mesurés à une température de 25 °C et un éclairage de 1000 W/m ² sous un spectre global de AM 1,5.....	66
Tableau III.2	les différentes technologies du silicium.....	70
Tableau IV.1	caractéristique de module BP SX 150.....	84

Les notations des symboles

ER	Énergie renouvelable
ENR	Énergie nouvelles et renouvelable
h	Constante de Planck
λ	La longueur d'onde
c	Vitesse de la lumière
UV	Ultra Violet
IR	Infrarouge
AM	Nombre de masse d'air
Si	Silicium
Ge	Germanium
SC	Semi-conducteur
σ	Conductivité électrique S/cm
GaAs	Alsineur de Galium
Eg	Energie de gap eV
T	La température en kelvin k
J	Densité du courant de le silicium en mA/cm ²
J _p	la densité du courant généré par les trous en mA/cm ²
J _n	la densité du courant généré par les électrons en mA/cm ²
μ	mobilité électrique
ρ	la résistivité électrique Ω /cm
μ_n	mobilité électrique des électrons
μ_p	mobilité électrique des trous
E	champ électrique V/cm
E _f	énergie de fermi ou niveau de fermi eV
BV	la bande de valence
BC	la bande de conduction
Al	aluminium
E _D	niveau d'énergie donneur eV
E _A	niveau d'énergie accepteur ev
q	quantité de charge C
I _{cc}	courant de court circuit A
I _{sat}	courant de saturation de la diode A
I _{max}	courant du point de MPPT
k	constante de boltezmann $1.381.10^{-23}$ JK ⁻¹
I	le courant d'une cellule photovoltaïque A
V _{co}	la tension de circuit ouvert V
V _{max}	la tension du point MPPT V
P _{max}	la puissance max généré par une cellule W
n	le facteur de qualité d'une diode
R _s	la résistance série Ω
R _{sh}	la résistance shunte Ω
GPV	générateur photovoltaïque
FF	facteur de forme d'une cellule PV
η	le rendement d'une cellule PV

Introduction générale

A notre époque, et sans électricité, la vie quotidienne serait difficilement envisageable, Il est donc nécessaire de savoir la produire de manière efficace et continue. Pour répondre à la consommation croissante d'électricité, il fallu inventer et construire Des usines (centrales électriques) capables de produire de l'électricité en grande quantité. Une Fois le courant produit, il doit être amené jusqu'au consommateur. Dans un pays, le Transport et la Distribution Publique assurent le transit de l'énergie Électrique entre les points de production et les points de consommation. La turbine et l'alternateur sont les deux pièces maîtresses de ces générateurs d'électricité.

Dans le cas des usines thermiques, la turbine est entraînée par la vapeur produite dans les chaudières où l'on brûle les combustibles, alors que dans le cas des usines hydroélectriques, la turbine est animée par la force de l'eau. La turbine est couplée à un alternateur, un grand aimant cerclé d'une bobine, qui va produire un courant alternatif en tournant. Une fois le courant produit, il doit être amené jusqu'au consommateur.

On distingue que la production de l'énergie électrique possède des usines et un matériel très grand (turbine, four,..., etc.) sans oubliés la grande influence sur la nature c'est la terre en générale.

Le soleil, l'eau, le vent, le bois et les autres produits végétaux sont autant de ressources naturelles capables de générer de l'énergie grâce aux technologies développées par les hommes. Leur relatif faible impact sur l'environnement en fait des énergies d'avenir face au problème de la gestion des déchets du nucléaire et aux émissions de gaz à effet de serre. Les énergies renouvelables représentent par ailleurs une chance pour plus de 2 milliards de personnes isolées d'accéder enfin à l'électricité. Ces atouts, alliés à des technologies de plus en plus performantes, favorisent le développement des énergies renouvelables mais de manière encore très inégale selon le type de ressources considérées. La consommation d'énergie ne cessant d'augmenter, il semble néanmoins peu probable que les énergies renouvelables remplacent les autres ressources énergétiques dans un avenir proche. Aussi est-il important que chacun de nous surveille au plus près sa propre consommation d'énergie.

Tous les jours, le soleil fournit de l'énergie à la Terre. Les électrotechniciens peuvent bénéficier de cette énergie grâce à une technologie appelée photovoltaïque, qui transforme l'énergie solaire en électricité.

Dans nos jours la solution photovoltaïque est la meilleure et elle est en cour de développement dans tout le monde entier.

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par Antoine Becquerel en 1839, mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique.

L'énergie photovoltaïque s'est développée dans les années 50 pour l'équipement de vaisseaux spatiaux et le premier a été lancé dans l'espace en 1958. C'était le seul procédé

non-nucléaire d'alimenter des satellites en énergie. Les images satellites reçues par votre téléviseur ne vous parviennent que grâce à l'énergie photovoltaïque.

Pendant les années 70 et 80, des efforts ont été faits pour réduire les coûts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres. La croissance de l'industrie fut spectaculaire.

Depuis le début des années 80, la quantité de modules photovoltaïques expédiés par an (mesurés en MW-Crêtes) a augmenté et le prix des modules (par Watt-Crête) diminuait au fur et à mesure que le nombre de modules fabriqués augmentent. Bien que le prix se soit quelque peu stabilisé, la quantité de modules photovoltaïques expédiés chaque année continue d'augmenter.

Le rayonnement solaire, aussi bien direct que diffus, peut être converti directement en électricité, sous forme de courant continu au moyen des photopiles, sans avoir ainsi besoin de recourir à un cycle thermodynamique. Les systèmes photovoltaïques, sont donc particulièrement simples, puisque, à l'inverse des centrales électriques thermiques conventionnelles ou solaires, ils ne comportent ni fluides à haute température ou sous pression, ni pièces tournantes, ni la nécessité de la présence d'une « source froide » consommant de l'eau.

Dans le cas de photovoltaïque, l'énergie primaire est le rayonnement solaire. Elle se trouve dans le milieu ambiant, il se fait d'exposer les modules ou les panneaux devant la lumière pour obtenir une puissance électrique, cette énergie est gratuite et disponible pendant toutes la journée.

Les systèmes photovoltaïques sont particulièrement bien adaptés à la production décentralisée d'électricité et les sites isolés : électrification rurale (pour les besoins domestiques et les besoins communautaires : centres de santé, écoles, etc.), pompage de l'eau, réfrigération, télécommunications, etc. Ils constituent donc une solution de choix pour les populations rurales qui ne pourront pas être reliées aux réseaux électriques conventionnels, même pour les villes on peut économiser la consommation d'énergie par l'utilisation des panneaux sur le toit ou sur les façades des bâtiments.

On va faire dans le premier chapitre une étude sur la production générale de l'électricité ainsi leur type.

Une étude sur le soleil la source générale de la production solaire et définition du spectre solaire et les paramètres qui lui caractérise.

Dans le deuxième chapitre une étude générale sur les semi-conducteurs organique et inorganique et une étude sur le dopage et les caractéristiques de la jonction PN.

Dans le troisième chapitre une description générale de la cellule photovoltaïque.

Dans le quatrième c'est la modélisation d'un type des panneaux solaires qu'il est BP SX 150 à l'aide de MATLAB.

I.1. introduction :

Dans le monde, la production d'énergie électrique est faite principalement à base d'énergies fossiles et de combustible d'origine nucléaire. Un recours systématique aux carburants fossiles, tels que le pétrole, le charbon ou le gaz naturel, permet d'avoir de faibles coûts de production mais conduit à un dégagement massif de gaz polluant et de gaz à effet de serre. La production électrique à partir de combustibles fossiles est à l'origine de 40% des émissions mondiales de CO₂. L'énergie d'origine nucléaire, qui ne rejette pas directement de gaz carbonique, souffre généralement d'une mauvaise image médiatique à cause des risques importants encourus. Certes, les risques d'accident liés à leur exploitation sont très faibles mais les conséquences d'un accident seraient désastreuses. Par ailleurs, le traitement des déchets issus de ce mode de production est très coûteux : la radioactivité des produits traités reste élevée durant de nombreuses années.

Enfin, les réserves d'uranium sont comme celles du pétrole, limitées (moins de 100 ans au rythme actuel de consommation). [3]

C'est pour cela tous les pays du monde cherche ou bien ils orientent leurs perspectives aux énergies renouvelable (propre, durable, etc ...).

L'énergie solaire (le soleil) est l'un des solutions proposées selon leurs présences, il dure vraiment par rapport a l'axe de la vie de l'humanité.

On va entamer dans ce chapitre tous les modes de production et leurs avantages et leurs inconvénients. Une étude sur le soleil et le spectre solaire et petit rappel sur l'astronomie.

I.2. production de l'énergie électrique :

Une centrale (de production d'énergie) électrique est un site industriel destiné à la production d'électricité. Les centrales électriques transforment différentes sources d'énergie naturelle en énergie électrique afin d'alimenter en électricité les consommateurs, particuliers ou industriels relativement lointains. Le réseau électrique permet de transporter puis de distribuer l'électricité jusqu'aux consommateurs.

Il existe cinq principaux types de centrales électriques :

- Les centrales à combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) dites centrales thermiques classiques,
- Les centrales nucléaires qui sont également des centrales que l'on peut qualifier de thermiques,
- Les centrales hydroélectriques,
- Les centrales solaires ou photovoltaïques,
- Les centrales éoliennes.

Les éléments indispensables à la production de courant électrique sont :

- Une turbine en mouvement.
- Un alternateur c'est-à-dire un aimant entraîné par la turbine et entouré d'une bobine qui produit le courant électrique.

I.2.1. Les centrales thermiques :

Les centrales thermiques produisent l'électricité à partir de la chaleur qui se dégage de la combustion du charbon, du mazout ou du gaz naturel.

On la trouve souvent près d'une rivière ou d'un lac, car d'énormes quantités d'eau sont requises pour refroidir et condenser la vapeur sortant des turbines. La combustion dégage une grande quantité de chaleur utilisée pour chauffer de l'eau dans la chaudière (ou générateur de vapeur). On dispose alors de vapeur d'eau sous pression. Cette vapeur sous pression fait tourner à grande vitesse une turbine qui entraîne elle-même un alternateur qui produit une tension alternative sinusoïdale. A la sortie de la turbine la vapeur est refroidie pour se transformer en eau, puis renvoyée dans la chaudière (**Fig. 1.1**).

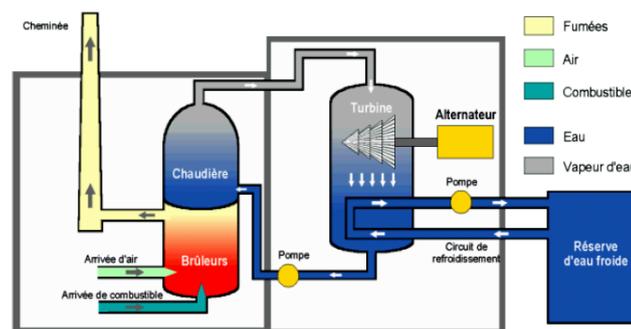


Figure 1.1 : Les centrales thermiques à flamme



Figure 1.2 : Photo d'une centrale thermique

I.2.1.1. Avantages :

- ✚ Cette énergie est rentable à la production.
- ✚ Elle a un prix modeste sur le marché mondial.
- ✚ Souplesse d'utilisation et disponibilité élevée
- ✚ Facilité d'exploitation
- ✚ Facilité de transport (pétrole)
- ✚ Possibilité de développer la cogénération
- ✚ Compétitivité

I.2.1.2. Inconvénients :

- ✚ Prix fluctuants
- ✚ Géostratégie des ressources
- ✚ Impacts sur l'environnement (Gaz à effet de serre, marée noire, etc.)
- ✚ Il faut un plan d'eau à proximité.
- ✚ Les usines possédant un circuit de refroidissement à circuit ouvert, peuvent avoir des problèmes écologiques dus au réchauffement des rivières.

I.2.2. Les centrales nucléaires :

Ces centrales utilisent également des cycles de conversion thermodynamique, néanmoins leur "chaudière" est un réacteur nucléaire. L'énergie nucléaire obtenue à la suite de réactions de fission de l'uranium et du plutonium est la source de chaleur utilisée. Elles produisent environ 15% de l'électricité mondiale. Les centrales nucléaires produisent des déchets radioactifs et présentent un risque d'accident. Une centrale nucléaire est identique à une centrale thermique, sauf que la chaudière brûlant le combustible fossile est remplacée par un réacteur contenant le combustible nucléaire en fission.



Figure 1.3 : Photo d'une centrale nucléaire en France

I.2.2.1. Avantages :

- ✚ Adapté à la production de masse
- ✚ Disponibilité élevée
- ✚ Stabilité des coûts
- ✚ Réserves d'uranium importantes
- ✚ Faibles émissions de CO₂ en exploitation
- ✚ L'énergie nucléaire peut être utilisée dans le domaine spatial.
- ✚ Elle ne nécessite pas d'oxygène, ce qui est un atout pour l'homme.

I.2.2.2. Inconvénients :

- ✚ Lourds investissements
- ✚ Risque industriel
- ✚ Nécessite un niveau de technologie élevé
- ✚ Acceptation du public
- ✚ Chaque année les tranches nucléaires produisent des tonnes de déchets.
- ✚ Le stockage des déchets qui augmente le niveau de pollution.
- ✚ Le risque d'accident (26 avril 1986 à l'usine de Tchernobyl).

I.2.3. Les centrales hydroélectriques :

Les centrales hydroélectriques convertissent l'énergie de l'eau en mouvement en énergie électrique. L'énergie provenant de la chute d'une masse d'eau est tout d'abord transformée dans une turbine hydraulique en énergie mécanique. Cette turbine entraîne un alternateur dans le quel l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique (**Fig. 1.4**).

I.2.3.1 Les types des centrales hydrauliques :

Suivant l'hauteur de chute, on distingue [19] :

- Les centrales de haute chute, ils utilisent des turbines de type Peleton.
- Les centrales de moyenne chute, ils utilisent des turbines de type Francis.
- Les centrales de basse chute, ils utilisent des turbines de type Kaplan.

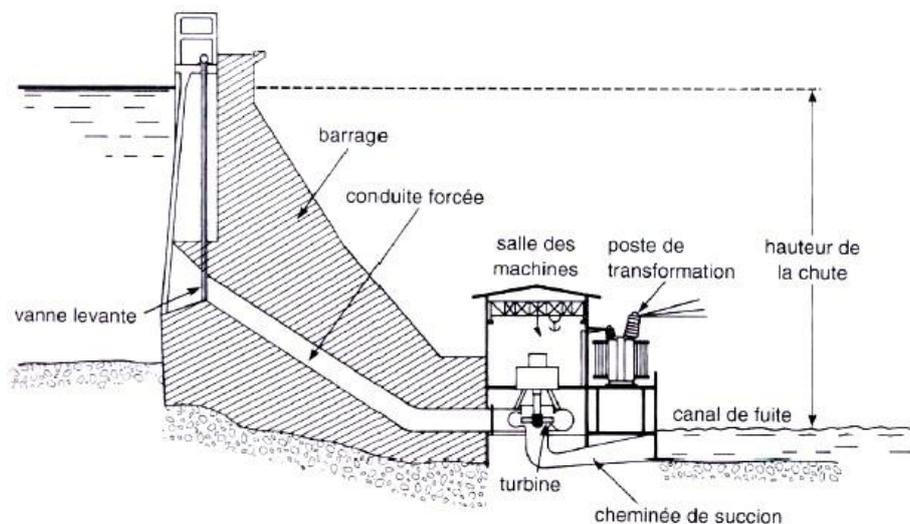


Figure I.4 : Centrale hydroélectrique



Figure I.5 : Photo d'une centrale hydroélectrique en Allemagne

I.2.3.2. Avantages :

- ✚ Faible coût du KWh pour le gros hydraulique
- ✚ Souplesse d'utilisation
- ✚ Possibilité de « stocker » de l'électricité pour le turbinage
- ✚ L'hydraulique est une énergie renouvelable mise en valeur mais pourtant rarement comptabilisée, elle fournit 13 % de la production et contribue également à l'écrêtement des crues.

I.2.3.3. Inconvénients :

- ✚ Contrainte géographique
- ✚ Aléas climatiques (sécheresse)
- ✚ Nécessité de concilier les différents usages de l'eau
- ✚ Impacts sur l'environnement à la construction
- ✚ L'inondation de certains reliefs lors de la construction de barrages.

I.2.4. Les centrales éoliennes :

L'énergie éolienne est produite sous forme d'électricité par une éolienne. Des éoliennes formées d'un mat surmonté d'un générateur électrique entraîné par une hélice, sont positionnées idéalement sur les plans d'eau ou les collines ventées.



Figure I.6 : Photo d'une centrale éolienne

I.2.4.1. Avantages :

- ✚ L'énergie éolienne est propre et peut être associée à des panneaux de photopiles et à une batterie d'accumulateur afin d'optimiser la fourniture d'électricité.

I.2.4.2. Inconvénients :

- ✚ L'exploitation de l'énergie éolienne est non polluante par elle-même mais les aérogénérateurs engendrent une pollution acoustique due à la notation des pâles qui engendrent une dégradation du paysage.
- ✚ Faible disponibilité (20 à 30%) Difficultés de raccordement au réseau
- ✚ Surface au sol
- ✚ Acceptation du public

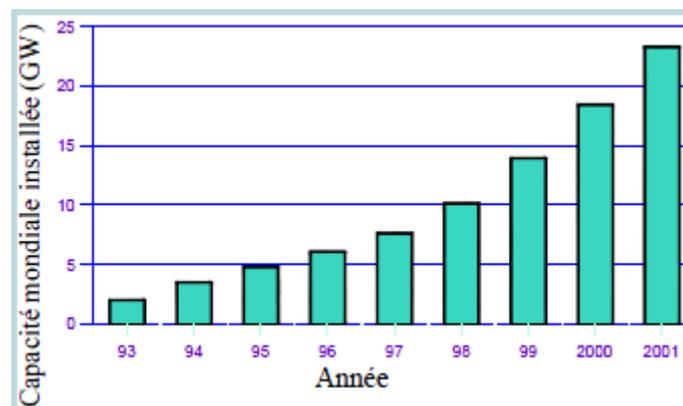


Figure I.7: Capacité mondiale installée d'énergie éolienne [27]

I-2-5. Les centrales solaires ou photovoltaïques :

Cet autre moyen de fabriquer de l'électricité avec l'énergie solaire utilise les rayonnements lumineux du soleil, qui sont directement transformés en un courant électrique par des cellules à base de silicium ou autre matériau ayant des propriétés de conversion lumière/électricité. Chaque cellule délivrant une faible tension, les cellules sont assemblées en panneaux.



Figure 1.8: Photo d'une centrale solaire

I.2.5.1. Avantages :

- ✚ Acceptation du public
- ✚ Adapté aux pays chauds et aux sites isolés
- ✚ L'énergie solaire présente, outre tous les avantages des énergies renouvelables, ses propres avantages, à savoir : énergie maîtrisable et adaptable aux situations de toutes les régions.
- ✚ Frais de maintenance relativement faibles.

I.2.5.2. Inconvénients :

- ✚ Coût encore élevé
- ✚ Puissance assez faible
- ✚ Disponibilité

I.3 L'énergie renouvelable :

Le soleil, l'eau, le vent, le bois et les autres produits végétaux sont autant de ressources naturelles capables de générer de l'énergie grâce aux technologies développées par les hommes. Leur relatif faible impact sur l'environnement en fait des énergies d'avenir face

Au problème de la gestion des déchets du nucléaire et aux émissions de gaz à effet de serre. Les énergies renouvelables représentent par ailleurs une chance pour plus de 2 milliards de personnes isolées d'accéder enfin à l'électricité. Ces atouts, alliés à des technologies de plus en plus performantes, favorisent le développement des énergies renouvelables mais de manière encore très inégale selon le type de ressources considérées. La consommation d'énergie ne cessant d'augmenter, il semble néanmoins peu probable que les énergies renouvelables remplacent les autres ressources énergétiques dans un avenir proche. Aussi est-il important que chacun de nous surveille au plus près sa propre consommation d'énergie.

Les énergies renouvelables (ER) ont le vent en poupe, mais depuis quelques années seulement. Les États, les industriels, et nous aussi simples consommateurs, avons longtemps négligé ces énergies naturellement offertes par la planète au profit d'énergies immédiatement plus rentables, mais aussi plus coûteuses pour l'environnement. Aujourd'hui le vent a tourné, et les énergies renouvelables, lentement, trouvent des applications adaptées et économiquement viables dans de multiples domaines.

I.3.1 Les énergies renouvelables, c'est quoi ?

D'une façon générale, les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités. L'eau des rivières faisant tourner les turbines d'un barrage hydroélectrique ; le vent brassant les pales d'une éolienne ; la lumière solaire excitant les photopiles ; mais aussi l'eau chaude des profondeurs de la terre alimentant des réseaux de chauffage. Sans oublier ces végétaux, comme la canne à sucre ou le colza, grâce auxquels on peut produire des carburants automobiles ou des combustibles pour des chaudières très performantes. Tout cela constitue les énergies nouvelles et renouvelables, " ENR " pour les adeptes du jargon énergétique, et plus justement ER pour les seules énergies renouvelables.

En plus de leur caractère illimité, ces sources d'énergie sont peu ou pas polluantes. Le solaire, l'éolien, l'eau et la géothermie ne rejettent aucune pollution, lorsqu'elles produisent de l'énergie. La combustion de la biomasse génère certains gaz polluants, mais en bien moindre quantité que des carburants fossiles, tels que le charbon ou le fioul.

I.3.2 Quelle est la place des énergies renouvelables ?

Globalement, la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité reste encore faible. Selon le dernier " Inventaire sur la production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde ", 20 % du courant produit sur la planète est d'origine renouvelable. L'essentiel étant toujours issu des combustibles fossiles, tels que le pétrole ou le charbon (62,7 %) et par l'énergie nucléaire (17,1 %).

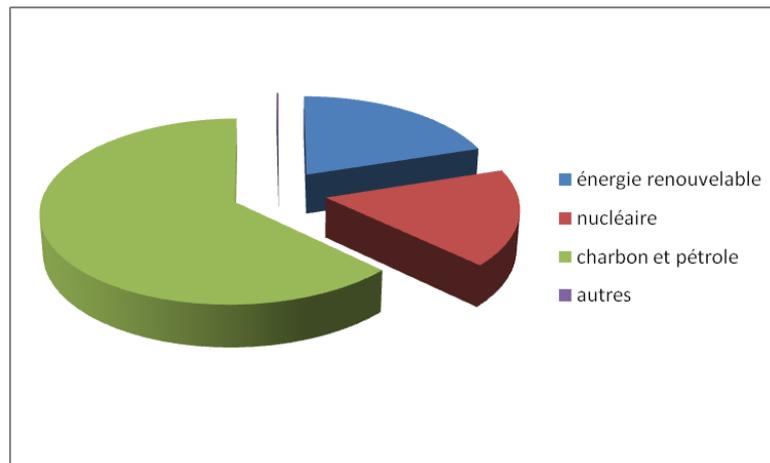


Figure 1.9 : la part de l'énergie renouvelable dans la production mondiale

Qu'un électron sur cinq soit " propre ", cela n'est déjà pas si mal. Mais ce chiffre encourageant masque une grande disparité entre les sources d'énergies renouvelables. À elle seule, l'hydroélectricité génère 92,5 % de l'électricité issue des ER. Les utilisations de la biomasse produisent 5,5 % du courant mondial " vert ", la géothermie 1,5 %, l'éolien 0,5 % et les techniques solaires y contribuent seulement pour 0,05 %.

Toutefois, ces grandes masses sont extrêmement variables d'un pays à l'autre.

I.3.3 l'énergie solaire :

La photovoltaïque c'est la conversion directe de lumière solaire en électricité. Le mot "photo" vient du grec qui veut dire lumière et "voltaïque" vient du nom d'un physicien Italien Alessandro Volta qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité et d'après son nom on a aussi nommé l'unité de tension électrique le "volt".

La photovoltaïque c'est la manière la plus élégante de produire de l'électricité. Elle se produit sans bruit, sans parties mécaniques et sans que des produits toxiques soient libérés.

L'énergie solaire peut servir pour beaucoup de choses L'éclairage (autoroutes, arrêts d'autobus,...). Les communications (Stations de relais de téléphone, bornes d'appel d'urgences sur autoroutes, téléphones mobiles,..). La fourniture d'électricité pour des sites éloignés du réseau normal (Forêts, montagnes, ..). Capteurs isolés (Infos météorologique, trafic routier, enregistrements sismiques, recherche scientifique,..). Pour de petites stations de pompage ou d'irrigation. Chargement des batteries de voitures (les batteries normales, ou de voitures électriques..). Protection contre la corrosion (car les pipe-lines et autres tuyaux enfouis sous terre ou dans l'eau perdent des ions et rouillent- ils perdent des ions - on peut les protéger en appliquant une différence de potentiel, donc un courant électrique).

Evidemment l'utilisation de cellules photovoltaïques est plus efficace dans les régions très ensoleillée tel que les Etats-Unis, ou les pays du sud en général, mais cela ne veut pas dire qu'on ne peut pas les utiliser dans le reste du monde.

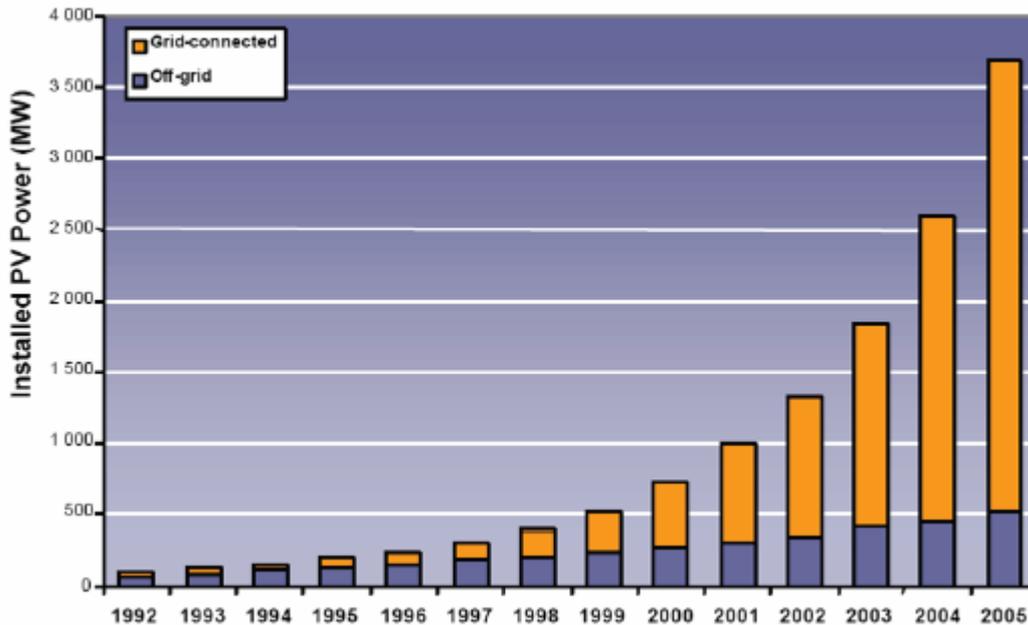


Figure 1.10 : Puissance photovoltaïque installée dans le monde par année. [8]

L'électricité photovoltaïque est encore un peu plus chère que les énergies conventionnelles (si l'on ne prend pas en compte les coûts cachés et écologiques). Les installations photovoltaïques sont en plus handicapées par un coût d'achat important. En effet, quasiment tout l'investissement se fait au départ (à comparer par exemple à une centrale électrique au gaz). Le coût d'entretien ne représente qu'une faible fraction du coût total. La notion d'amortissement est donc obligatoire pour pouvoir comparer les prix par an. Financièrement, cela suppose évidemment l'utilisation de crédits.

La baisse des prix du photovoltaïque est continue depuis des décennies. **La figure 1.11** présente cette évolution encourageante : le prix des modules a baissé de quasiment deux décades en 30 ans. Un module photovoltaïque est prêt à l'emploi mais on doit ajouter le prix de la main d'œuvre pour la pose. On note que l'unité est le dollar par Watt, c'est donc le prix d'une puissance et non d'une énergie. Il s'agit en fait de la puissance assignée (anciennement nommée puissance-crête en «Wc »). C'est logique puisque l'énergie dépendra du lieu d'installation et que le marché du photovoltaïque doit avoir une norme. [8]

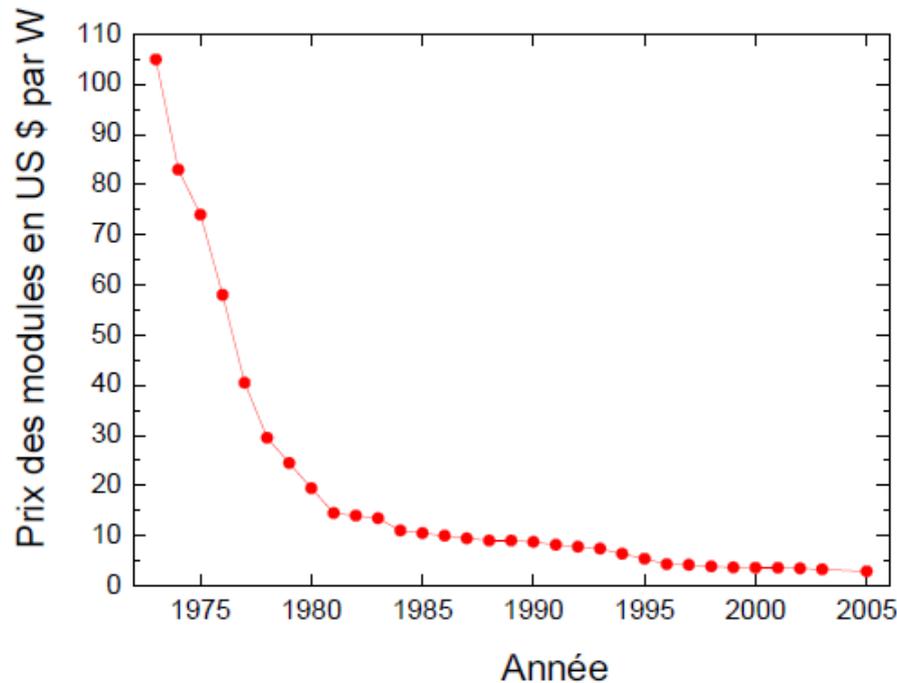


Figure 1.11 : Évolution du prix du module photovoltaïque.

I.4 Le soleil

I.4.1 Caractéristiques générales : [2]

Le Soleil est une « petite » étoile, une boule de gaz, dont le diamètre est de 1 391 000 km, et qui est placée à 150 000 000 km de nous (périhélie : 147,1 millions de km et aphélie : 152,1 millions de km). Cette distance est si grande que sa lumière nous parvient 8 minutes après avoir été émise. N'oubliez pas qu'elle voyage à la vitesse de 300 000 km/s, c'est-à-dire qu'elle fait 7 fois le tour de la Terre en 1 seconde.

Quant à son volume, il pourrait contenir 1 300 000 Terres. Avec une densité de 1,41 (contre 5,5 pour la Terre), sa masse est de 330 000 fois celle de la Terre (1,99.1030 kg ou 2 milliards de milliards de milliards de tonnes). Il représente 99,867 % de la masse totale du système solaire, c'est-à-dire que l'ensemble de toutes les planètes et comètes ne représente que le millième du Soleil.

Il a déjà effectué 20 tours de la Galaxie en traversant des densités variables de poussières qui interceptent une partie du rayonnement qu'il nous envoie. Cela a dû certainement avoir des conséquences sur le climat terrestre.

Bien que sa lumière soit 600 000 fois plus élevée que celle de la Lune (son miroir), il n'est visible qu'à une distance de 60 al (année-lumière).

Notre Soleil est donc une énorme boule de gaz composée de 70% d'hydrogène et de 28% d'hélium, les 2% restants représentent la plupart des autres atomes présents dans l'univers. Il ne faut pas oublier non plus que les étoiles sont les usines qui créent tous les matériaux existant dans l'univers, à partir de l'hydrogène. Plus de 60 éléments chimiques furent identifiés, tel OH (radical hydroxyle), CH (radical méthylique) et aussi du titane, du plomb, du mercure, du chlore, du silicium, cuivre, calcium, indium, antimoine, zirconium, rhodium, etc... On trouve, par exemple, 9 atomes d'or pour 1 000 milliards d'atomes d'hydrogène, soit la bagatelle de 10 millions de milliards de tonnes d'or (1.10_{16} tonnes). Outre les atomes, l'analyse du spectre solaire a permis de découvrir des molécules complexes (**figure 1.12**).

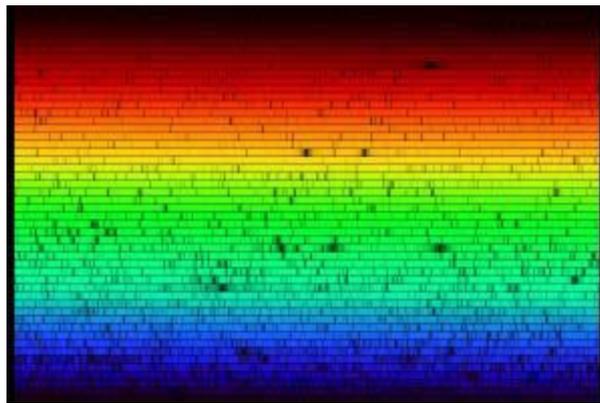


Figure 1.12 : spectre solaire haute résolution

Il n'a pas de surface à proprement parler, mais la température de radiation, si on assimile le Soleil à un corps noir, est de 5 700 K selon la loi de Stephan (0 Kelvin = - 273,15 °C. C'est le zéro absolu; l'agitation moléculaire est stoppée), ce qui lui donne sa couleur jaune. La couleur est en relation directe avec la longueur d'onde, laquelle est liée à la température. Ainsi en analysant la couleur, nous pouvons obtenir facilement sa température de radiation. Au centre, il règne une pression 220 millions de fois plus grande que la pression atmosphérique de notre Terre (soit un gros pétrolier sur le bout du doigt !) qui est de 1033 hecto-pascal au niveau de la mer, entraînant une température de 15 millions K, et plusieurs millions de degrés dans les couches supérieures de son atmosphère (> 10 000 km à plusieurs millions de km).

I.4.2 Son énergie : Energie « humainement » inépuisable : [2]

C'est une gigantesque bombe thermonucléaire dont la puissance, émise sous forme de photons, représente un chiffre considérable: $3,82.10^{26}$ Watts. C'est le résultat de la combustion de 596 millions de tonnes par seconde d'hydrogène convertis en 592 millions de tonnes par seconde d'hélium. La perte, 4 millions de tonnes/seconde, se traduit sous forme de rayonnement gamma. Chaque cm^2 de sa surface émet une énergie de 6 kilowatts. Mais il

N'arrive sur Terre que 5 milliardièmes ($5 \cdot 10^{-9}$) de cette puissance. Cette pile thermonucléaire fonctionne grâce à la transformation de 4 noyaux d'atomes d'hydrogène qui fusionnent pour fournir 1 noyau d'atome d'hélium avec la libération d'une énergie de 25 000 mégawatts par gramme et par seconde (100 milliards de bombes à hydrogène de 1 mégatonne).

Cette énergie provient du centre. La pression comprime les noyaux d'hydrogène et permet ainsi la fusion. Il ne faut pas confondre la fusion avec la fission, qui casse les noyaux dans une bombe atomique. La fusion d'un gramme d'hydrogène libère 140 milliards de calories, la calorie étant la quantité de chaleur nécessaire pour faire passer un gramme d'eau de 15°C à 16°C . Cela correspond à $0,14 \text{ W/cm}^2$.

Le transfert d'énergie du centre vers la surface s'effectue par rayonnement et par convection. La zone de convection est limitée par la photosphère, épaisse de 200 km, et appelée ainsi parce que presque la totalité du rayonnement visible provient d'elle. Elle a une apparence granuleuse, provoquée par la turbulence de la partie supérieure de la zone de convection. La taille d'une granule peut dépasser celle de la France et la durée de vie peut aller de 10 minutes à plus de 10 heures, selon la taille (**figure 1.13**).

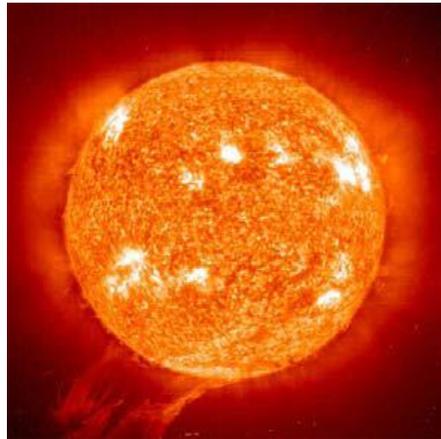


Figure 1.13 : le soleil

Cette pression empêche les photons d'atteindre la surface dès leur création. Ainsi, ils mettent 2 millions d'années pour sortir des profondeurs du Soleil, tandis qu'il leur faut 8 minutes pour arriver sur Terre. Quant aux neutrinos, fabriqués en même temps, ils sortent instantanément. Absolument rien, n'est capable de les arrêter. Par conséquent, il est très difficile de les étudier. Ainsi, la recherche des neutrinos nous renseigne sur la lumière qui sortira dans 2 millions d'années du Soleil. Aujourd'hui, le taux est inférieur à ce que l'on attendait. Cela peut signifier que dans 2 millions d'années, la température sera plus basse avec des conséquences très importantes sur l'environnement terrestre.

I.5 rappel astronomie :

I.5.1 Équateur et méridien :

1. L'**équateur** est une ligne fictive de séparation entre l'hémisphère nord et l'hémisphère sud, définie par un plan perpendiculaire à l'axe des pôles.
2. Le **méridien** est le plan du lieu passant par l'axe des pôles.
La **latitude** est l'éloignement par rapport à l'équateur, mesuré en degrés d'arc le long du méridien du lieu (en °N ou en °S).
3. La **longitude** est l'éloignement par rapport au méridien d'origine, mesuré en degrés d'arc le long de l'équateur (en °E ou en °O).

I.5.2 Azimut :

L'**azimut solaire** est l'angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre entre le point cardinal Sud (dans l'hémisphère nord) ou Nord (dans l'hémisphère sud) et la projection sur le plan horizontal local de la droite reliant la terre au soleil. L'angle est mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord et dans le sens contraire dans l'hémisphère sud, en utilisant les projections sur le plan horizontal du point d'observation (**figure 1.14**).

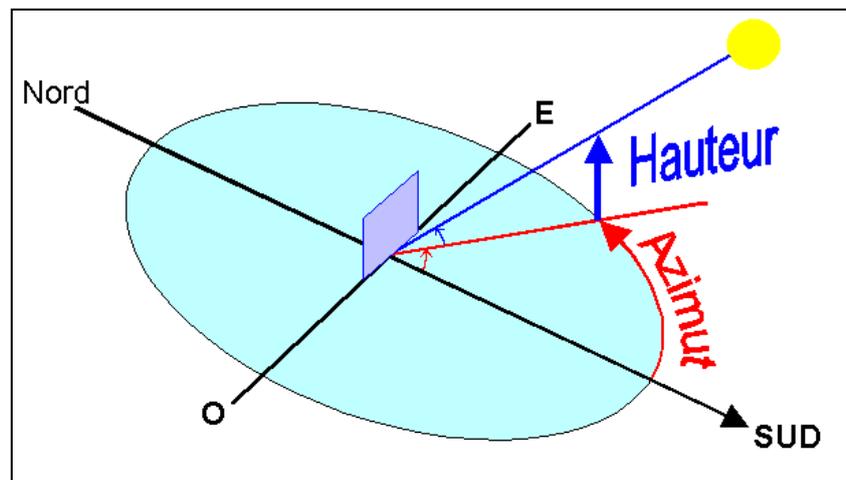


Figure 1.14 : l'azimut et la hauteur solaire

Note : l'azimut solaire est négatif le matin (direction Est), nul ou égal à 180° à midi et positif l'après-midi (direction Ouest), sur tout le globe. Il diffère de l'**azimut géographique**, lequel est toujours mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du Nord, indépendamment de l'hémisphère du point d'observation.

I.5.3 Hauteur solaire et le zénith :

L'**hauteur solaire** est l'angle entre la droite joignant le centre du disque solaire au point d'observation et le plan horizontal passant par le point d'observation.

Le **Zénith** est le point le plus élevé de l'hémisphère céleste, se trouvant directement à la verticale de l'observateur.

I.5.4 Déclinaison :

La **déclinaison solaire** est l'angle formé par la droite reliant la terre au soleil et le plan équatorial (positif vers le nord). La déclinaison est égale à zéro aux équinoxes et varie de $+23,45^\circ$ (22 juin) à $-23,45^\circ$ (22 décembre).

Les **équinoxes** sont les deux dates de l'année où le soleil traverse le plan équatorial : sa déclinaison est alors nulle et les durées du jour et de la nuit sont égales. L'**équinoxe d'automne** intervient vers le 22 septembre et l'**équinoxe de printemps** vers le 22 mars, dans l'hémisphère Nord.

Dans l'hémisphère Nord, le **solstice d'été** (vers le 21 juin) est la période au cours de laquelle la durée qui sépare le lever et le coucher du soleil cesse de croître (maximum 16 h 8 mn).

Le **solstice d'hiver** (vers le 21 décembre) est la période au cours de laquelle cette durée cesse de décroître (minimum 8h 12mn). Les saisons sont inversées dans l'hémisphère Sud. (Figure 1.15 et 1.16)

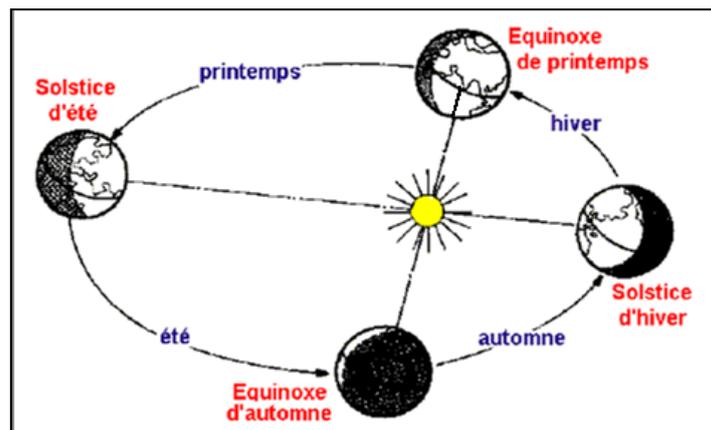


Figure 1.15 : la déclinaison solaire



Figure 1.16 : représentation du mouvement de la terre autour du soleil. [28]

I.6 Le spectre solaire :

La physique atomique nous montre que les variations d'énergie dans les atomes ne se font pas de façon continue, mais sont quantifiées. Un ensemble de nombres quantiques définit l'état initial d'énergie de l'atome, et un autre ensemble définit l'état final. Ce passage d'un état à un autre s'appelle une transition. Il s'accompagne soit de l'absorption d'énergie à une longueur d'onde précise si l'état final est plus énergétique, soit de l'émission d'énergie à une longueur d'onde précise si l'état final est moins énergétique. Un atome excité de cette façon a toujours tendance, au bout d'un temps plus ou moins long, à revenir à son état le plus stable, directement ou non, appelé état fondamental.

La relation entre cette variation d'énergie et la longueur d'onde de l'émission ou de l'absorption est [6]:

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

Où

h : est la constante de Planck ($6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s)

λ : longueur d'onde

c : la vitesse de la lumière

I.6.1 Les principaux types de rayons qui parviennent sur Terre et leurs effets :

Le soleil émet des particules, appelées photons, en très grandes quantités. C'est le rayonnement solaire. Ces flux de photons qu'on appelle également radiations ou rayons, voyagent dans l'espace à la vitesse de 300 000 km/s (c'est la vitesse de la lumière) et atteignent la terre à différentes longueurs d'ondes. On distingue par leur longueur d'onde les différents types de rayons : c'est le spectre solaire.

Les rayons de longueur d'ondes très courtes (les rayons x, gamma,), extrêmement dangereux sont heureusement arrêtés dès les couches supérieures de l'atmosphère.

Les rayons de longueur d'onde très longue (ondes radio) sont très faibles à la surface de terre.

Nous parviennent essentiellement :

- Les Ultraviolets (UV), de 200 nm à 400 nm, invisibles, sans échauffer, provoquent des dommages sur les cellules
- La Lumière visible, de 400 à 800 nm, visibles, ils nous permettent de distinguer les formes et les couleurs
- Les Infrarouges (IR), de 800 à 1400 nm, invisibles, chauffent la matière solide ou gazeuse qu'ils rencontrent. (**figure 1.17**)

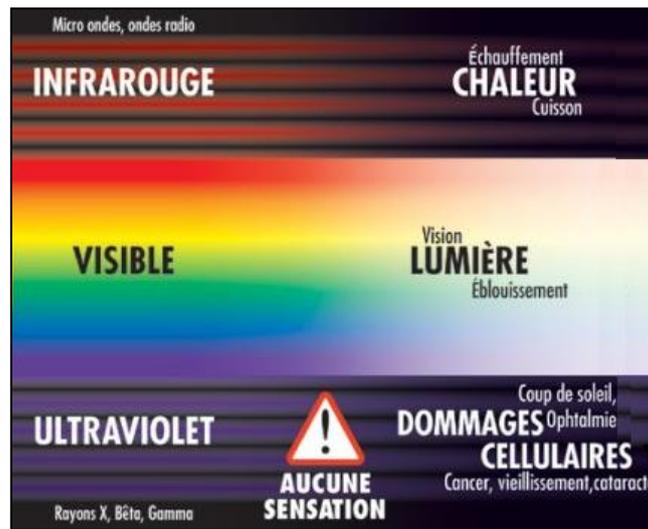


Figure 1.17 : représentation des rayons visibles et invisibles

Généralement le rayonnement émis par le soleil (AM0 : hors l'atmosphère de la terre) est constitué de 9% UV, 43% lumière visible et 48% d'infrarouge. [6]

I.6.2 Lumière :

La lumière désigne les ondes électromagnétiques visibles par l'œil humain, c'est-à-dire comprises dans des longueurs d'onde de 0,38 à 0,78 micron (380 nm (violet) à 780 nm (rouge) ; le symbole nm désigne le nanomètre. La lumière est intimement liée à la notion de couleur. C'est Newton qui propose pour la première fois au XVII^e siècle un cercle des couleurs chromatiques basé sur la décomposition de la lumière blanche.

Outre la lumière visible, par extension, on appelle parfois « lumière » d'autres ondes électromagnétiques, telles que celles situées dans les domaines infrarouge et ultraviolet.

Même si certaines formes de vies, au fond des océans peuvent s'en passer, la lumière du soleil est la première source d'énergie des écosystèmes terrestres, via la photosynthèse. Elle contrôle donc les cycles écogéobiologiques et le stockage fossile du carbone tels qu'ils existent depuis 3,7 milliards d'années. Elle joue aussi un rôle important en entretenant la couche d'ozone et en limitant la pullulation des microbes sensibles aux ultra-violets et/ou à l'infrarouge. Cette sensibilité est utilisée par certaines techniques de stérilisation. Elle contribue à certaines formes de pollution dites « photochimiques » (ozone troposphérique, oxydes d'azote) et inversement à dégrader (photodégradation) certains polluants de l'air, du sol superficiel ou de l'eau (certains pesticides présents dans l'air par exemple. C'est encore la lumière qui via la durée du jour corrige les horloges biologiques animales, par la production de mélatonine qui est une hormone uniquement produite la nuit, chez la plupart des animaux. Chez les plantes, la durée du jour contrôle aussi, avec la température, l'apparition des bourgeons, feuilles, fleurs, ou l'ouverture ou la fermeture des fleurs. C'est pourquoi la présence de lumière artificielle dans l'environnement nocturne peut altérer le comportement ou les fonctions de

Certaines espèces ou des écosystèmes ; phénomène généralement décrit sous le nom de « pollution lumineuse ».

I.6.3 La constante solaire et le nombre masse d'air AM :

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à 1367 W/m^2 . [30]

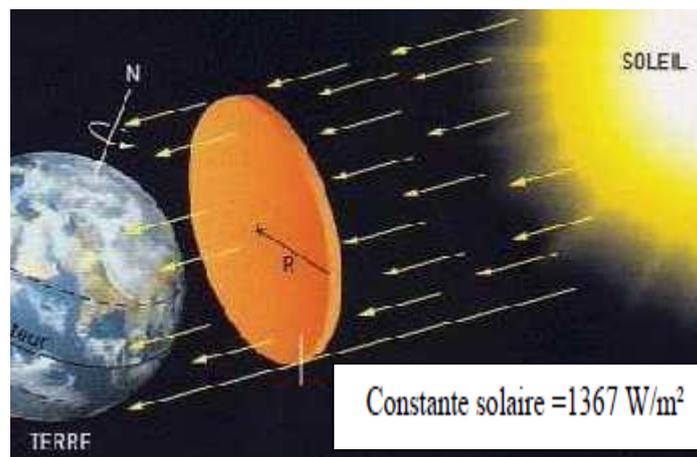


Figure 1.18 : la constante solaire

La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air AM. Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de 1000 W/m^2 et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à 1000 W/m^2 . Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil sur la surface de la terre : AM1.5G ou AM1.5D. Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith (correspondant à une inclinaison du soleil de 45° par rapport au zénith). Le « G » représente le rayonnement "global" incluant rayonnement direct et rayonnement diffus et la lettre « D » tient compte seulement du rayonnement direct. [30]

La figure ci-dessous représente le nombre de masse d'air :

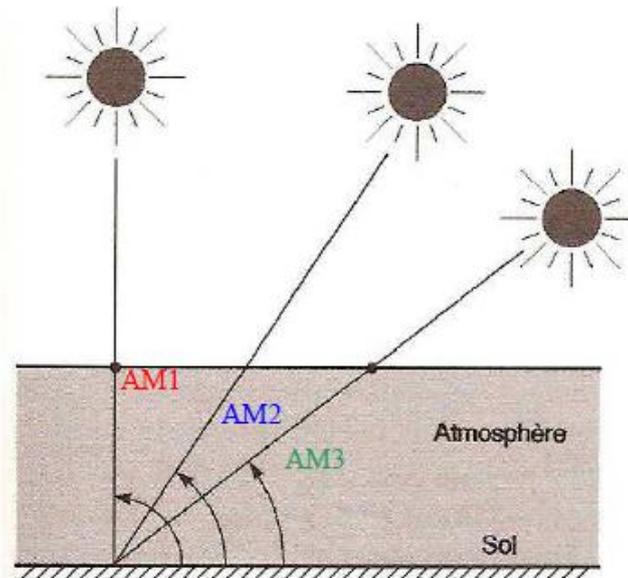


Figure 1.19 : le nombre de masse d'air

I-7 l'éclairement et l'irradiation :

I.7.1 L'irradiation ou rayonnement :

L'irradiation est l'énergie reçue par une surface. Elle s'exprime en $J\ m^{-2}$ (joule par mètre carré). L'ISES (International Solar Energy Society) recommande le symbole **H**. D'autres unités plus courantes sont le Wh/m^2 (wattheure par mètre carré) bien que ce dernier ne doit pas être utilisé puisque n'appartenant pas au système international d'unités (SI). [30]

I.7.2 L'éclairement ou irradiance :

L'éclairement est défini comme une puissance reçue par une surface. Il s'exprime en W/m^2 (watt par mètre carré). Le S.I. (système international d'unités) recommande d'utiliser le symbole **G**. [30]

Signalons que, outre l'incidence de l'atmosphère, l'irradiation solaire dépend :

- de l'orientation et l'inclinaison de la surface
- de la latitude du lieu et son degré de pollution,
- de la période de l'année et de l'instant considéré dans la journée
- de la nature des couches nuageuses.

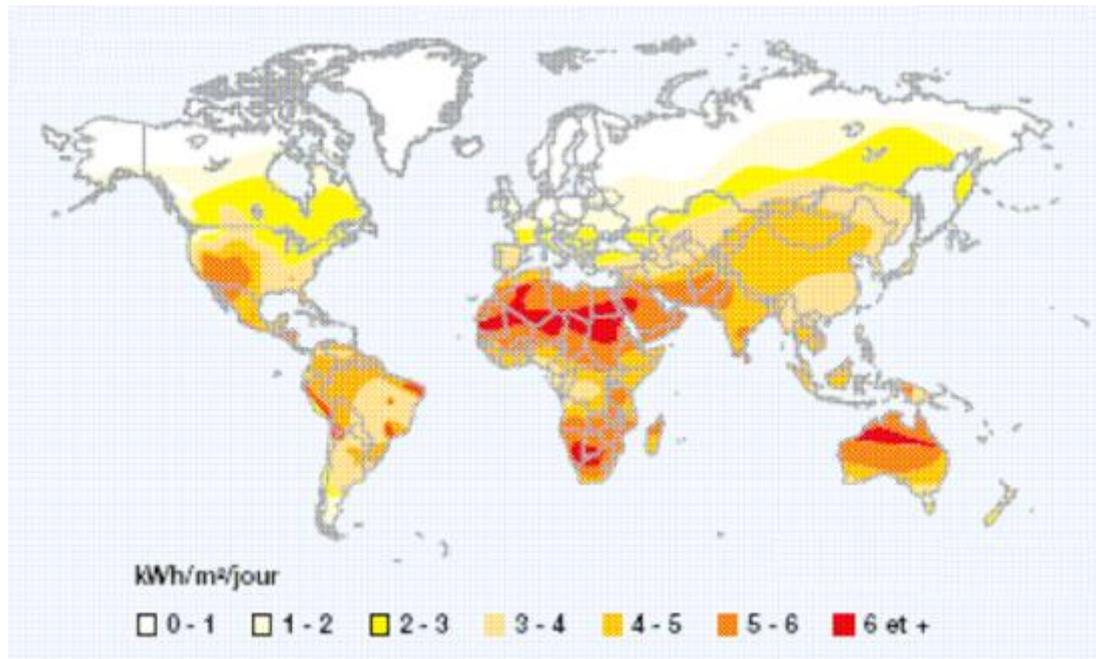


Figure 1.20 : Carte du monde de l'irradiation moyenne annuelle en kWh/m²/jour sur un plan horizontal. [37]

La terre reçoit chaque année une valeur moyenne de l'éclairement 1.36 KW/m², cette irradiance est pondérée par divers facteurs à la surface de la terre : absorption par les molécules des différentes couches de l'atmosphère, conditions climatiques, latitude du lieu d'observation et saison. Des gaz comme l'ozone (O₃), pour des longueurs d'ondes inférieures à 0.3 μm, le dioxyde de carbone (CO₂) et la vapeur d'eau (H₂O), pour les infrarouges au dessus de 2 μm, absorbent les énergies proches de leur énergie de liaison, ce qui conduit à des « trous » dans le spectre solaire visible au sol. Par ailleurs, les poussières et aérosols présents dans l'atmosphère conduisent à une absorption répartie quasiment sur toute la gamme spectrale, ce qui conduit à une baisse globale de la puissance incidente. Afin de comparer et d'unifier les performances des cellules photovoltaïques élaborées dans les différents laboratoires du monde, il a été institué la notion d'Air Mass (AM) a été définie dans la section I-6-3. [5]

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)} \quad (I.2)$$

Si le soleil est au zénith du lieu d'observation, $\theta=0^\circ$, $AM=1$: la notation est AM1. AM0 correspond à l'irradiance hors atmosphère.

L'intensité G reçue à la surface de la terre peut être calculée grâce à la formule empirique suivante [6] :

$$G = 1.353. (0.7^{AM})^{0.678} \quad (I.3)$$

Avec G en kW/m^2 , pour une surface perpendiculaire aux rayons incidents. Les spectres AM0 et AM1 sont représentés sur la figure 1.21.

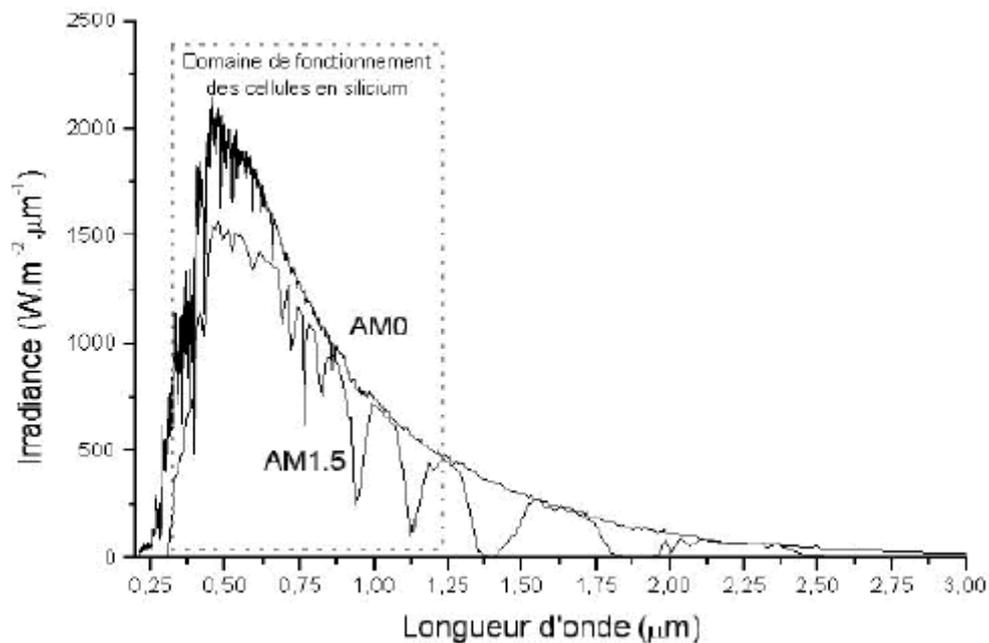


Figure 1.21 : représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5

I.8 situation de l'Algérie :

L'énergie solaire participe pour une très faible part dans le bilan énergétique national, soit seulement 0,02% de la consommation nationale d'électricité (5 GWh). Le pays est qualifié de très en retard en matière d'investissement dans le domaine des énergies renouvelables. Pourtant, l'Algérie dispose de l'un des gisements solaires les plus importants au monde (figure 1.22). Lors d'un séminaire organisé à Alger, par la Chambre algéro-allemande de l'industrie et du commerce, l'intention de concrétiser le vœu algérien a été clairement affichée par les Allemands. «Vu qu'à l'horizon 2010, environ 5% de l'électricité en Algérie sera produite par l'énergie solaire ».le projet consiste à ramener le taux de l'énergie renouvelable à 6% d'ici à 2015.

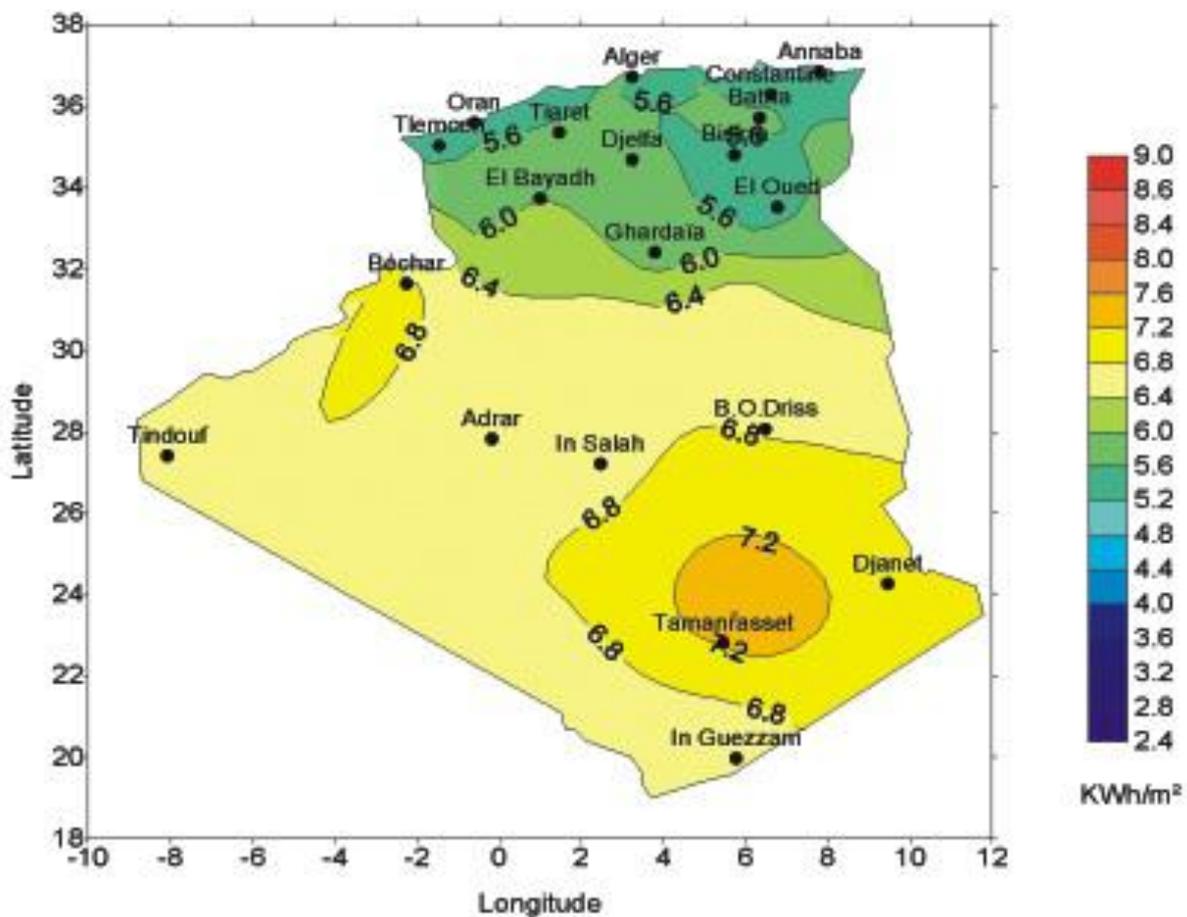


Figure I.22 : Irradiation solaire globale reçue par l'Algérie : moyenne annuelle. [37]

I.8.1 Potentiel solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur le quasi totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de $1700\text{KWh}/\text{m}^2/\text{an}$ au Nord et $2263\text{ kwh}/\text{m}^2/\text{an}$ au Sud du pays.

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'enselement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (Kwh/m ² /an)	1700	1900	2650

Tableau I.1 : les différents ensoleillements des régions Algériennes.

Ce gisement solaire dépasse les 5 milliards de GWh.

I.9 conclusion :

On a vu dans ce chapitre que l'énergie renouvelable est de plus en plus très répandue dans la production mondiale de l'électricité.

On a vu aussi les caractéristiques qui relient la terre au soleil et leur influence sur la production de l'énergie solaire. En plus de ça on a compris la lumière et le spectre solaire et la différente longueur d'onde.

L'Algérie comme on a vu précédemment est parmi les pays avantageux qui puissent utiliser l'énergie solaire comme solution de future pour remplacer l'énergie fossile, et pour cela il faut que tous les électrotechniciens orientent leurs perspectives vers l'énergie verte et solaire précisément en Algérie parce qu'il est non polluant et renouvelable.

II.1 introduction :

L'énergie solaire s'effectue à l'aide des générateurs PV ces derniers sont a base de silicium qu'il est la matière la plus disponible, il ce trouve dans la nature sous une forme de dioxyde de silice SiO₂.

Le silicium est un matériau semi-conducteur c'est-a-dire un matériau intermédiaire entre l'isolant et le conducteur, il est capable de convertir l'énergie lumineuse a une énergie électrique a l'aide des technologies de dopage de type N et de type P.

On va voir dans ce chapitre tous les caractéristiques du silicium ainsi leurs types et leurs utilisations.

On va entamer aussi l'étude d'une jonction PN leurs caractéristiques et étude de la mono jonction et l'hétérojonction

Finalement quelques études sur les semi conducteurs organique.

II.2 les semi-conducteurs :

II.2.1 Définition de semi-conducteur :

Les semi-conducteurs sont des éléments naturels. Sensibles à la lumière visible et invisible (rayon ultra violet, infrarouge..) ; Ils conduisent le courant nettement moins bien que les métaux, mais d'autant mieux que la température est plus élevée (Exemples types : le silicium Si, le germanium Ge) La bonne conductivité électrique des métaux est due à la présence des électrons libres du gaz électronique qui parcourent tout le réseau métallique.

Les semi-conducteurs (exemple : le silicium Si) forment des réseaux atomiques (du type diamant) où les atomes sont reliés par covalence ; Il n'existe pas d'électrons libres comme dans les métaux, La migration des électrons ne peut se faire que par « petits pas », les électrons sautant d'un atome à l'autre. [29]

Le semi-conducteur est un matériau électriquement intermédiaire entre isolant et conducteur. En effet, les valeurs usuelles de la conductivité (σ) des isolants sont comprises entre $1.e-11$ et $1.e-19$ S/cm et celles des conducteurs entre $6.e7$ et $1.e4$ S/cm. Il existe pourtant des corps qui ont une résistivité intermédiaire comprise entre $1.e3$ et $1.e-6$ S/cm, on les appelle des **semi-conducteurs**. [26]

Dans notre étude on utilise le silicium comme un semi -conducteur et son structure atomique électrique est présentée dans **la figure 2.1** :

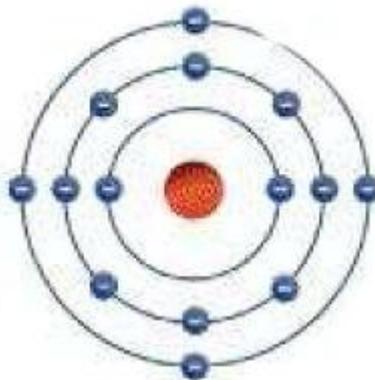


Figure 2.1: Structure électronique d'un atome de silicium.

On remarque qu'il y a 4 électrons libres dans la couche m, pour cela on peut lui faire dopé avec des atomes de valence 3. [29]

II.2.2 les types des semi-conducteurs et l'emplacement dans le tableau du Mendeleïev :

Les semi-conducteurs sont essentiellement constitués d'éléments de la colonne IV et des colonnes voisines du tableau périodique de Mendeleïev. On en distingue plusieurs types :

– les semi-conducteurs élémentaires sont des cristaux constitués d'un seul élément chimique. On rencontre des structures cristallines dites "simples" si l'élément constituant est de la colonne IV. Les deux éléments les plus importants pour l'électronique sont le silicium (Si) et le germanium (Ge), qui se cristallisent en engageant des liaisons covalentes. Le premier est l'élément le plus utilisé dans l'industrie des composants. Le germanium, quant à lui, a été largement utilisé lors de fabrication des premières diodes et des premiers transistors, mais a été ensuite remplacé par le silicium. Il est néanmoins utilisé dans quelques applications (détection infrarouge, hétéro-structures, . . .).

On rencontre également des semi-conducteurs dits "élémentaires complexes" comme le sélénium (Se, colonne VI), notamment employé pour ses propriétés photovoltaïques.

Cet élément se cristallise selon une structure différente de celle du Si, mais toujours avec des liaisons à prédominance covalente.

– Les semi-conducteurs composés sont constitués de plusieurs éléments. Par exemple, les composés binaires peuvent être constitués de deux éléments distincts de la colonne IV (SiC, SiGe), d'éléments des colonnes III et V (composés III-V tels que le GaAs et le GaN) ou encore des éléments des colonnes II et VI (composés II-VI tels que le ZnS et le CdS). [20]

La figure 2.2 nous présente l'emplacement de silicium et le germanium dans le tableau périodique des éléments physique de Mendeleïev.

	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>	<u>7</u>	<u>8</u>	<u>9</u>	<u>10</u>	<u>11</u>	<u>12</u>	<u>13</u>	<u>14</u>	<u>15</u>	<u>16</u>	<u>17</u>	<u>18</u>
<u>V</u>	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	VIII	VIII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
	A	A	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A

1																	2	
1	H																	He
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og

Silicium ———→

Germanium ———→

Lanthanides	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
Actinides	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

⊕	Métaux alcalins	Métaux alcalino-terreux	Lanthanides	Actinides	Métaux de transition
	Métaux pauvres	Métalloïdes	Non-métaux	Halogènes	Gaz nobles

Figure 2.2 : Tableau périodique des éléments de Mendeleïev

Ces matériaux sont des semi-conducteurs solides inorganiques. On peut également rencontrer des semi-conducteurs organiques, notamment utilisés pour la fabrication d'écrans souples. [20]

- (on va étudier les semi-conducteurs organiques dans la fin de ce chapitre).

II.2.3 le silicium :

Le silicium (Si) est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, il est disponible à un niveau industriel. Le silicium est fabriqué à partir de sable quartzeux (dioxyde de silicium). [30]

II.2.3.1 les différents types de silicium : [32]

Le silicium cristallin est une technologie éprouvée et robuste, dont l'espérance de vie est à peu près de trente ans, dont le rendement était de l'ordre de 13 % au début de la création de cette source d'énergie. On obtient désormais des rendements atteignant plus de 20 % pour certaines technologies. Ces cellules sont adaptées à des puissances de quelques centaines de watts à quelques dizaines de kilowatts. Elles représentaient près de 80 % de la production mondiale de panneaux photovoltaïques en 2000. Le silicium cristallin se divise lui-même en trois catégories :

- **Mono cristallin :**

Tout d'abord, le silicium à l'état brut est fondu pour donner un barreau. Le refroidissement du silicium doit être lent et maîtrisé pour obtenir un mono cristal. Un wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium. Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction P-N que nous étudierons plus tard, dépôt de couche antireflet, pose des collecteurs), le wafer devient une cellule. Son procédé de fabrication est long, exigeant en énergie et onéreux. Il est cependant plus efficace que le silicium poly cristallin car son rendement est de 17.2%.

- **Poly cristallin :**

Le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure poly-cristalline. Grâce à leur potentiel de gain de productivité, ces cellules se sont aujourd'hui imposées : elles représentaient 49 % de l'ensemble de la production mondiale en 2000. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium mono cristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication. Le rendement des panneaux poly cristallins est d'environ 13%.

- **Le silicium amorphe :**

Celui-ci a des coûts de fabrication bien inférieurs à ceux du silicium cristallin. Les atomes ou molécules qui constituent un matériau amorphe sont disposés aléatoirement les uns par rapport aux autres. La position relative des molécules ou atomes voisins est imposée par la nature des liaisons assurant la cohésion du solide. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une alternative économique est recherchée, ou, quand très peu d'électricité est nécessaire (alimentation des montres, calculatrices...). Elles sont également souvent utilisées là où un fort échauffement des modules est à prévoir. Cependant, le rendement est de plus de 2 fois inférieur à celui du silicium

Cristallin et nécessite donc plus de surface pour la même puissance installée. Les cellules en silicium amorphe sont actuellement de moins en moins utilisées : 9,5 % de la production mondiale en 2000, alors qu'elles représentaient 12 % en 1999.

II.2.3.2 Structure cristalline du silicium :

Une structure cristalline est constituée d'un assemblage régulier d'atomes (**Figure 2.3**) ; Ils mettent en commun des électrons de leur couche périphérique pour constituer des liaisons Covalentes ; La couche électronique périphérique assure la stabilité de l'atome, Elle est complète lorsqu'elle comporte 8 électrons pour atteindre la saturation (la couche périphérique ne peut en comporter d'avantage). [29]

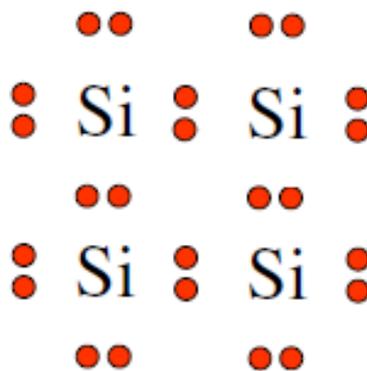


Figure.2.3 : structure cristalline de silicium.

II.2.3.3 diagramme de bande d'énergie :

La situation peut être résumée au moyen du diagramme de bandes d'énergie illustré à la fig. 1.4. Celle-ci montre les niveaux énergétiques que peuvent occuper les électrons périphériques issus des atomes du cristal. Les niveaux sont repartis en deux bandes : la bande inférieure, appelée bande de valence est réservée aux électrons participant aux liaisons covalentes ; la bande supérieure, ou bande de conduction, est occupée par les électrons de conduction. Les bandes sont séparées par une région inoccupée appelée bande interdite, dont la largeur correspond à l'énergie du gap E_g , au zéro absolu de la température, les électrons participent tous aux liaisons covalentes et occupent la bande de valence, cf. **figure 2.4(a)**. La bande de conduction est vide et le matériau ne peut conduire un courant électrique. [20]

Lorsque la température augmente, des paires électron-trou sont générées : plusieurs électrons de la bande de valence gagnent de l'énergie et transitent vers la bande de conduction. Les vacances de charge résultantes dans la bande de valence correspondent aux trous, cf. **fig. 2.4 (b)**. Sous l'action d'un champ électrique, les électrons de conduction peuvent gagner de l'énergie cinétique : ils transitent alors, au sein de la bande de conduction, vers des niveaux d'énergie E plus élevés. Les trous peuvent également gagner de l'énergie cinétique en transitant au sein de la bande de valence. [20]

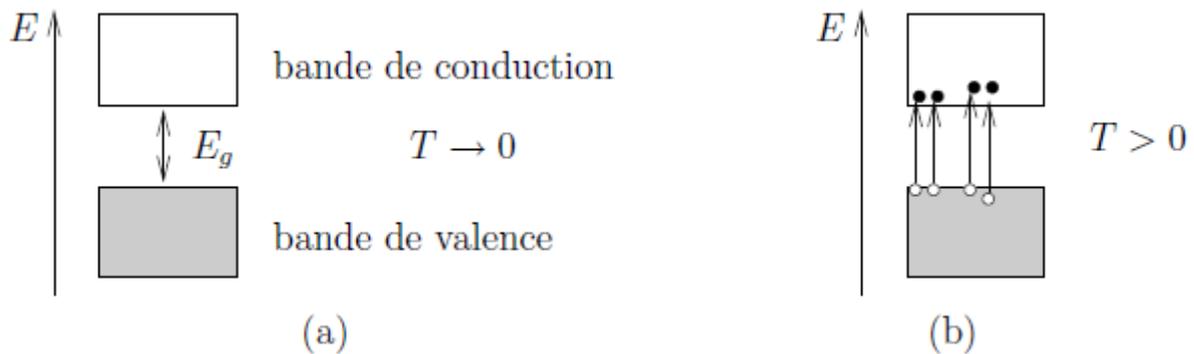


Figure 2.4 : Diagramme de bandes d'énergie du silicium.

II.2.4 la conduction dans le silicium et le niveau de Fermi :

II.2.4.1 conduction par électron et par trou :

Si une liaison de valence est brisée (agitation thermique, photon ...) l'électron devient mobile : il laisse un excès de charge positive le « trou » (symbolisé par un + dans un carré). Cette lacune va être comblée par un électron voisin libéré par agitation thermique et qui va à son tour laisser un trou : ceux-ci semblent se déplacer dans le réseau. Aux électrons (masse positive, charge négative) correspondent des trous (masse négative, charge positive). Le déplacement des trous étant un processus à deux étapes, leur mobilité dans le réseau est plus faible que celle des électrons.

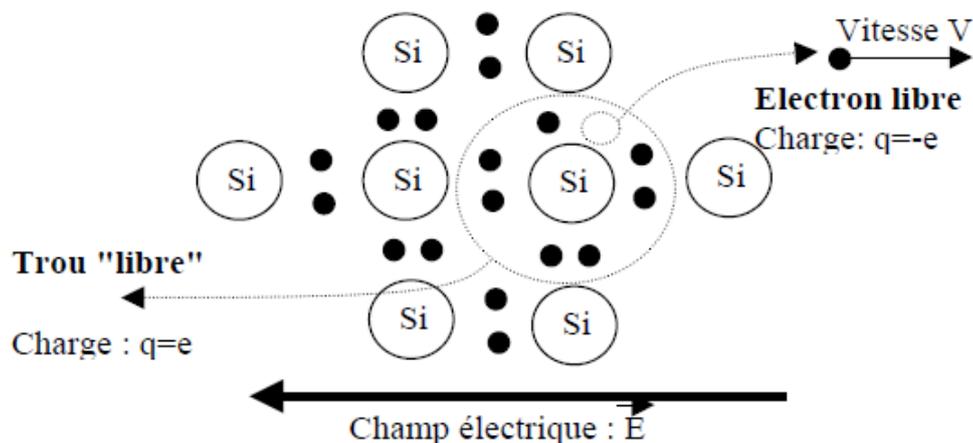


Figure 2.5 : la conduction dans le silicium [26]

Dans la matière, le courant généré par le champ électrique sera la somme du courant d'électrons et du courant de trous. [26] Comme elle représente la figure II.6

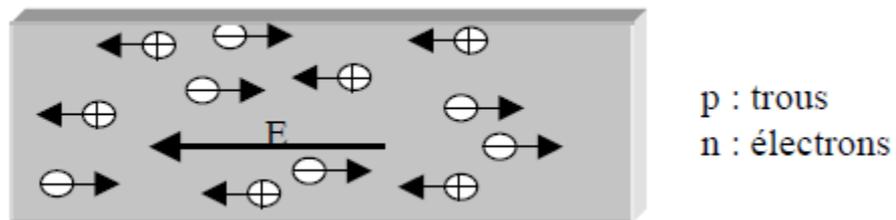


Figure 2.6 : le courant généré par le champ électrique [26]

On trouve que :
$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_p + \mathbf{J}_n \quad (\text{II.1})$$

\mathbf{J} : la densité du courant dans le silicium.

\mathbf{J}_p : la densité du courant généré par les trous.

\mathbf{J}_n : la densité du courant généré par les électrons.

L'aptitude à la conduction électrique est chiffrée par la conductivité σ du matériau qui est l'inverse de la résistivité ($\sigma = 1/\rho$) et qui relie la densité de courant \mathbf{J} au champ électrique \mathbf{E} . [26]

$$\mathbf{J} = \sigma \cdot \mathbf{E} \quad (\text{II.2})$$

Or, pour chaque type de porteurs :
$$\mathbf{J} = q \cdot n \cdot \mathbf{V} \quad (\text{II.3})$$

Où \mathbf{V} est la vitesse moyenne des porteurs, n la densité des porteurs libres.

\mathbf{V} est lié au champ électrique par un coefficient appelé la mobilité.

$$\mathbf{V} = \mu \cdot \mathbf{E} \quad (\text{II.4})$$

Donc : $\mathbf{J} = q \cdot n \cdot \mu \cdot \mathbf{E}$ pour chaque type de porteurs.

Dans le cas d'une conduction dite "bipolaire", c'est à dire avec deux types de charges (électrons et trous) et avec n et p les concentrations respectives en porteurs libres :

$$\mathbf{J} = (\mu_n \cdot n + \mu_p \cdot p) \cdot e \cdot \mathbf{E} \quad (\text{II.5})$$

$$\sigma = (\mu_n \cdot n + \mu_p \cdot p) \cdot e \quad (\text{II.6})$$

Si le semi-conducteur est extrêmement pur, $n = p$. [26]

II.2.4.2 le niveau de Fermi E_F :

La valeur E_f s'appelle Énergie de Fermi. C'est l'énergie maximale des états occupés par les électrons au zéro absolu. Sa valeur dépend du nombre d'électrons de valence et de la densité d'états accessibles ; elle est donc caractéristique du matériau. Dans les semi-conducteurs, le niveau correspondant à cette énergie (le niveau de Fermi) se trouve dans le gap. Cela a pour conséquence qu'à 0 K, la bande de valence est pleine tandis que la bande de conduction est vide. Lorsque la température augmente, certains électrons sont capables de dépasser le niveau de Fermi et donc d'atteindre la bande de conduction.

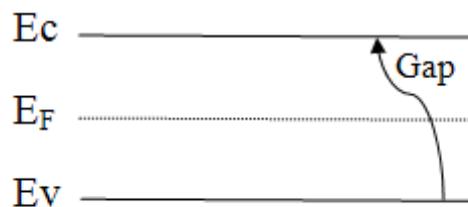


Figure 2.7 : le niveau de Fermi

II.2.4.3 Procédés de production du silicium pur :

L'état initial du silicium est le Quartz, et pour passer de l'état origine (quartz) vers le silicium pur il faut suivre plusieurs étapes dans un niveau élevé de conversion.

Le silicium pur se divise en deux types :

- Si qualité solaire
- Si qualité semi-conducteur

Les procédés conduisant à la qualité solaire sont résumés au schéma de **la figure 2.8** par comparaison à la réduction carbothermique à la base de la production du silicium de qualité semi-conducteur (l'utilisation électronique). [22]

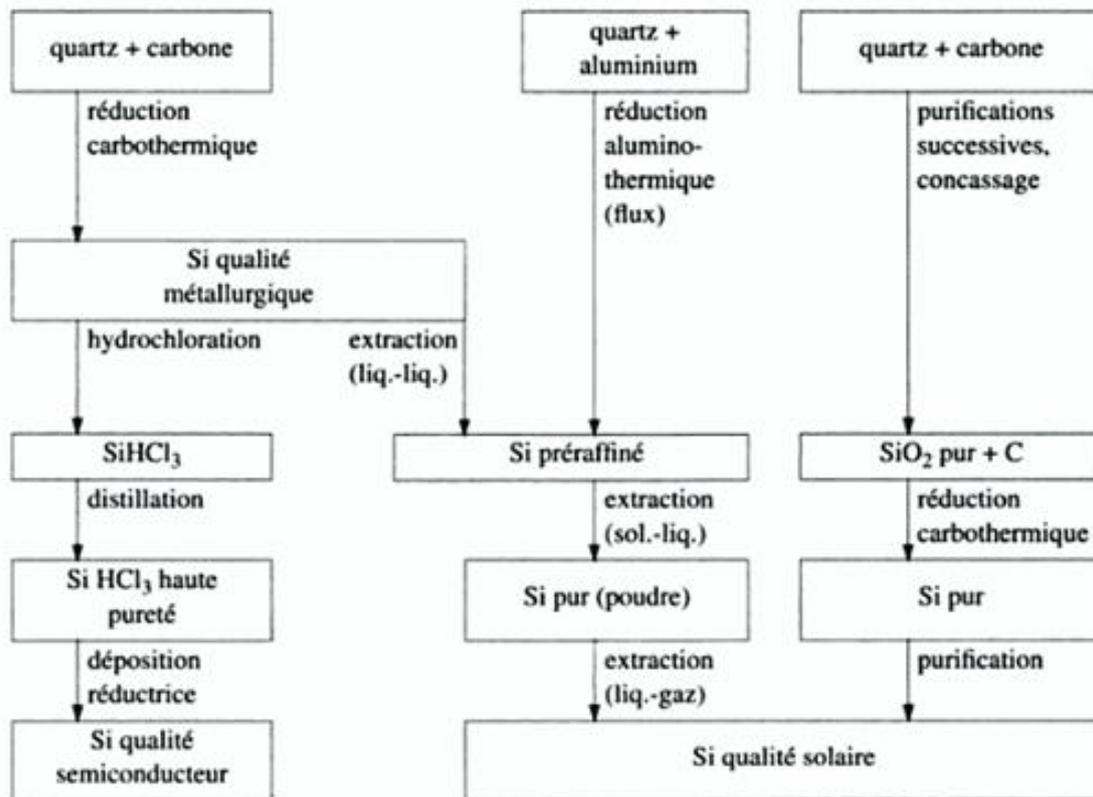


Figure 2.8 : schéma représentatif des procédés de production du silicium pur. [22]

II.2.5 le dopage :

Le silicium à l'état pur est un semi-conducteur intrinsèque, avec un niveau de Fermi (E_F) placé au milieu du "gap", entre une bande de valence pleine (BV) et une bande de conduction vide (BC). Vis à vis des propriétés de conduction, il est nécessaire de posséder des porteurs mobiles pour permettre l'établissement d'un courant électrique. Avec une BC vide, une BV totalement remplie et aucun état permis dans le gap, la seule possibilité n'est la génération thermique de paires électrons-trous à travers tout le gap du semi-conducteur. Avec un gap de 1,1eV et $T = 300K$, la probabilité de générer une telle paire est extrêmement faible. De plus le gap du silicium étant indirect (déphasé dans l'espace réciproque), il n'est pas possible de générer ces paires directement avec une source de lumière : un couplage avec les phonons est nécessaire et la probabilité de cet événement est encore plus rare. Le silicium pur est donc extrêmement résistif à température ambiante. [24]

- l'ajout de phosphore (cinq électrons de valence - (K)2 (L)8 (M)5) au silicium (quatre électrons de valence - (K)2 (L)8 (M)4) se traduit par un excès d'électrons dans le réseau : cette association forme alors un semi-conducteur de type N (conduction assurée par des charges négatives).

- l'ajout d'aluminium (trois électrons de valence - (K)2 (L)8 (M)3) au silicium se traduit par un défaut d'électrons formant des trous dans le réseau: il s'agit alors d'un semi-conducteur de type P (conduction assurée par des charges positives).

Le dopage est un moyen d'augmenter la conductivité électrique du corps. Les atomes du matériau de dopage, ou dopant (donneurs ou accepteurs d'électrons), et ceux de l'hôte ont un nombre différent d'électrons périphériques. Le dopage produit ainsi des particules électriques chargées positivement (type P) ou négativement (type N). [32]

II.2.5.1 Semi-conducteur dopé N :

En choisissant un dopant de valence 5 (phosphore, arsenic, antimoine), le semi-conducteur contient des électrons excédentaires qui traduisent des charges négatives supplémentaires : le semi-conducteur est de type N.

A température ambiante, tous les atomes dopants sont ionisés, mais le matériau reste neutre. Chacun a libéré un électron qui circule dans le réseau. On distingue alors deux types de porteurs de charges :

- Des électrons libres.
- Des ions positifs fixes (les atomes dopants qui perdent un électron) [29].

Dans le silicium de type N, des atomes de phosphore (P) à cinq électrons périphériques remplacent des atomes de silicium : ils offrent donc des électrons (des charges négatives) supplémentaires (un par atome de phosphore). **Figure 2.9.a**

II.2.5.2 Semi-conducteur dopé P :

En substituant des atomes de valence 3 (bore, aluminium, gallium, indium) [29], des électrons manquant pour compléter les couches périphériques voisines.

Ceci entraîne la présence de charges positives excédentaires : le semi-conducteur est dopé P (ou type P) ; a température ambiante, tous les atomes dopants sont ionisés. Chacun a généré un trou qui est libre de circuler dans le réseau. Tout en restant globalement neutre, on distingue donc deux types de porteurs de charges :

- Des trous libres.
- Des ions négatifs fixes (les atomes dopants qui gagnent un électron). [29]

Dans le silicium de type P, des atomes d'aluminium (Al) avec trois électrons périphériques entraînent un défaut d'électrons (création de charges positives) et engendrent la formation de trous (un par atome d'aluminium). Les électrons en excès ou les trous conduisent l'électricité. Lorsque des zones de semi-conducteurs de type P et de type N sont adjacentes, elles forment une diode ; la zone de contact est appelée jonction P-N. **figure 2.9.b**

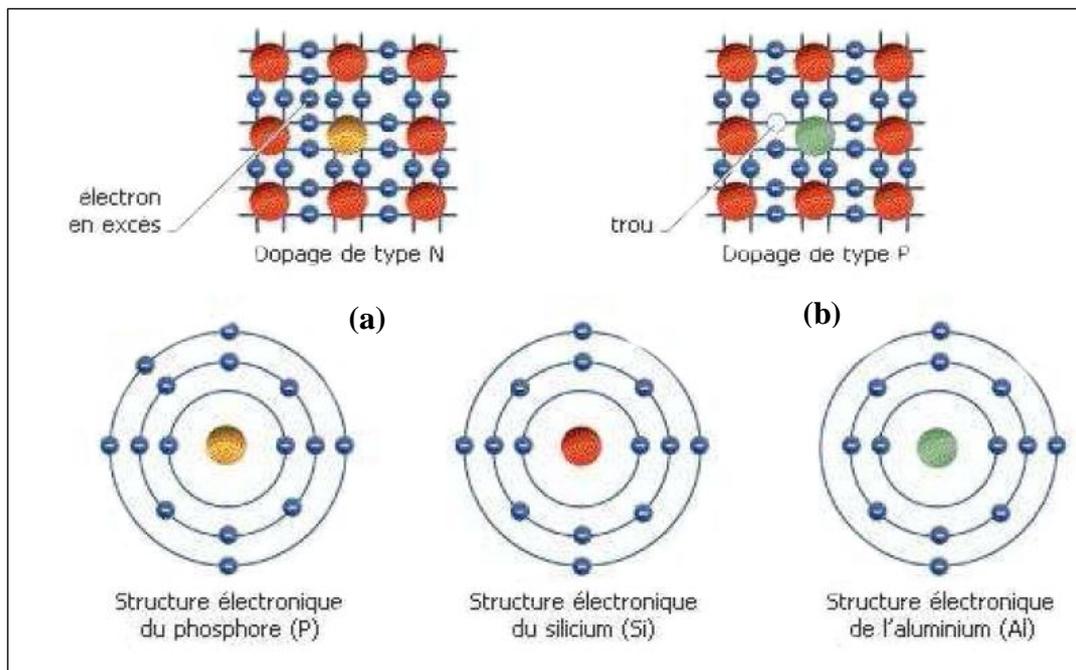


Figure 2.9 : Le dopage N et P du silicium [32]

II.2.5.3 niveau donneurs et niveau accepteurs :

Le dopage provoque l'apparition de nouveaux niveaux donneurs et accepteurs d'électrons dans la structure de bande du matériau dopé. Ces niveaux apparaissent dans le gap, entre la bande de conduction et la bande de valence.

Lors d'un dopage *N* (figure 2.10), l'introduction d'atomes donneurs d'électrons entraîne l'apparition d'un pseudo niveau d'énergie situé juste sous la bande de conduction. Ainsi, l'énergie nécessaire pour que les électrons passent dans la bande de conduction est bien plus facilement atteinte que dans un semi-conducteur intrinsèque.

Lors d'un dopage *P* (figure 2.11), l'introduction d'atomes accepteurs d'électrons entraîne, de manière analogue, l'apparition d'un pseudo niveau situé au-dessus de la bande de valence. L'énergie à fournir aux électrons de valence pour passer sur ce niveau accepteur est faible, et le départ des électrons entraîne l'apparition de trous dans la bande de valence.

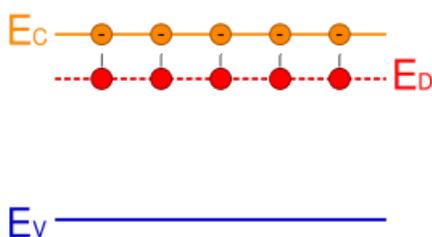


Figure 2.10 : niveau donneurs

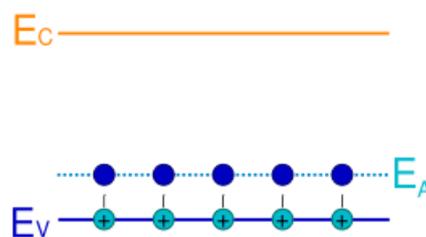


figure 2.11 : niveau accepteurs

II.2.6 la jonction PN :

Une jonction PN est constituée de deux zones respectivement dopées P et N et juxtaposées d'une façon que nous supposons abrupte (**figure 2.12.a**), c'est-à-dire que la transition de la zone P à la zone N se fait brusquement. Lorsque l'on assemble les deux régions, la différence de concentration entre les porteurs des régions P et N va provoquer la circulation d'un courant de diffusion tendant à égaliser la concentration en porteurs d'une région à l'autre. Les trous de la région P vont diffuser vers la région N laissant derrière eux des atomes ionisés, qui constituent autant de charges négatives fixes. Il en est de même pour les électrons de la région N qui diffusent vers la région P laissant derrière eux des charges positives. Il apparaît aussi au niveau de la jonction une zone contenant des charges fixes positives et négatives. Ces charges créent un champ électrique E qui s'oppose à la diffusion des porteurs de façon à ce qu'un équilibre électrique s'établisse. [25]

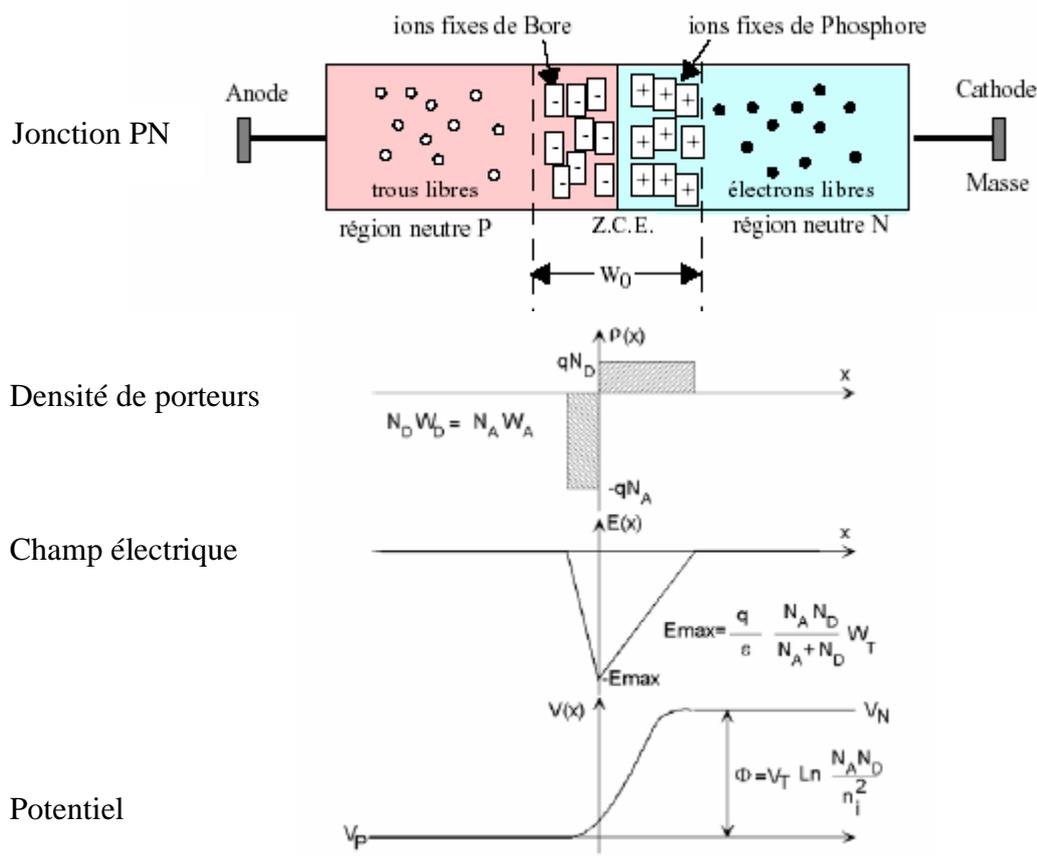


Figure 2.12.a : Représentation d'une jonction PN à l'équilibre thermodynamique. [25]

ρ : la zone de charge spatiale.

E: la courbe de champ électrique.

V : potentiel d'une jonction PN.

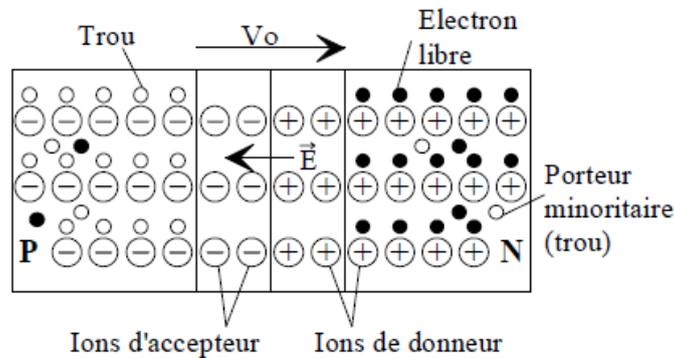


Figure 2.12.b : Coupe transversale d'une jonction PN

II.2.6.1 Polarisation d'une jonction PN :

II.2.6.1.1 La jonction PN polarisée en sens inverse

Le dipôle constitué par le cristal de semi-conducteur divisé par la jonction PN est une diode dont l'anode correspond à la zone P et la cathode à la zone N. En reliant la zone P à la borne - d'une source de tension continue et la zone N à la borne +, les porteurs de charges s'éloignent de la jonction et la jonction devient quasiment isolante. La diode est dite polarisée en sens inverse, le courant qui la parcourt est très faible, il est dû aux porteurs minoritaires. **Figure.2.13**

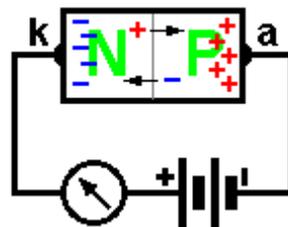


Figure 2.13 : Polarisation inverses

II.2.6.1.2 La jonction PN polarisée en sens direct

En reliant l'anode de la diode (zone P) au + de la pile et la cathode (zone N) au - les porteurs de charge traversent la jonction et un courant élevé parcourt le circuit. La différence de potentiel entre les zones P et N provoquée par la source de courant continu à la zone de transition doit être suffisamment élevée pour annuler la différence de potentiel (quelques dixièmes de volts) présente dans la jonction à l'état d'équilibre. **Figure 2.14**

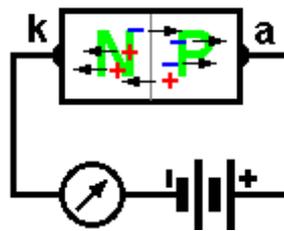


Figure 2.14 : polarisation direct

II.2.6.2 l'hétérojonction :

Le terme hétérojonction désigne la jonction entre deux semi-conducteurs de gaps différents. Il s'agit d'une jonction épitaxiale, c'est à dire, obtenue par croissance directe d'un cristal semi-conducteur sur un plan réticulaire de surface d'un autre cristal. Une telle croissance ne peut se faire que si les constantes de réseau des deux Semi-conducteurs sont suffisamment proches, de manière à éviter la présence de défauts (p. ex. dislocations) à la jonction. Une hétérojonction peut, par exemple, être réalisée en faisant croître un cristal de AlAs sur du GaAs car leur constantes de réseau sont toutes les deux de l'ordre de 5.65 \AA . Le diagramme de bande de l'hétérojonction résultante est représenté schématiquement ci-dessous. Par définition, les niveaux de Fermi des deux composés s'alignent à l'équilibre (mise à niveau du potentiel électrochimique). Dès lors, puisque le gap de l'AlAs est plus grand que celui du GaAs, les bandes de conduction et de valence se raccordent en formant deux marches de potentiel. Puisque les constantes de réseau des deux cristaux ne sont pas exactement les mêmes, la densité de porteurs n'est pas la même de part et d'autre de l'hétérojonction (il y a plus de porteurs du côté de la constante de réseau la plus faible, le rapport des densités étant donné par le rapport de constantes de réseau au cube). La diffusion naturelle des porteurs tend alors à homogénéiser la concentration de porteur (les porteurs vont là où ils sont le moins nombreux au départ; vers l'AlAs dans l'exemple ci-dessous) et crée ainsi une charge d'espace qui courbe les bandes de conduction et de valence au voisinage de la jonction. Les marches de potentiel ainsi créées ont une hauteur donnée approximativement par la moitié de la différence des gaps des deux semi-conducteurs. [21]

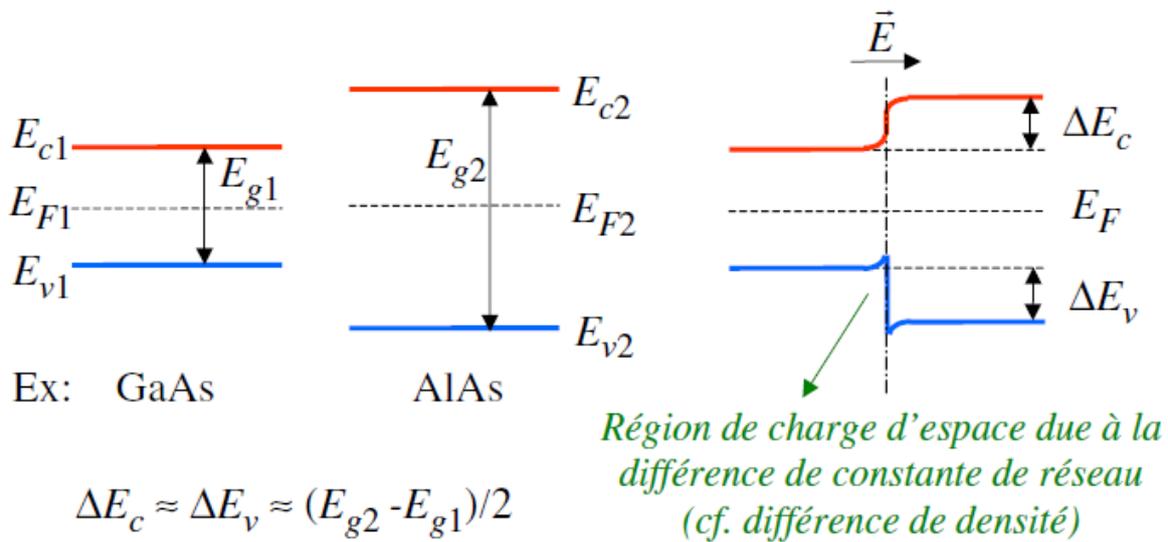


Figure 2.15 : représentation de la bande d'énergie d'une hétérojonction GaAs/AlAs

II.3 les semi-conducteurs organiques :

Tous les matériaux organiques sont des solides moléculaires dans le sens qu'ils sont formés par l'assemblage de molécules. Les liaisons entre molécules généralement assez faibles et surtout les faibles intégrales de transfert électronique entre unités moléculaires permettent aux molécules de garder leurs propriétés individuelles qu'elles ont dans la phase gazeuse. Ainsi les propriétés électroniques des matériaux organiques portent les marques de la physique moléculaire aussi bien que celles de la physique de la matière condensée. Mise à part quelques solides moléculaires comme la bisphthalocyanine de Lutétium (Pc2Lu), les matériaux organiques ne sont pas des semi-conducteurs au sens usuel du terme. En effet il y a très peu de charges libres dans ces matériaux et c'est la raison pour laquelle presque toutes les charges sont généralement injectées à partir d'électrodes dans les dispositifs organiques. [23]

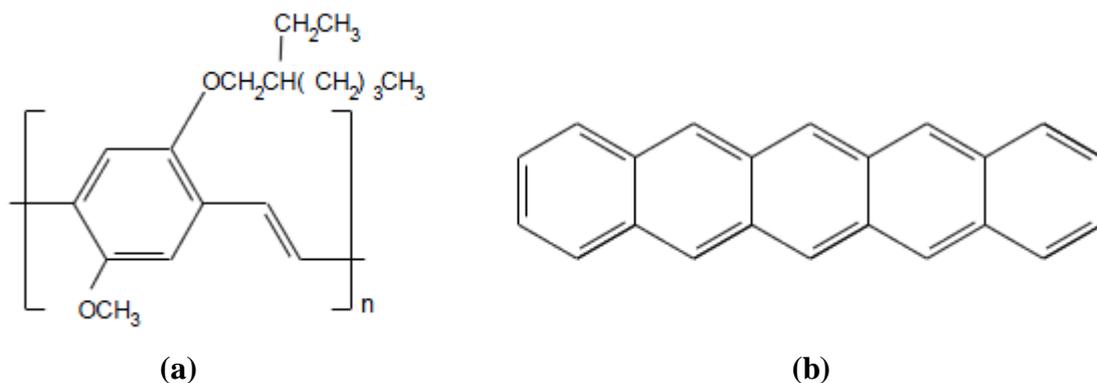


Figure 2.16 : chaîne de polymère (a) et molécule de pentalène (b)

Plusieurs raisons justifient l'utilisation des matériaux organiques pour la fabrication des cellules photovoltaïques. La plus importante se trouve dans les avantages particuliers de ces matériaux : ils peuvent être mis en forme facilement, par voie sèche (évaporation sous vide) ou par voie humide (Tournette, jet d'encre), avec des techniques simples, issues de l'industrie de la microélectronique. De plus, les quantités de matériaux utilisés sont relativement petites, les films ayant des épaisseurs de l'ordre de 100 nm. [10]

Une cellule Photovoltaïque Organique (OPV) est généralement fabriquée sur un substrat de verre recouvert d'ITO (couche mince 150 nm). Ce substrat constitue l'anode du dispositif. Parfois, on remplace le verre par une feuille plastique souple recouverte également d'ITO. Les cellules ont des dimensions de quelques cm², ce qui est suffisant pour les caractériser. Elles mettent en œuvre deux types de matériaux organiques qui ont des électronégativités différentes. Le plus avide d'électrons est qualifié d'accepteur (A), l'autre, celui qui cède facilement ses charges négatives, est appelé donneur (D). Il est d'usage de classer les matériaux selon leur masse molaire M_w . Pour des valeurs de M_w élevées, on a des composés macromoléculaires (polymères), alors que pour des masses molaires plus petites, on les qualifie de matériaux moléculaires. Les polymères ne peuvent pas être déposés par évaporation sous vide. Un exemple de matériaux accepteur (PCBM, matériau moléculaire) et donneur (P3HT, polymère). [10]

II.3.1 Caractère semi conducteur des matériaux organiques

L'appellation électronique 'organique' recouvre deux types de composants, ceux à base de petites molécules et ceux à base de polymères. La différence entre ces matériaux se situe au niveau de la taille de la molécule. Un polymère est une macromolécule dont la structure se répète régulièrement en de longues chaînes constituées d'entités élémentaires; les monomères. Les petites molécules regroupent des oligomères qui ne sont constitués que de quelques monomères. Leur fonctionnement physique est le même, mais les méthodes de fabrication diffèrent.

- Les petites molécules sont déposées par évaporation sous vide. C'est une technique qui présente l'avantage de donner des films minces relativement ordonnés, le transfert de charges intermoléculaire est donc facilité.
- Les polymères, sont par contre mis en oeuvre par des techniques de type voie humide: tournette, tirage. La simplicité de ces techniques de fabrication confère aux polymères un intérêt croissant. Cependant, la structure des films moléculaires obtenue est faiblement organisée, ce qui n'aide pas au transport de charges.

Le principal constituant des semi conducteurs organiques est l'atome de carbone comme il est indiqué sur la figure 2.17, et c'est la nature des liaisons entre les atomes de carbones qui leur confère ce caractère semi conducteur.

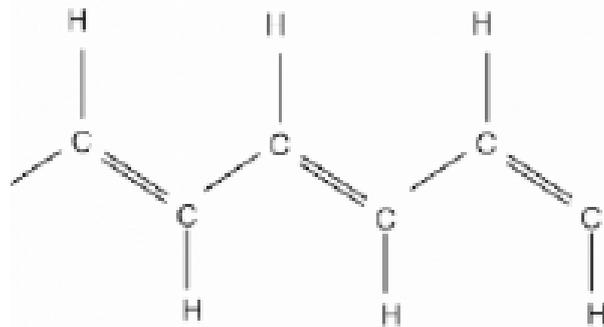


Figure 2.17: La base structurale des matériaux organiques [2-38].

Les matériaux semi conducteurs organiques sont constitués d'oligomères ou polymères conjugués. Ces derniers présentent une alternance de liaisons simples et de doubles liaisons. Dans la plupart des molécules conjuguées, l'origine de ces liaisons provient de l'association de deux atomes de carbone hybridés, comme il est illustré sur **la figure 2.18**:

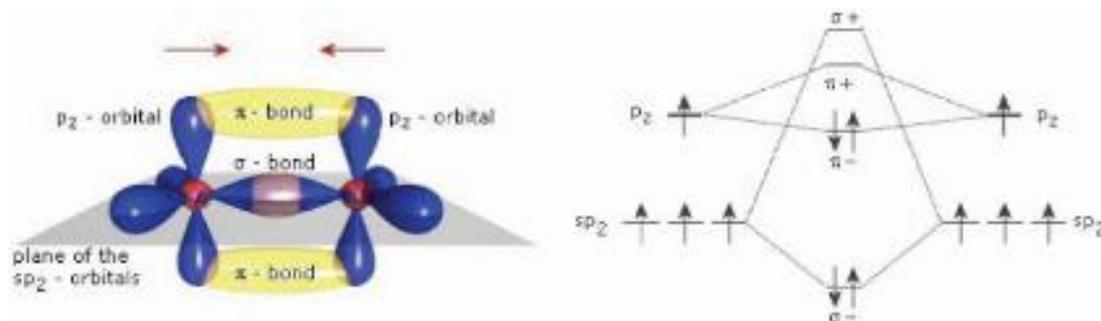


Figure 2.18 : Association de deux atomes de carbone le recouvrement des orbitales [2-38].

Quand on associe n atomes de carbone, leur interaction produit n orbitales moléculaires liantes et anti-liantes (π et σ), qui sont réparties en des ensembles disjoints. Elles constituent les bandes permises pour les électrons, dans l'espace des énergies.

Le recouvrement entre les orbitales π étant moindre que celui entre orbitales σ , l'énergie de séparation entre les liaisons π et π^* est plus petite que celle entre σ et σ^* . Notre attention sera donc portée sur l'étude des bandes orbitales moléculaires π (liantes) et π^* (anti-liantes) entre lesquelles sont distribuées énergétiquement les plus hautes orbitales moléculaires occupées (HOMO) et les plus petites orbitales moléculaires inoccupées (LUMO). Sémantiquement, ces états sont aussi définis comme bande de valence (BV – le plus haut niveau d'énergie rempli) et bande de conduction (BC – le plus petit niveau énergétique vide ou partiellement occupé). [2]

Les orbitales liantes donnent la bande HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) et les orbitales anti-liantes, la bande LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital). Elles sont apparentées dans **la figure 2.19** respectivement à la bande de valence et à la bande de conduction.

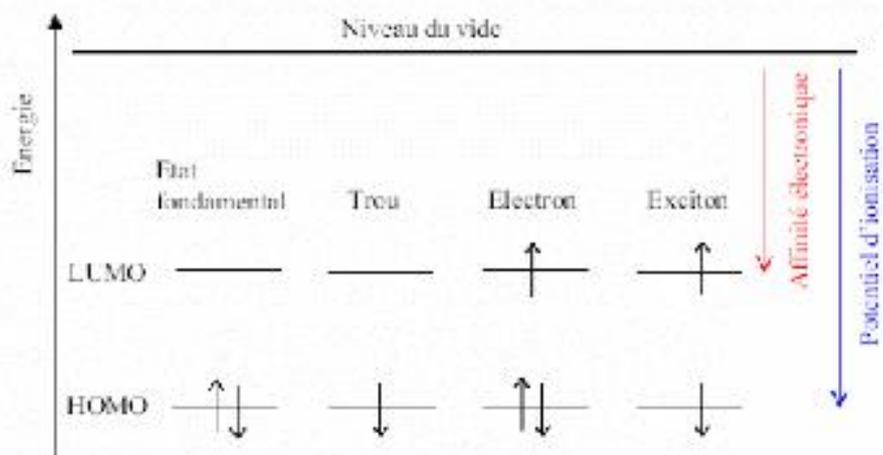
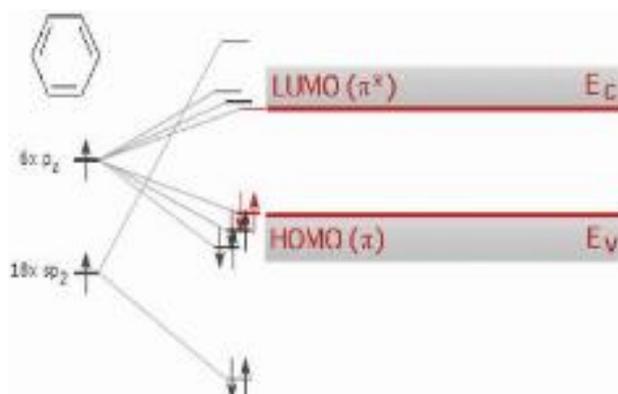


Figure 2.19: Représentation simplifiée des niveaux LUMO et HOMO d'une molécule dans l'état fondamental, d'un trou, d'un électron, et d'un exciton.

II.3.2 conduction électrique :

Dans les semi-conducteurs inorganiques, les électrons de la bande de conduction se déplacent comme des électrons quasi libres à travers des états délocalisés. Le transport des charges est limité par les vibrations du réseau qui augmentent avec la température et qui provoquent la diffusion des porteurs. Ce modèle ne peut pas être appliqué au cas des semi-conducteurs organiques pour lesquels les polarons sont localisés. Le transport de charges d'un site à un autre s'effectue en fait par effet tunnel assisté thermiquement.

Le transport des charges est lié à la conjugaison des liaisons, soit par une conduction intramoléculaire, c'est-à-dire le long d'une même chaîne conjuguée, ou par le chevauchement d'orbitales appartenant à deux chaînes polymère différentes permettant à l'électron de changer de chaîne. On est alors en présence d'une conduction intermoléculaire.

II.3.3 Dopage des semi-conducteurs organiques

Dans les semi-conducteurs à base de semi-conducteurs inorganiques quelques atomes sont remplacés par des ions en excès (par exemple le phosphore ou le bore pour le silicium) ce qui leur procure le type N ou P. Les semi-conducteurs organiques peuvent être dopés par l'ajout d'un réactif chimique qui oxyde (ou réduit) le système, ce qui fait transfère les électrons de la bande de valence à la bande de conduction, rendant le système plus conducteur. Il existe deux principales méthodes de dopage :

- Dopage chimique: est l'exposition de semi-conducteur organique à un oxydant (iode ou du brome) ou un réducteur (métaux alcalins).
- Dopage électrochimique: utilise une électrode recouverte d'un polymère et baignant dans une solution électrolytique dans laquelle le polymère est insoluble. On applique une tension entre les électrodes qui provoque un mouvement des ions de la solution et des électrons qui se fixent sur le polymère traité, ou s'en échappent. Donc on obtient un semi-conducteur organique type N ou type P respectivement. on note que le dopage N est moins courant que le dopage P. La majorité des dispositifs étant réalisés avec les matériaux organiques dits de type p, ceux de type n présentant de plus faibles mobilités des porteurs de charges et une forte sensibilité à l'oxygène et à l'humidité de l'air.

II.4 la différence entre semi-conducteur inorganique et organique :

Les matériaux organiques, polymères ou petites molécules, sont souvent des semi-conducteurs ou des isolants. Contrairement aux semi-conducteurs inorganiques, les impuretés jouent le rôle de pièges plutôt que de sources de porteurs de charges. Dans le silicium et le germanium, le couplage fort entre les atomes constituant le matériau et l'ordre du réseau entraîne la délocalisation des états électroniques et la formation des bandes de valence et de conduction séparées par une bande d'énergie interdite (gap). A l'aide d'une activation thermique, les porteurs de charges sont générés dans la bande de conduction où ils se

Déplacent librement. Les défauts chimiques ou structuraux dans les semi-conducteurs inorganiques introduisent des états localisés dans le gap. En effet, le porteur de charge, activé

Thermiquement, peut être piégé dans ces états localisés et ne contribue pas à la conduction. Le porteur piégé dans les états localisés peut se déplacer entre ces états par effet tunnel. Le porteur de charge peut surmonter les différences d'énergie entre ces états par l'absorption et l'émission des photons.

Type de matériau	Isolant	Semi-conducteurs organiques			Semi-conducteurs inorganiques	
Le matériau	SiO ₂	Alq ₃	TPD	PPV	Si	Ge
Mobilité des trous (cm ² /Vs)	2 10 ⁻⁷	2 10 ⁻⁸	2 10 ⁻³	10 ⁻⁵	505	2050

Tableau II.1 : Mobilités des trous de quelques semi-conducteurs organiques et inorganiques.

Dans les matériaux organiques, les interactions intramoléculaires sont principalement covalentes, mais les interactions intermoléculaires sont des interactions de Van der Waals faibles. Par conséquent, les bandes de transport dans les organiques sont plus étroites que celles des inorganiques et la structure de bande est facilement perturbée par le désordre dans ces matériaux. Le faible couplage entre les molécules entraîne une localisation importante des porteurs de charge. En effet, le transport est assuré par une séquence d'étapes de transfert de charge entre les molécules, ce qui est similaire au transport par saut (hopping) entre états localisés dans les semi-conducteurs inorganiques. A cause du désordre structural dans les semi-conducteurs organiques, la mobilité des porteurs de charge est plus faible et la densité de pièges est plus élevée que celles des semi-conducteurs inorganiques. Dans le tableau I.1, on donne la mobilité de quelques semi-conducteurs organiques et inorganiques en les comparant avec la mobilité des trous dans SiO₂.

II.5 l'Utilisation de l'énergie solaire :

Les cellules photovoltaïques sont parfois utilisées seules (éclairage de jardin, calculatrice, ...) ou bien regroupées sur des panneaux solaires photovoltaïques. Elles sont très utilisées en remplacement des piles (dont l'énergie est de loin la plus chère pour l'utilisateur ; même pour le fabricant, un compartiment pile et la pile éventuellement fournie peuvent coûter plus cher qu'une cellule), pourvu que le dispositif ne réclame pas trop d'énergie par rapport à la surface qu'on peut accorder au générateur photovoltaïque, et qu'il y ait assez de lumière pendant l'usage : les cellules ont envahi calculette, montres, gadgets, etc.

Il est possible d'augmenter leur gamme d'utilisation avec un stockage (condensateur ou batterie). Lorsqu'elles sont utilisées avec un dispositif de stockage de l'énergie, il est indispensable de placer une diode en série pour éviter la décharge du système pendant la nuit.

Elles sont utilisées pour produire de l'électricité pour de nombreuses applications (satellites, parc-mètres, ...), ainsi que pour alimenter des habitations ou un réseau public de distribution dans le cas d'une centrale solaire photovoltaïque.

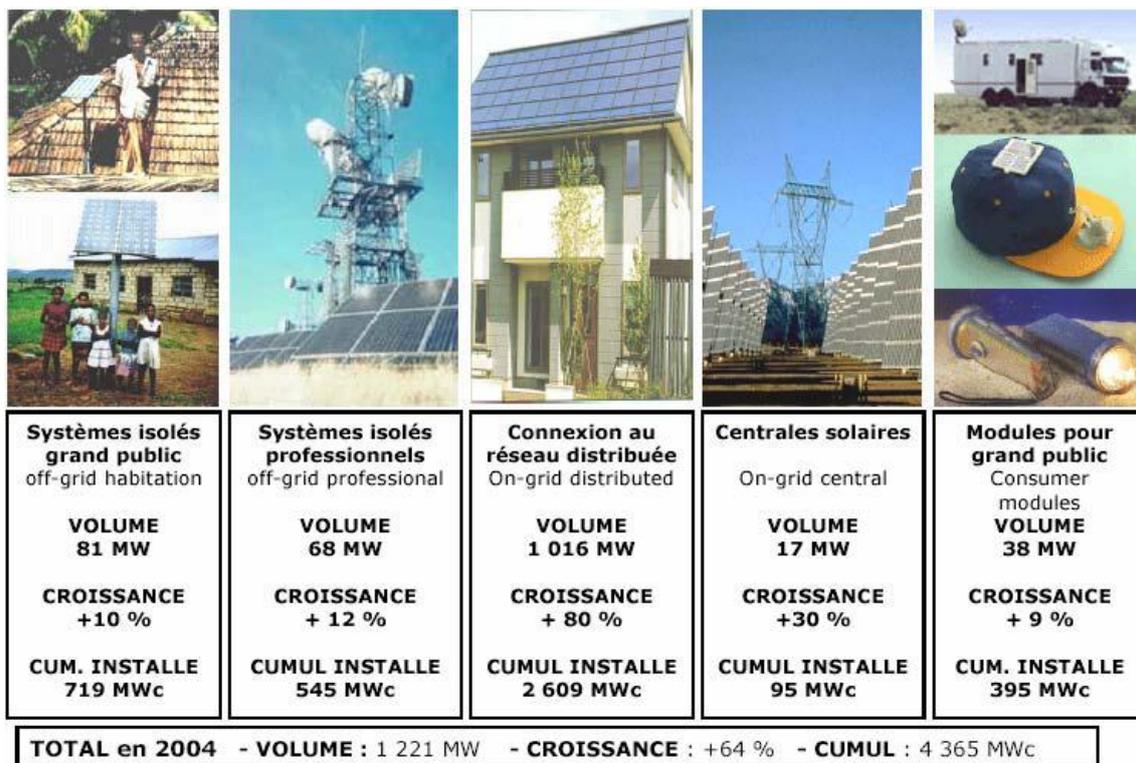


Figure 2.20 : l'utilisation de l'énergie renouvelable [34]

II.5.1 Autre utilisation :

Une nouvelle opportunité d'utilisation de l'énergie solaire se présente au travers de son utilisation pour la conversion directe du rayonnement solaire en énergie chimique, c'est-à-dire sous la forme de «carburants solaires», pouvant être transportés et stockés de manière flexible. Ce processus est déjà mis en oeuvre dans la nature: en effet, dans la photosynthèse, les chloroplastes combinent le dioxyde de carbone, l'eau et le rayonnement solaire en vue de produire des carbohydrates (sucres) – qui peuvent être considérés comme des carburants solaires– et de l'oxygène. Toutefois, le rendement énergétique de ce processus naturel est très bas, moins de 1%. Une approche intéressante consiste néanmoins à utiliser un outil spécialement conçu pour séparer l'eau, H₂O, en molécules d'oxygène et d'hydrogène (water splitting).

Ce dernier élément constitue un vecteur énergétique dont les potentialités sont attentivement considérées à court et à long terme. En effet, l'hydrogène peut être utilisé dans des piles à combustible pour produire aussi bien de l'électricité que de la chaleur, mais également en combustion directe, avec un champ d'applications très large, tant stationnaires qu'embarquées. De plus, l'utilisation d'hydrogène ne produit pas de pollution et pourrait donc constituer une alternative à l'utilisation de carburants fossiles dans le futur. [11]

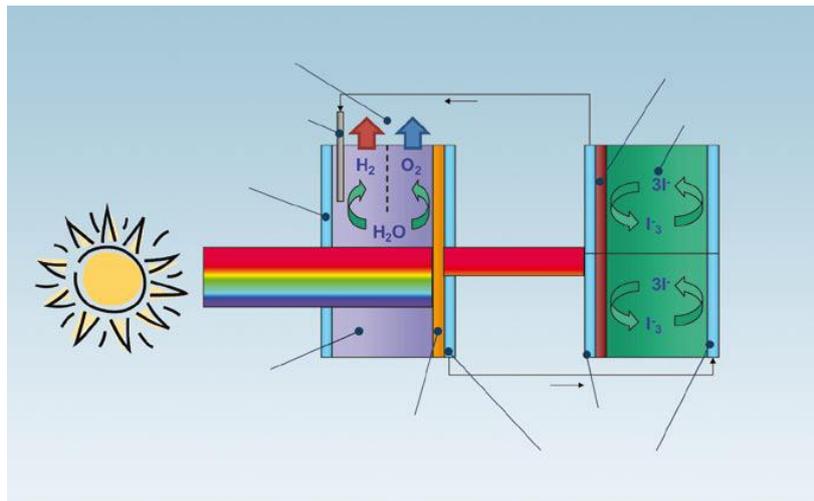


Figure 2.21 : Cellule solaire tandem pour la production d'hydrogène.

Cette cellule est composée d'une cellule photo-électrochimique et d'une cellule à colorant branchées en série. Une partie de la lumière visible (du bleu au vert) est absorbée par l'oxyde de fer, ce qui permet l'oxydation de l'eau en oxygène et la création d'un électron libre. Cet électron est alors transféré vers une cellule à colorant. Cette dernière absorbe la partie rouge de la lumière et permet à cet électron d'atteindre un niveau énergétique suffisant pour réduire l'eau en hydrogène à la cathode de la cellule photo-électrochimique.

II.6 conclusion :

On a vu dans ce chapitre les type des semi-conducteurs est la définition du gap d'énergie.

On a distingué aussi que chaque jonction est construite d'un semi-conducteur dopé N et un autre dopé P et que le Gap est le responsable de la conversion de l'énergie du photon vers une énergie électrique.

Les semi-conducteurs sont deux types organiques et inorganique on a vu tous les détails de ces deux types et la différence entre eux aussi on citant leur avantage et leur inconvénient.

On conclue finalement que les semi-conducteurs sont la base de la cellule photovoltaïque.

III-1 introduction :

Photovoltaïque signifie électricité à partir de lumière. Les systèmes photovoltaïques emploient la lumière du jour pour actionner des appareils électriques, comme par exemple les appareils électroménagers, ordinateurs ou éclairage. Le phénomène photovoltaïque (PV) convertit l'énergie solaire libre - la source d'énergie la plus abondante sur la planète - directement en électricité. Notez que ceci est différent de la technologie solaire thermique utilisée pour le chauffage et l'eau chaude.

Pour fabriquer une cellule PV il faut suivre des plusieurs étapes on va les voir dans ce chapitre.

On va voir aussi les type des module PV et les mis en série et les mis en parallèle des cellules PV.

III.2 la solution photovoltaïque :

III.2.1 historique :

➤ De 1839 à 1973

L'effet photovoltaïque est au carrefour de deux pôles de la société moderne, la science des matériaux et la recherche d'harmonie avec l'environnement. S'il est vrai que la science est l'étude de la nature, la technologie peut se considérer comme en étant sa mimique. Cependant, la société actuelle prend conscience que la technologie ne doit pas remplacer la nature, mais doit en être complémentaire, avec respect et recherche de préservation. La compréhension des matériaux est une question de physique fondamentale, mais sert aussi à permettre la synthèse qui donne "matière" à la technologie pour qu'elle puisse progresser. C'est en 1839 qu'Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque par l'apparition d'un potentiel entre deux électrodes lorsqu'elles sont illuminées. Cette année 1839 est aussi celle de l'invention des piles à combustibles par Sir William Grove. Les Becquerels, de père en fils, ont été des pionniers des systèmes énergétiques. Le père d'Edmond, Antoine César, est souvent appelé "le grand-père de l'électrochimie", et fut l'inventeur de la pile à courant continu (connue sous le nom de pile Daniell), le fils d'Edmond fut le célèbre Henri Becquerel découvreur de la radioactivité.

Il a fallu attendre les années 1870-1880 pour voir se développer une vraie photopile. En 1873 Willoughby Smith découvre la photoconductivité du sélénium, et en 1877 W.G. Adams et R.E. Day développent une jonction solide à base de sélénium dont le rendement était de l'ordre de 1%. Cependant, la première véritable vision de l'énergie photovoltaïque est due à Charles Fritts, qui, en reprenant les travaux d'Adams et Day, a cherché à établir un développement industriel des cellules au sélénium. Fritts pensait pouvoir faire concurrence aux technologies de production électrique naissantes de l'époque, sa vision était que chaque bâtiment pouvait être équipé de cellules solaires et être indépendant de la distribution centralisée. En 1886 Fritts a écrit que les cellules solaires utilisent une source d'énergie qui est sans limites, sans coûts et qui continuera à inonder la terre après que nous ayons fini de consommer nos réserves combustibles fossiles. Le monde scientifique et technique de l'époque, n'ayant pas les connaissances physiques nécessaires pour comprendre l'effet photovoltaïque, a conçu lu que les travaux de Fritts violaient le principe de conservation d'énergie et les a donc considérés frauduleux. La production d'électricité solaire visée par C. Fritts n'a pas eu lieu, mais les cellules au sélénium ont au moins trouvé une application importante dans le domaine de la photographie en tant que photomètre. Il a fallu attendre l'explication physique de l'effet photo-électrique par Einstein en 1904 et la mécanique quantique pour que l'effet photovoltaïque soit un phénomène reconnu par la communauté scientifique. Durant la première moitié du 20ème siècle le photovoltaïque a fait très peu de progrès. Le phénomène a été démontré dans d'autres systèmes que le sélénium, mais sans en augmenter le rendement, et ce jusqu'en 1954. En cette année, qui marque un grand tournant, Carl Fuller, au sein des laboratoires de la société Bell, cherchait à améliorer les diodes au silicium en y introduisant certains dopants. Son collègue Gerald Pearson eut l'idée de mesurer

Le courant produit sous illumination par les diodes de Fuller. A la surprise générale, un courant important fut observé. Ce fut le début d'un véritable projet de cellules solaires au sein de la société Bell où un rendement de 6 % fut rapidement démontré. 1954 est aussi le début des cellules en couches minces basées sur des diodes Schottky avec le CdS. A cause de leur prix élevé, la seule véritable, mais très importante, application pour les premières cellules solaires a été dans le domaine spatial qui fut le terrain de développement du photovoltaïque jusqu'au début des années 70. 1958 voit le lancement de plusieurs satellites équipés de systèmes photovoltaïques. La forte pression du programme spatial engendre des progrès très rapides en terme de rendement des cellules. De 8 % en 1957, et 9 % en 1958, on atteint 10 % en 1959 pour arriver à 14 % en 1960. Les années 60 voient un ralentissement de l'évolution du rendement des cellules au silicium mais des progrès rapides en ce qui concerne les cellules à base de CdS, qui sont au nombre de deux, les cellules Cu₂S-CdS et les cellules CdTe-CdS. Pendant cette décennie, il s'organise un certain nombre d'intérêts industriels, de programmes nationaux, de conférences, et des réalisations de systèmes spatiaux ou terrestres. En 1973 la première crise du pétrole frappe le monde industrialisé.

➤ de 1973 à nos jours

Avec la crise du pétrole en automne 1973, et plus pour des questions d'indépendance énergétique que pour des questions environnementales, un intérêt s'est porté vers l'énergie solaire photovoltaïque "terrestre". Le prix des photopiles de cette époque était de l'ordre de 100\$/Watt mais a rapidement entamé une chute pour passer en dessous des 20\$/Watt en 1980 puis en dessous des 10\$/Watt en 1986.

Ce marché était entièrement dominé par la technologie à base de silicium cristallin. Ces prix permirent un développement des systèmes pour applications isolées au tiers monde. Ces systèmes vont du pompage d'eau à la télévision éducative de village, la télécommunication et l'éclairage, en passant par la création de chaînes de réfrigération pour des vaccins. En 1973, les rendements record en laboratoire pour le silicium cristallin étaient déjà de 15 %. Entre 73 et 76 débutèrent aussi des couches minces à base de CuInSe₂ et à base de silicium amorphe. Celles-ci ont rapidement rattrapé les couches minces déjà existantes à base de CdTe et Cu₂S et ensemble ces quatre filières ont franchi la barrière des 10 % de rendement vers 1980. Cependant, à cette même date, le glas sonna pour les cellules Cu₂S pour lesquelles des problèmes d'instabilité incontournables sont apparus. Jusqu'au début des années 90 les trois couches minces restantes ont évolué ensemble jusqu'aux environs de 15 %, puis le CuInSe₂ a évolué par ajout de gallium en Cu(In,Ga)Se₂ pour devenir le leader avec 18,8 % obtenu en décembre 1998. Mais les couches minces n'ont pas rattrapé le silicium cristallin en rendement record, car celui-ci a continué son évolution pour atteindre 24 % de rendement en septembre 1994, et plus récemment 24.7 % en mars 1999.

Le marché des modules solaires était encore modeste au début des années 80, avec des productions annuelles de l'ordre d'une dizaine de MW. Cependant, jusqu'en 95, l'abaissement continu des coûts de production a généré un marché qui a atteint l'ordre de

75 MW par an. A partir de ce moment, une prise de conscience écologique et une volonté politique (surtout en Allemagne et au Japon) ont très rapidement fait accélérer le marché qui s'est approché des 300 MW annuels en 2000, ce qui a conduit à des prix entre 3\$-4\$/Watt.

Les prédictions pour l'avenir situent les prix en 2010 aux alentours de 2\$/Watt, certains analystes américains vont même jusqu'à 0,33\$/Watt pour les couches minces. Sachant qu'au prix d'aujourd'hui le photovoltaïque est d'environ 4 fois le prix de l'électricité Conventionnelle, il se profile à l'horizon une ère où l'énergie solaire ne sera pas seulement une des rares sources d'énergie en harmonie avec l'environnement, mais elle sera la solution la plus économique. Après avoir joué un rôle dans la conquête de l'espace, et après avoir montré qu'elles sont une solution technique pour le monde rural dans les pays en voie de développement, les cellules photovoltaïques sont en voie de devenir une solution économique à l'inégalité géographique humaine ainsi qu'aux problèmes particuliers de respect de l'environnement que pose la production d'énergie.

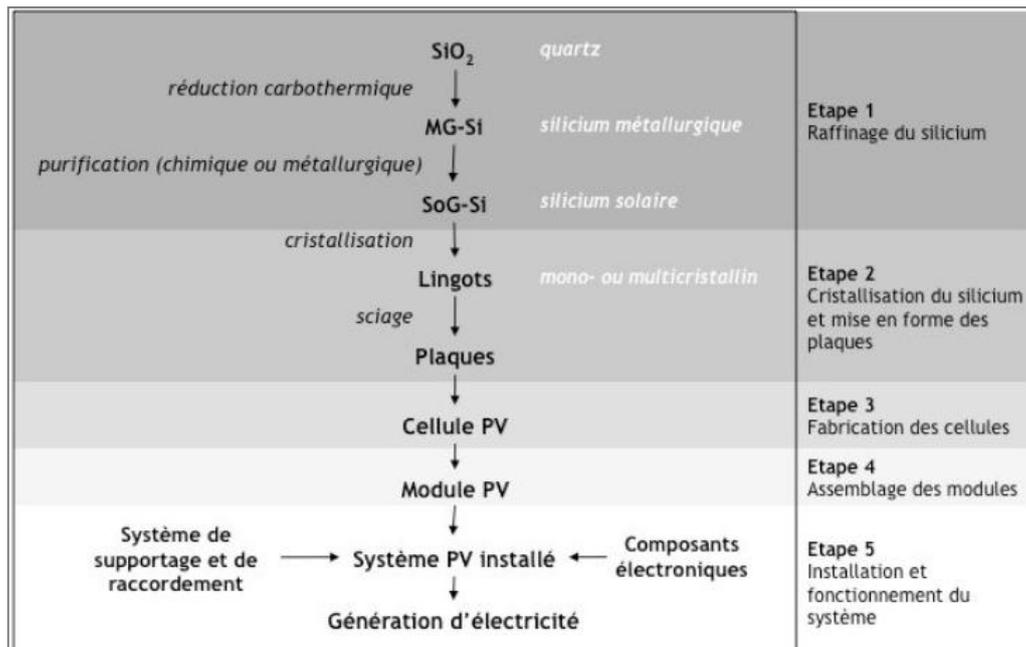
III-2-2 Processus de fabrication des systèmes photovoltaïques

Pour fabriquer un système photovoltaïque il faut qu'on passe de plusieurs étapes sont vraiment nécessaires pour la conversion photovoltaïque commençant par le silicium et on termine finalement par le système PV.

On y retrouve les étapes suivantes:

- **Etape 1** : Elaboration du silicium de grade solaire à partir du silicium métallurgique, lui-même obtenu à partir de quartz.
- **Etape 2** : Cristallisation de ce silicium solaire pour former des plaques.
- **Etape 3** : Transformation de ce silicium cristallisé en composant actif pour devenir une cellule photovoltaïque.
- **Etape 4** : Assemblage des cellules photovoltaïques en module photovoltaïque.
- **Etape 5** : Groupement de plusieurs modules pour réaliser un système photovoltaïque intégré en toiture comprenant également une structure porteuse, des composants électroniques et électriques.

La figure3.1 présente l'enchaînement de ces étapes, de même qu'elle pose les limites du système étudié dans l'analyse du cycle de vie.



La figure 3.1 : Limites du système pour l'analyse du cycle de vie [9]

III.2.2.1 raffinage de silicium

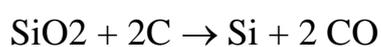
En 2006, 93% du marché photovoltaïque était encore basé sur les technologies silicium (multicristallin, monocristallin et ruban).

Sur la base d'un besoin de 15t/MW, l'industrie photovoltaïque consommerait chaque année environ 40000 tonnes de silicium pour produire 5GW de panneaux photovoltaïques dont 90% à base de silicium. D'après l'US Geographical Survey, la production de silicium au niveau mondial a été d'environ 5 millions de tonnes en 2007 : la part de l'industrie photovoltaïque représente donc un peu moins de 1% de la production mondiale. [9]

Le silicium, deuxième élément de la croûte terrestre, est obtenu à partir de silice ou dioxyde de silicium SiO_2 contenu dans le quartz ou le sable (**figure 3.2.a**), contenu dans le quartz ou le sable.

Le silicium métallurgique (MG-Si) résulte de la transformation de la silice à l'intérieur d'un four à arc (figure 3.2.b et c) dont on extrait l'oxygène. Cette réaction appelée réduction carbothermique.

- Réduction de la silice par le carbone à 1700°C.



La purification du silicium métallurgique (figure 3.2.d) nous produit le silicium solaire (SoG-Si).

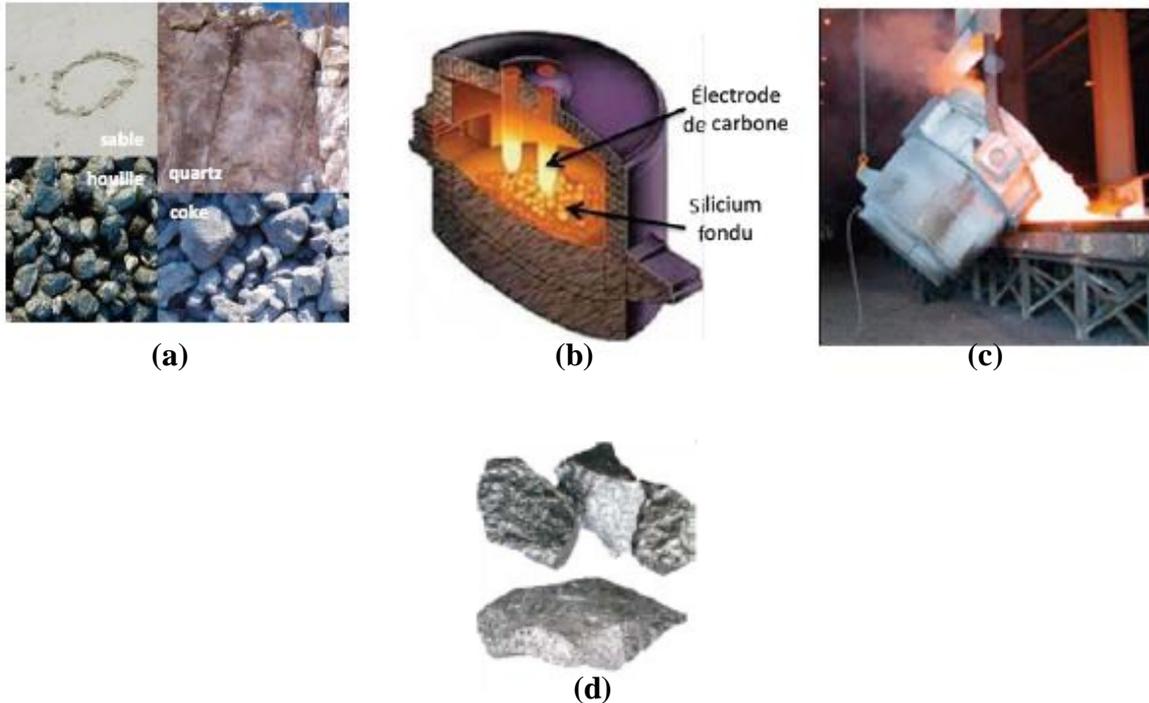


Figure 3.2 : raffinage de silicium

III.2.2.2 Cristallisation du silicium et mise en forme des plaques :

Ce sont les dernières étapes de transformation du silicium avant la fabrication de la cellule photovoltaïque proprement dite. Le silicium va être purifié encore une fois, dopé uniformément et découpé en plaques une fois refroidi. La technique de cristallisation consiste à solidifier progressivement le silicium polycristallin fondu de manière contrôlée. C'est dans la charge de silicium en fusion que sera ajouté l'élément dopant, généralement du bore qui donne un dopage de type p. Le matériau présente au final un réseau cristallin, qui est un arrangement ordonné des atomes de silicium.

L'élimination des impuretés se fait par ségrégation. Plus solubles en phase liquide que solide, les impuretés vont migrer vers les zones se solidifiant en dernier. Dans le cas d'un refroidissement pas le bas, elles vont se concentrer sur le haut du lingot. [9]

III.2.2.3 Fabrication des cellules :

Les lingots monocristallins et les briques multicristallines sont ensuite découpés en tranches par une scie à fil, à une épaisseur d'environ 250 μm . [9] Une fois les plaques découpées vient la fabrication des cellules, qui va permettre d'exploiter les propriétés de semi-conducteur du silicium et de transformer l'énergie lumineuse captée en énergie électrique.

III.2.2.4 Assemblage des modules et la réalisation du système PV :

Cela fait par l'assemblage des modules et de les mettre en série ou en parallèle pour réaliser le système photovoltaïque.

La figure 3.3 représente l'enchaînement des étapes de fabrication d'un module photovoltaïque au silicium cristallin.

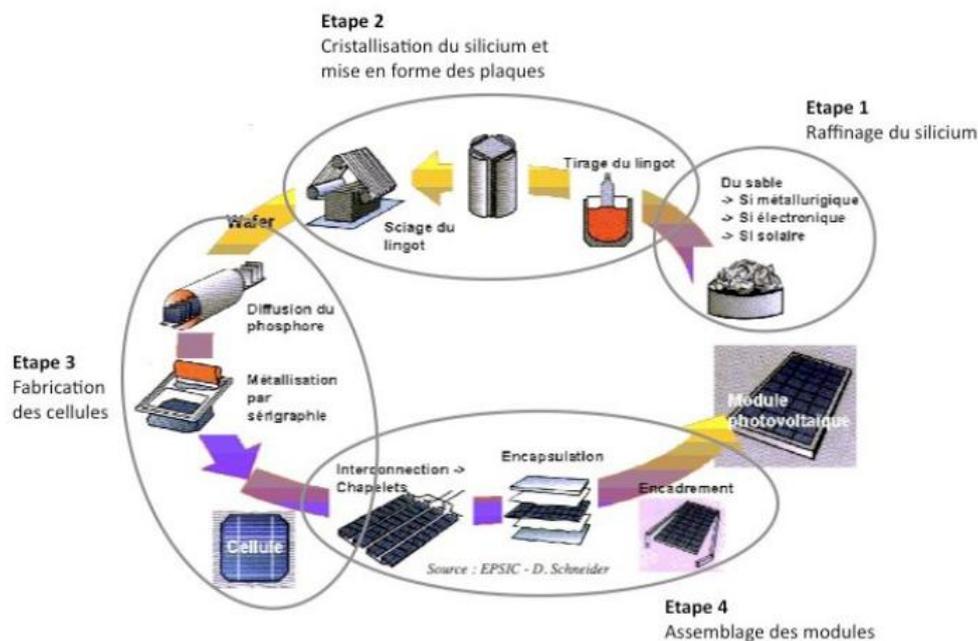


Figure 3.3 : les étapes de fabrication d'un système PV

III.3 la cellule photovoltaïque :

III.3.1 Définition :

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.

- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trous dans le matériau semi-conducteur.
- Collecte des particules générées dans le dispositif. [5]

III.3.2 Principe de fonctionnement :

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{OC}). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit (I_{CC}). [7]

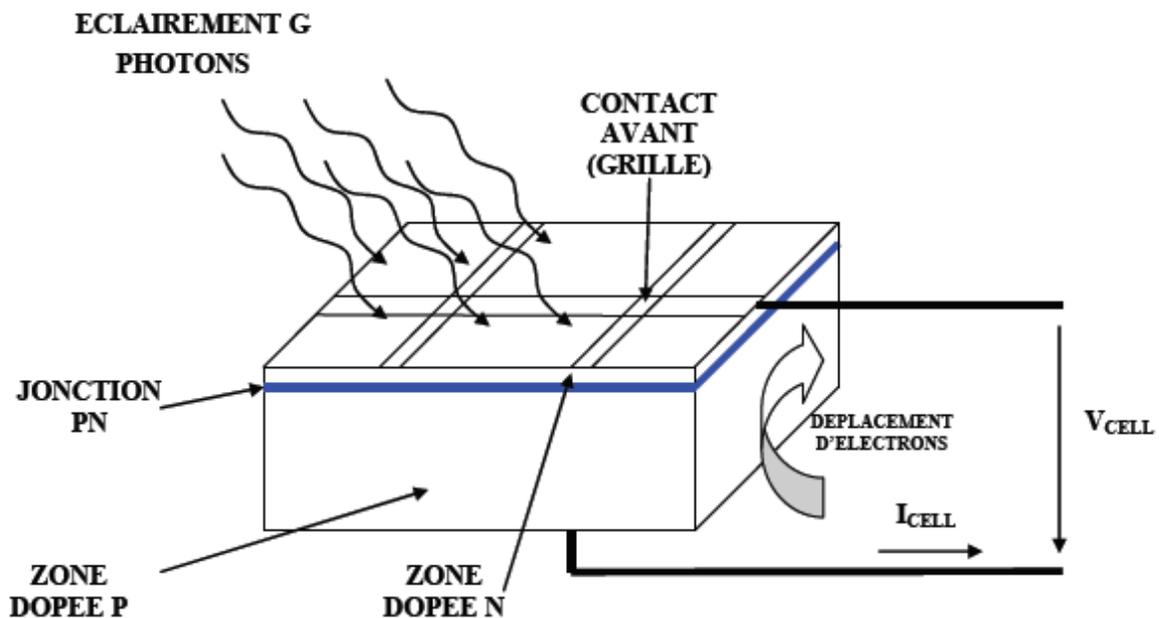


Figure 3.4.a : structure d'une cellule photovoltaïque au silicium

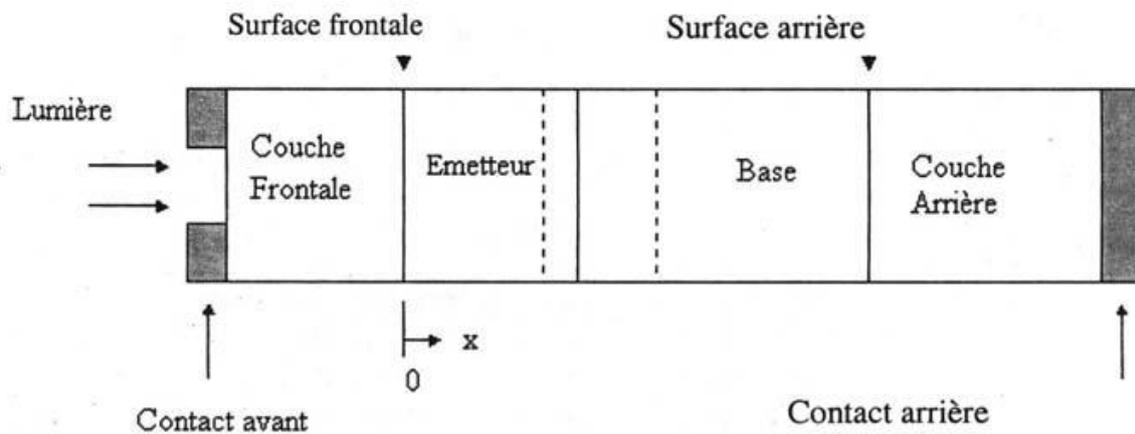


Figure 3.4.b: Structure généralisée d'une cellule solaire (coupe transversale) [16]

Si l'énergie du photon E (équation I.1) ne correspond pas (inférieure) au gap du semi-conducteur la cellule ne fonctionne pas, mais si elle est supérieure ou égale au gap il y a une conversion et la cellule fonctionne.

III.3.3 Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque [5] :

Le courant délivré sur une charge par une cellule PV éclairée s'écrit :

$$I(V) = I_{ph} - I_{obsc}(V) \quad (\text{III.1})$$

Avec : I_{ph} : densité de courant photo-généré et I_{obsc} : densité de courant d'obscurité.

Pour une cellule photovoltaïque idéale, l'équation (III.1) peut être sous la forme suivante :

$$I(V) = I_{ph} - I_s(e^{(qV/KT)} - 1) \quad (\text{III.2})$$

Avec : I_s : le courant de saturation de la diode, q : charge élémentaire, k : constante de Boltzmann et T : la température.

Ainsi, dans une cellule photovoltaïque, deux courants s'opposent : le courant d'éclairement et un courant de diode appelé courant d'obscurité qui résulte de la polarisation du composant. La caractéristique d'une cellule sous obscurité est indiquée à celle d'une diode. Sous éclairement, la caractéristique a l'allure présentée sur **la figure 3.5**.

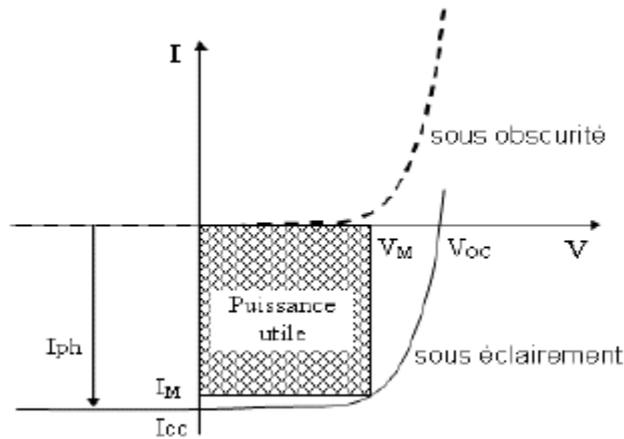


Figure 3.5 : caractéristiques $I=f(V)$ sous obscurité et sous éclairement d'une cellule PV

III.3.3.1 la tension de circuit ouvert [17] :

C'est la tension pour laquelle la diode à l'obscurité ($I = 0$) fournit un courant égal au courant de court circuit I_{cc} . Elle est obtenue à partir de l'équation:

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_0} + 1 \right) \quad (\text{III.3})$$

III.3.3.2 le courant de court circuit :

Si on court-circuite une cellule photovoltaïque on obtient une tension nulle ($V=0$) et un courant qui s'appelle le courant de court-circuit I_{cc} .

III.3.3.3 la puissance maximale :

La puissance électrique produite par une diode sous éclairement est égale au produit de l'intensité délivrée et de la tension à ses bornes. Il faut ainsi adapter la charge aux bornes du dispositif afin de la faire fonctionner au point de puissance maximale $P_{\max}(V_{\max}, I_{\max})$. [6]

P_{\max} : c'est la puissance maximum qui peut produire par une cellule photovoltaïque.

J : la densité de courant.

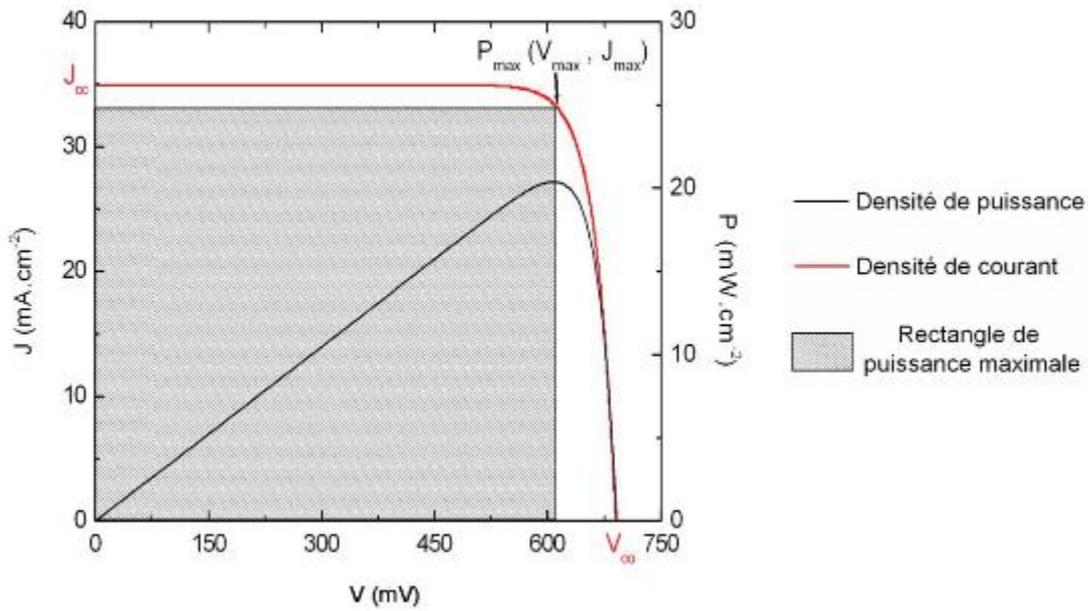


Figure 3.6 : caractéristique J-V et P-V sous l'éclairement [6]

III.3.3.4 le facteur de forme FF [17]:

Il définit l'efficacité de la cellule solaire, il est obtenu comme suit :

$$FF = \frac{V_{max} I_{max}}{V_{co} I_{cc}} \tag{III.4}$$

III.3.3.5 le rendement de conversion :

On appelle rendement de conversion η le rapport de la puissance fournit par la cellule sur la puissance incidente (d'éclairement). [6] Il exprime selon l'équation suivante :

$$\eta = FF \cdot \frac{I_{cc} V_{co}}{P_{in}} = \frac{P_{max}}{P_{in}} \tag{III.5}$$

Ou P_{in} : est la puissance incidente (d'éclairement).

Classification	Rendement (%)	Surface (cm ²)	Jcc (mA/cm ²)	Vco (V)	Centre de test (date du test)
Silicium (cellules)					
Si cristallin	24.7±0.5	4	42.2	0.706	Sandia (3/99)
Si multicristallin	19.8±0.5	1.09	38.1	0.654	Sandia (2/98)
Si film	16.6±0.4	4.017	32.8	0.645	FhG-ISE (7/01)
Si film (module)	7.25±0.2	478	0.525	21.36	Sandia (7/01)
III-V (cellules)					
GaAs cristallin	25.1±0.8	3.91	28.2	1.022	NERL (3/90)
GaAs film	23.3±0.7	4	27.6	1.011	NERL (4/90)
GaAs multicristallin	18.2±0.5	4.011	23.0	0.994	NERL (11/95)
InP cristallin	21.9±0.7	4.02	29.3	0.878	NERL (4/90)
Multicristallin film					
CIGS (cellule)	18.4±0.5	1.04	35.7	0.669	NERL (2/01)
CIGS (sous-module)	16.6±0.4	16.0	8.35	2.643	FhG-ISE (3/00)
CdTe (cellule)	16.5±0.5	1.132	26.7	0.845	NERL (9/01)
CdTe (sous-module)	10.6±0.3	63.8	2.26	6.565	NERL (2/95)
Si Amorphe					
Nanocristallin	10.1±0.2	1.199	24.4	0.539	JQA (12/97)
Nanocristallin (cellule)	6.5±0.3	1.6	13.4	0.769	FhG-ISE (1/97)
Nanocristallin (sousmodule)	4.7±0.2	141.4	11.3	0.795	FhG-ISE (2/98)
Multijonction Cellules					
GaInP/GaAs	30.3±1.6	4	14.22	2.488	JQA (4/96)
GaInP/GaAs/Ge	28.7±1.4	29.93	12.95	2.571	NERL (9/99)
GaAs/CIS (film)	25.8±1.3	4	-	-	NERL (11/89)
Si/CIGS (film)	14.6±0.7	2.4	-	-	NERL (6/88)
Module					
Si cristallin	22.7±0.6	778	3.93	5.6	Sandia (9/96)
Si multicristallin	15.3±0.4	1017	1.36	14.6	Sandia (10/94)
CIGSS	12.1±0.6	3651	2.83	23.42	NERL (3/99)
CdTe	10.7±0.5	4874	3.205	26.21	NERL (4/00)

Tableau 3.1 : Rendements de cellules et générateurs PV mesurés à une température de 25 °C et un éclairage de 1000 W/m² sous un spectre global de AM 1,5 [3]

III.4 module PV le générateur PV :

- Le panneau ou module (figure 3.7.a) est un groupe de dizaine des cellules photovoltaïques (figure 3.8.b) élémentaires reliées entre eux. Il peut y être en KW.
- Le générateur PV (GPV) (figure 3.7.c) est un ensemble des panneaux reliés entre eux en série ou en parallèle ou les deux dans le même temps. Il peut atteindre des MW de puissance.



a-Cellule PV



b-module PV



c-générateur PV

Figure 3.7 : les différents types de dispositifs PV selon la puissance générée

III.4.1 protection classique d'un GPV :

Pour garantir une durée de vie importante pour une installation photovoltaïque destinée à produire l'énergie électrique pour des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules commerciaux afin d'éviter des pannes destructives liées à l'association de cellules en série et de générateur en parallèle. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles. [1] (**figure 3.8**)

- La diode anti-retour empêche que le GPV soient parcourus par un courant négatif ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle ou bien quand la charge connectée peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie dans la nuit. [1]
- Les diodes by-pass isolent un sous réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant ainsi des points chauds et la destruction des cellules mal éclairées. [1]

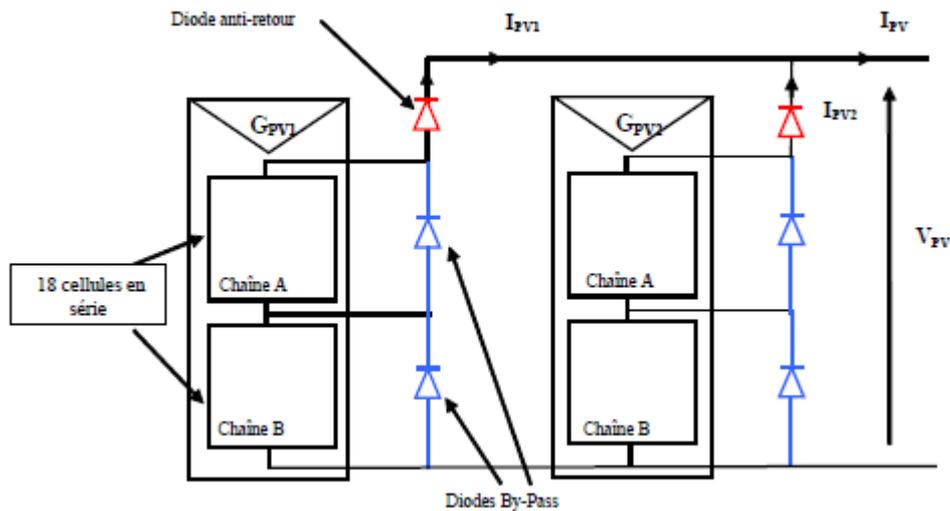


Figure 3.8 : association de deux modules PV en parallèle avec leurs diodes de protections

III.4.2 connexion directe entre la source GPV et une charge DC :

Dans le cas d’une connexion directe le de fonctionnement d’un GPV dépend de l’impédance de la charge ay point d’intersection entre les caractéristiques électrique de la charge et du GPV. [1]

III.5 mis en série et mis en parallèle de la cellule PV :

Dans un groupement de **ns** cellules en série, toutes sont traversées par un même courant. La figure 3.9.a montre la caractéristique résultante (I_{sc} , V_{sco}) d’un tel groupement dans des conditions idéales, obtenue pour ns cellules identiques (I_{cc} , V_{co}) en sommant les caractéristiques élémentaires à courant constant [30]:

$$I_{sc} = I_{cc} \tag{III.6}$$

$$V_{sco} = ns \cdot V_{co}. \tag{III.7}$$

Pour un groupement de **np** cellules identiques en parallèle (figure3.9.b) [30] :

$$I_{pcc} = np \cdot I_{cc} \tag{III.8}$$

La tension de circuit ouvert de la groupe parallèle est égale au celle d’une cellule :

$$V_{pco} = V_{co} \tag{III.9}$$

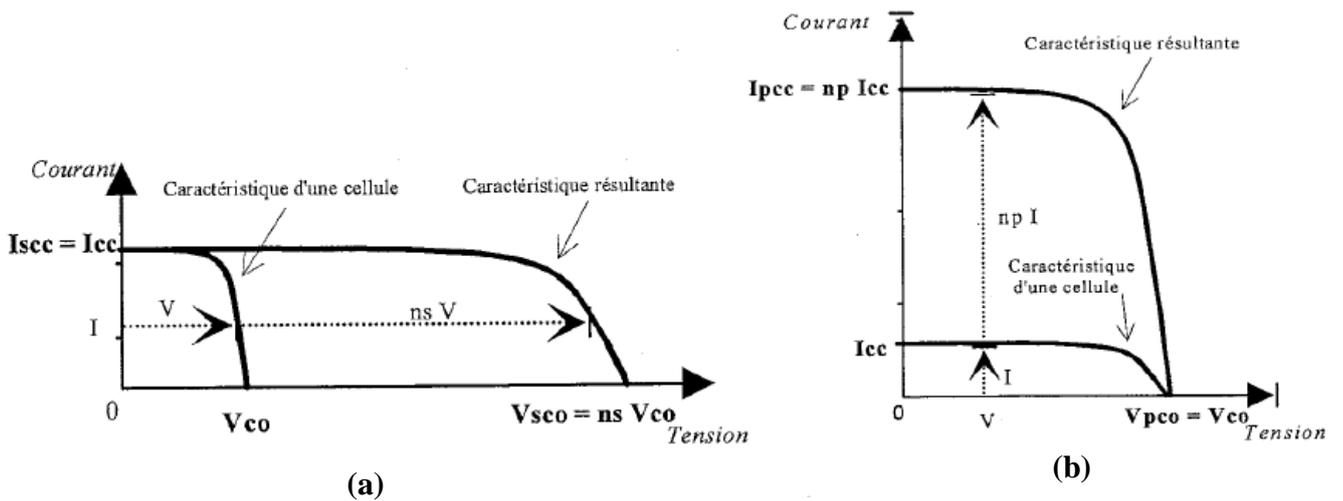


Figure 3.9 : caractéristiques de groupements série ou parallèle de cellule photovoltaïque

On associe les cellules PV en parallèle est en série en même temps avec : n_s des cellules PV en série est n_p de (n_s cellules PV) en parallèle, le nombre des cellules dans ce champ photovoltaïque sera ($n_s * n_p$) cellules PV.

$$V_{co}(\text{globale}) = n_s * V_{co} \tag{III.10}$$

$$I_{cc}(\text{globale}) = n_p * I_{cc} \tag{III.11}$$

Remarque :

Les équations (III.6 7 8 9 10 11) sont valables lorsque les cellules sont identiques et ont les mêmes caractéristiques.

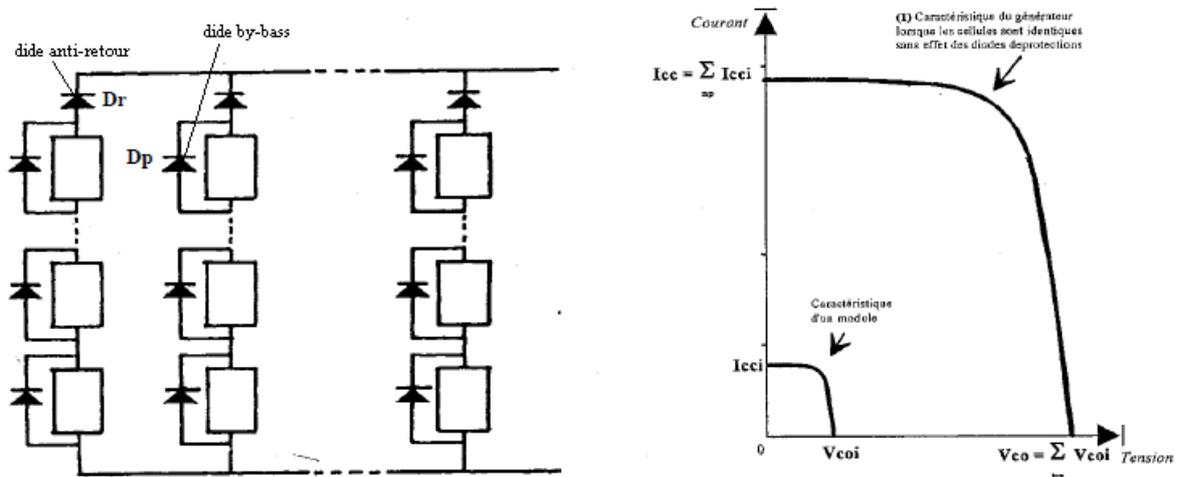


Figure 3.10: câblage série/parallèle d'une cellule PV

III.6 les différentes technologies :

III.6.1 comparaison :

Matériau	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principales utilisations
Silicium mono cristallin	12 à 18% <i>(24,7% en laboratoire)</i>	20 à 30 ans	* Très performant * Stabilité de production d'W * Méthode de production coûteuse et laborieuse.	Aérospatiale, modules pour toits, façades,...
Silicium poly cristallin	11 à 15% <i>(19,8% en laboratoire)</i>	20 à 30 ans	* Adapté à la production à grande échelle. * Stabilité de production d'W. Plus de 50% du marché mondial.	Modules pour toits, façades, générateurs...
Amorphe	5 à 8% <i>(13% en laboratoire)</i>		* Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. * Fonctionnement si faible luminosité. * Fonctionnement par temps couvert. * Fonctionnement si ombrage partiel * La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment
Composite mono cristallin (GaAs)	18 à 20% <i>(27.5% en laboratoire)</i>		* Lourd, fissure facilement	Systèmes de concentrateurs Aérospatiale (satellites)
Composite poly cristallin (CdS, CdTe, CuInGaSe2, etc.)	8% <i>(16% en laboratoire)</i>		Nécessite peu de matériaux mais certains contiennent des substances	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment

Tableau 3.2 : les différentes technologies du silicium [30]

III.6.2 Les modules PV double face :

Certain fabricants proposent des panneaux solaires comportant des cellules solaires sur les deux faces, sur la face avant exposée au soleil et sur la face arrière du panneau. Les cellules sont en général montées sur une vitre, encapsulées dans un cadre aluminium. Ces panneaux sont adaptés aux sites ayant des albédos importants des lacs, mers, les déserts, les surfaces enneigées. La puissance du module double face est le double de la puissance du même module simple face mais l'énergie moyenne annuelle produite par le module double face n'est que supérieure que de 10 % plus élevée à celle produite par le même module simple face (le coût d'investissement par contre a presque doublé !!). [30]

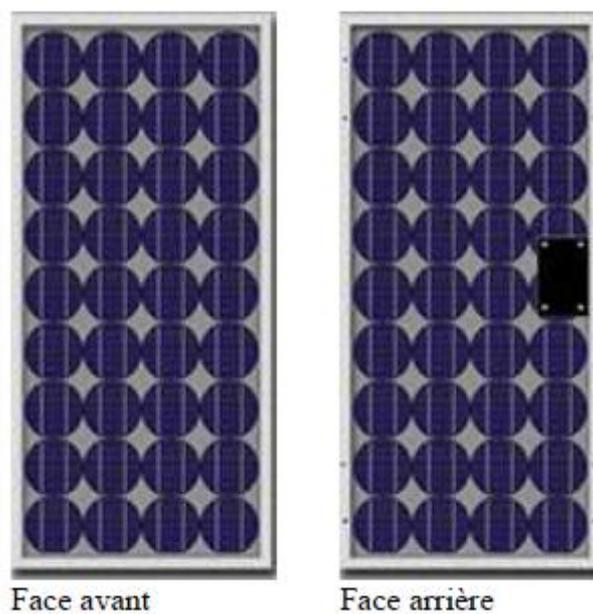


Figure 3.11 : Face avant et arrière d'un module PV double face 36 Vcc

III.7 connexion au réseau :

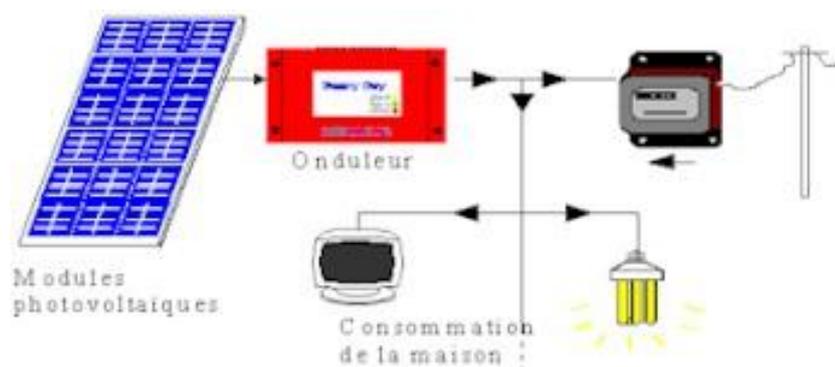


Figure 3.12 : module PV connecté au réseau

Les panneaux photovoltaïques produisent une tension continue variable en fonction de l'ensoleillement, ils sont couplés en séries pour atteindre une tension de 300 à 600 V.

Ces panneaux sont connectés à un onduleur qui régule et convertit le courant continu en courant alternatif connecté et synchronisé au réseau. Ce type d'onduleur ne peut pas fonctionner seul sans réseau.

Ce principe permet d'obtenir le meilleur rendement dans l'utilisation de l'énergie solaire, pas de batterie, pas d'entretien. L'énergie solaire est entièrement récupérée, ce que vous ne consommez pas sera consommé par le voisinage.

- Si le système PV est n'est pas raccordé au réseau on l'appel un système PV autonome.
- Si le système PV est raccordé à une autre source (éolienne) on l'appel ça un système hybride.

III.7.1 les onduleurs photovoltaïques :

Ils font le lien entre les panneaux photovoltaïques et le réseau. Ils convertissent le courant continu en courant alternatif synchronisé à la fréquence du réseau. Ils régulent la tension des panneaux photovoltaïques pour rechercher la valeur de tension ou la puissance est maximum (MPP).

Le rendement d'un onduleur est compris entre 92 et 95% pour les modèles avec transformateur d'isolation, 95 à 97% pour les modèles sans transformateur, 96 à 98% pour les modèles sans transformateur et sans étage élévateur, ces derniers ne peuvent pas fonctionner avec une tension inférieure à 350V DC.

Les onduleurs avec transformateur sont plutôt destinés aux capteurs couche mince, et aux systèmes à faible tension (faible puissance).



Onduleurs avec transformateur



Onduleurs sans transformateur
large plage de tension
(90 à 600v)

Figure 3.13 : onduleurs photovoltaïque

III.7.2 Les batteries :

Les batteries servent de zone tampon entre production et consommation d'énergie (utilisation). Leur capacité doit être suffisamment grande pour faire face à tous les aléas de la production et de la consommation.

Lorsque le réservoir d'énergie est plein toute quantité d'énergie supplémentaire entraînera le bouillonnement de l'électrolyte :

- Le niveau dans la batterie baisse, et celle-ci peut être gravement endommagée
- Les gaz produits peuvent exploser avec une flamme ou une étincelle
- Le surplus d'énergie risque de détériorer les plaques en plomb en arrachant la matière active.

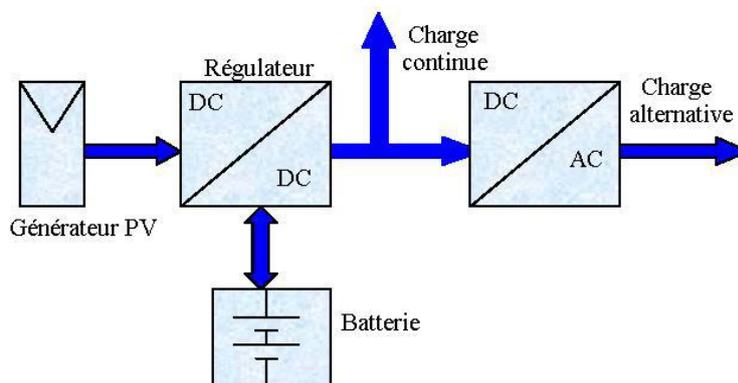


Figure 3.14 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec batterie de stockage [35]

III.7.3 Le régulateur :

Le régulateur contrôle l'état du réservoir d'énergie pour protéger la batterie. Son rôle est de stopper :

- La charge de la batterie lorsque celle-ci est chargée pour éviter le bouillonnement de l'électrolyte,
- Le prélèvement d'énergie sur la batterie lorsqu'elle est trop chargée.

III.7.4 Le convertisseur :

Le convertisseur permet de convertir le courant continu en courant alternatif pour alimenter les utilisations qui fonctionnent avec ce type de courant (onduleur PV).

III.7.5 Les récepteurs :

L'énergie produite alimente un ou plusieurs appareils de consommation (éclairage, réfrigération, pompage ...).

Ci-dessous, on montre un exemple de schéma d'installation, Système solaire de 50 watts-crêtes (destiné à l'électrification d'une habitation familiale).

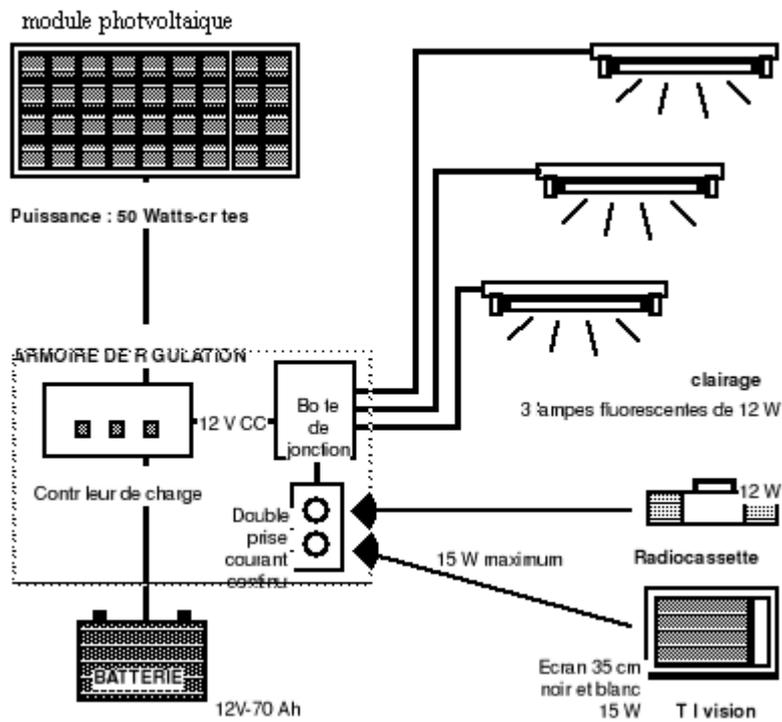


Figure 3.15 Exemple d'installations de cellule PV

III-8 conclusion :

On a vu dans ce chapitre les étapes de fabrication d'une cellule PV et leurs influences sur le prix de ces modules puisque le dopage et la purification possèdent des laboratoires à haute technologie et ça exigent les fabricants à faire augmenter le prix.

Les panneaux solaires sont de plusieurs types mono et poly-cristalline et amorphe à une jonction ou à hétérojonction, généralement la cellule est une diode à jonction PN a des caractéristique (rendement, facteur de forme, le courant, la tension, etc...) sont généralement constantes pour chaque cellule.

On a vu aussi les caractéristiques I-V et le mode de connexion des cellules PV (série, parallèle).

Le champ photovoltaïque est l'ensemble des modules PV, l'onduleur, le régulateur et la batterie qui stocke l'énergie électrique.

IV-1 introduction :

L'objectif de ce travail est de présenter les résultats concernant la caractérisation électrique et la modélisation dans l'environnement « Matlab » des générateurs photovoltaïques. Nous analysons le courant débité par le générateur ainsi que la puissance électrique fournie par ce générateur en fonction de la tension de sortie du générateur [15]. Le modèle électrique utilisé dans cette modélisation est fonction d'une part de la température de jonction des cellules et d'autre part de l'ensoleillement afin de faire sortir les graphes en analysant les résultats et on conclut le travail.

IV.2 Les types des modèles :

Selon plusieurs paramètres données par le constructeur ou le fabricant d'un module solaire on peut créer un modèle théorique d'une cellule PV, et il dépend aussi de l'usage que l'on veut en faire. Et pour choisir un modèle il faut prendre les résultats qui ont été faites par simulation ou a l'aide des programme et les compares entre eux pour connaitre les meilleurs modèles.

La validité du modèle influe directement sur le choix du modèle (la différence entre les résultats de modèle et les résultats expérimentaux).

IV.2.1 Modèle a 2 paramètres :

Le modèle le plus simple d'une cellule PV est montré comme un circuit équivalent figure(1), constitue d'une source de courant idéale en parallèle avec une diode idéale. La source de courant représente le courant produit par les photons (souvent désignés par I_{PH} ou I_L), et sa production est stable sous température et irradiation incidente constante [4].

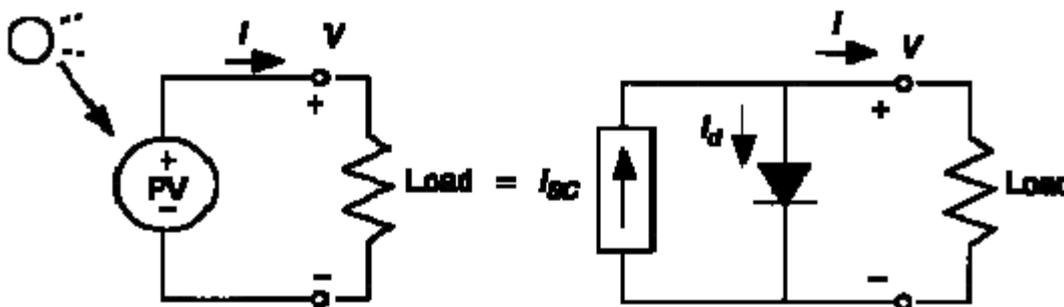


Figure 4.1 : Modèle à 2 paramètres

Les critères les plus connus d'une cellule photovoltaïque sont le courant de court circuit I_{cc} est la tension de circuit ouvert V_{co} , leur valeurs étant posées comme des données dans les fiches techniques des fabricants.

De la figure 4.1 lorsqu'on applique la loi de Kirchhoff on obtient :

$$I = I_{ph} - I_D \quad (IV.1)$$

Ou

I_{ph} : le courant photonique qui est estimé par I_{CC}

I_D : le courant parallèle par le diode

La valeur du courant de la diode est donnée par l'équation de Shockley suivant :

$$I_d = I_{sat} \left(e^{\frac{qV_d}{nkT}} - 1 \right) \quad (\text{IV.2})$$

Ou

V : la tension de sortie [volts]

I_0 : le courant inverse de saturation [ampères]

q : la constante de charge d'électron, $1.602 \cdot 10^{-19}$ C

K : la constante de Boltzmann, $1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K

n : le facteur de qualité

Si on pose que la diode est idéale alors $n=1$ la relation (IV.2) devient :

$$I_d = I_{sat} \left(e^{\frac{qV_d}{kT}} - 1 \right) \quad (\text{IV.3})$$

De l'équation (IV.1), (IV.3) et par identification on trouve

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left(e^{\frac{qV_d}{kT}} - 1 \right) \quad (\text{IV.4})$$

Les deux paramètres de ce modèle sont I_{ph} et I_{sat}

Dans les conditions normales de l'éclairement (1000 W/m^2) et de la température (25°C).

$$\frac{K_B T}{e} = 26 \text{ mV}$$

$$K_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$$

$$T = 25 + 273 = 298^\circ\text{K}$$

$$e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Alors la relation (IV.4) va être définie par la relation suivante :

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left(e^{\frac{V+IR_s}{n \cdot 0.026}} - 1 \right) \quad (\text{IV.5})$$

IV.2.2 modèle 3 paramètres :

Il est presque comme le premier (section IV.2.1) mais la différence est le facteur de qualité de la diode n , il sera différent à 1 ($n \neq 1$).

L'équation (IV.4) sera :

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left(e^{\frac{qV_d}{nkT}} - 1 \right) \quad (IV.6)$$

Est les 3 paramètres de ce modèle sont n , I_{ph} et I_{sat} .

IV.2.3 modèle a 4 paramètres :

La figure ci-dessous représente un modèle à 4 paramètres :

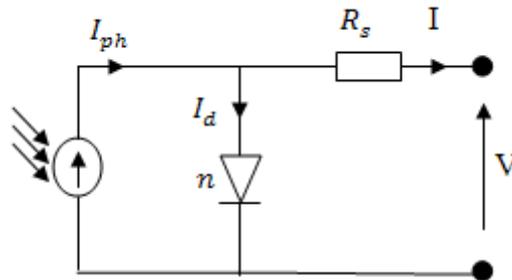


Figure 4.2 : modèle à 4 paramètres

Dans ce modèle on ajoute la résistance série R_s comme 4^{ème} paramètre.

R_s : représente la résistance des connexions et V_d sera :

$$V_d = V + IR_s \quad (IV.7)$$

Alors :

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left(e^{q \frac{V+IR_s}{nkT}} - 1 \right) \quad (IV.8)$$

IV.2.4 modèle a 5 paramètres :

C'est le modèle le plus cité dans la littérature, le module photovoltaïque est caractérisé par son schéma électrique équivalent (fig. 4.3) qui se compose d'une source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique, une résistance shunt R_{sh} est une conséquence de l'état de le long de la périphérie de la surface de la cellule, une résistance série R_s représentant les diverses résistances de contacte et de connexions, une diode en parallèle qui modélise jonction PN [18].

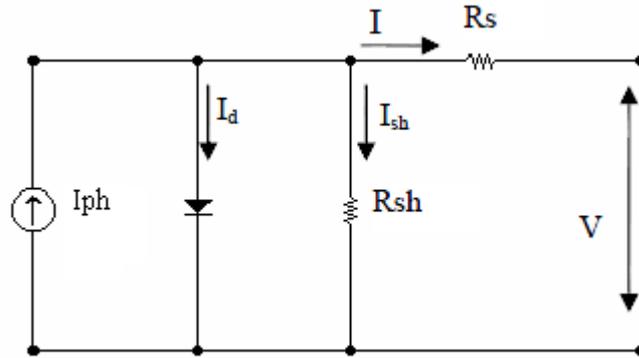


Figure 4.3 : modèle a une diode

Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \tag{IV.9}$$

De l'équation (IV.2) et (IV.7) on obtient :

$$I = I_{ph} - I_{sh} - I_{sat} \left(e^{\frac{qV_d}{nkT}} - 1 \right) \tag{IV.10}$$

IV.2.5 modèle a double diode :

Le module photovoltaïque est représenté par son schéma électrique équivalent (**Figure.4.4**) qui se compose d'une source de courant modélisent le flux lumineux, les pertes sont modélisé par deux résistances, une résistance shunt R_{sh} , une résistance série R_s et deux diodes pour la polarisation de la cellule et le phénomène de la recombinaison des porteurs minoritaires. [18]

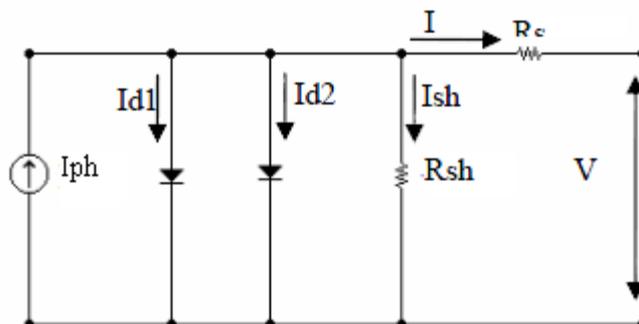


Figure 4.4 : modèle a deux diodes

$$I = I_{ph} - (I_{d1} + I_{d2}) - I_{sh} \quad (IV.11)$$

I_{d1} et I_{d2} sont les courants des diodes.

IV.3 modélisation d'un modèle a 4 paramètres :

IV.3.1 essai en court-circuit :

Si on court-circuite une cellule photovoltaïque on obtient une tension de sortie nulle est une valeur de : [30]

$$I_{cc} = I_{ph} \quad (IV.12)$$

Si on remplace ces valeurs dans l'équation (IV.8) on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left(e^{q \frac{I_{cc} R_s}{nkT}} - 1 \right) \quad (IV.13)$$

IV.3.2 essai en circuit ouvert :

L'essai en circuit ouvert nous fait faire obtenir un courant nul est une tension de circuit ouvert V_{co} .

On remplace aussi ces valeurs dans l'équation (IV.8) on obtient :

$$0 = I_{ph} - I_{sat} \left(e^{q \frac{V_{co}}{nkT}} - 1 \right) \quad (IV.14)$$

IV.3.3 le point de la puissance max :

Pour une puissance max donnée par la cellule photovoltaïque on a les valeurs de I_{max} et V_{max} Tel que :

$$P_{max} = I_{max} \cdot V_{max} \quad (IV.15)$$

On remplace les valeurs correspondent a la puissance max dans l'équation (IV.8) on trouve :

$$I_{max} = I_{ph} - I_{sat} \left(e^{q \frac{V_{max} + R_s I_{max}}{nkT}} - 1 \right) \quad (IV.16)$$

IV.3.4 calcul des paramètres :

IV.3.4.1 calcul du courant de la saturation de la diode :

Dans l'essai en court circuit on a $V=0$ alors le courant de la diode sera défini selon (IV.12) et (IV.14) par la relation suivante :

$$I_{sat} = \frac{I_{cc}}{\left(e^{\frac{qV_{CO}}{nkT}} - 1 \right)} \quad (IV.17)$$

Il s'exprime aussi en fonction des caractéristiques du matériau et de la température comme suit :

$$I_0 = I_{0-T_1} * \left(\frac{T_f}{T_1} \right)^{\frac{3}{n}} e^{\left(\frac{-qV_g}{n * k * \left(\frac{1}{T_f} - \frac{1}{T_1} \right)} \right)} \quad (IV.18)$$

IV.3.4.2 le courant photonique :

Il définit la quantité des paires électron-trou créé G et qui traverse la jonction sans recombinaison entre les longueurs de diffusion des électrons et trous (L_n et L_p) respectivement. [17]

$$I_{ph} = qG(L_n + L_p) \quad (IV.19)$$

IV.3.4.3 calcul de la résistance série :

Dans une cellule PV réelle, il y a une résistance série dans le chemin du courant à travers le matériau semi conducteur, la grille du métal et les différents contacts. Ces pertes sont réunies comme une résistance série R_s , son effet devient très remarquable dans un module PV qui se compose de plusieurs cellules connectées en série, et la valeur de la résistance est multipliée par le nombre des cellules [33].

La résistance série peut être calculée par la relation suivante [33] :

$$R_s = - \frac{dV}{dI} \Big|_{V_{CO}} - \frac{nkT/q}{I_{sat} e^{\frac{qV_{CO}}{nkT}}} \quad (IV.20)$$

Après de la dérivation de l'équation (IV.8) et le faire résoudre au point V_{co} on obtient l'équation (IV.20).

IV.3.4.4 le facteur de qualité de la diode n :

Le facteur de qualité de diode (n) est inconnu et doit être estimé, généralement il prend une valeur entre 1 et 2, la valeur de $n=1$ (pour la diode idéale) est cependant employée jusqu'à ce que la valeur plus précise soit estimée plus tard par l'ajustement de courbe [4].

IV.3.4.5 calcul de la résistance shunte :

Celle-ci s'appelle également la résistance shunt. L'existence de fissures et de défauts de structure complexe devient le siège de phénomène physique assimilable à une résistance R_p , qui apparaît en parallèle sue le schéma électrique [33].

Cette résistance parallèle est liée directement aux processus de fabrication, son effet est beaucoup moins remarquable dans un module PV comparé à la résistance série, il deviendra seulement apparent quand un certain nombre de modules PV sont reliés en parallèle pour un grand système [33].

IV.4 modélisation d'un module photovoltaïque par MATLAB :

On a choisis dans notre travail le module BP SX 150 pour la simulation par MATLAB. Ce module est composé par 72 cellules en série est son caractéristiques sont voir tableau IV.1 :

Température	T	25	°C
Tension de circuit ouvert	V_{CO}	43.5	V
Courant de court circuit	I_{CC}	4.75	A
Tension de puissance maximale	V_{max}	34.5	V
Courant de puissance maximale	I_{max}	4.35	A
Puissance maximale	P_{max}	150	W

Tableau IV.1 : caractéristique de module BP SX 150

IV.4.1 le choix de modèle :

On va choisir pour la simulation de ce module un modèle de 4 paramètres (n , I_{sat} , I_{ph} , R_s). Pour calculer ces paramètres on peut utiliser un autre sens de calcul par un système d'équation

- $n=1$:

Selon (IV.13), (IV.14) et (IV.16) on a :

$$\begin{cases} I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left(e^{q \frac{IR_s}{nkT}} - 1 \right) \\ 0 = I_{ph} - I_{sat} \left(e^{q \frac{V_{c0}}{nkT}} - 1 \right) \\ I_{max} = I_{ph} - I_{sat} \left(e^{q \frac{V_{max} + R_s I_{max}}{nkT}} - 1 \right) \end{cases} \quad (1)$$

Pour résoudre ce système en utilise l'opération « Solve » dans MATLAB on obtient les résultats suivants :

$$I_{ph} = 4.75 \text{ A}$$

$$R_s = 12.8 \text{ m}\Omega$$

$$I_{sat} = 0.45 \cdot 10^{-9} \text{ A}$$

- $n \neq 1$

il faut de la présence d'une 4^{ème} équation pour que le nombre des paramètres sera le même que celle des équations.

On déjà :

$$\begin{cases} I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left(e^{q \frac{IR_s}{nkT}} - 1 \right) \\ 0 = I_{ph} - I_{sat} \left(e^{q \frac{V_{c0}}{nkT}} - 1 \right) \\ I_{max} = I_{ph} - I_{sat} \left(e^{q \frac{V_{max} + R_s I_{max}}{nkT}} - 1 \right) \end{cases}$$

Si on dérive I par rapport à V on a :

$$\frac{dI}{dV} = -I_{sat} \left(\frac{q}{nkB} \right) \left(1 + R_s \frac{dI}{dV} \right) e^{q \frac{V + R_s I}{nkB}}$$

$$P = VI \rightarrow \frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV}$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{dP}{dV}\right)_{V_{max}, I_{max}} &= 0 \rightarrow I_{max} + V_{max} \left(\frac{dy}{dx}\right)_{V_{max}, I_{max}} = 0 \\ \left(\frac{dI}{dV}\right)_{V_{max}, I_{max}} &= -\frac{I_{max}}{V_{max}} \\ \left(\frac{dI}{dV}\right)_{V_{max}, I_{max}} &= -q \frac{I_{sat}}{nkB} \left(1 - R_s \frac{I_{max}}{V_{max}}\right) e^{q \frac{V_{max} + R_s I_{max}}{nkB}} = -\frac{I_{max}}{V_{max}} \end{aligned} \quad (IV.21)$$

On ajoute l'équation (IV.21) au système d'équation (1) on obtient :

$$\begin{cases} I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left(e^{q \frac{IR_s}{nkT}} - 1 \right) \\ 0 = I_{ph} - I_{sat} \left(e^{q \frac{V_{co}}{nkT}} - 1 \right) \\ I_{max} = I_{ph} - I_{sat} \left(e^{q \frac{V_{max} + R_s I_{max}}{nkT}} - 1 \right) \\ -q \frac{I_{sat}}{nkB} \left(1 - R_s \frac{I_{max}}{V_{max}} \right) e^{q \frac{V_{max} + R_s I_{max}}{nkB}} = -\frac{I_{max}}{V_{max}} \end{cases} \quad (2)$$

On résoudre le système (2) par MATLAB on obtient les résultats suivantes :

$$I_{cc} = 4.75 \text{ A}$$

$$R_s = 5.1 \text{ m}\Omega$$

$$n = 1.62$$

$$I_{sat} = 2.11 \cdot 10^{-8} \text{ A}$$

Alors on a obtenu les quatres paramètres (I_{cc} , R_s , I_{sat} , n) par une méthode mathématique qu'elle est la résolution d'un système d'équation.

Les résultats sont raisonable et presque les mêmes par rapport aux caractéristiques données par le constructeur comme I_{cc} et les autre valeurs.

IV.4.1.1 Cacul du tension d'une cellule :

Le module BP SX 150S est composés par 72 cellules en série ça veut dire la tension de circuit ouvert d'une cellule :

$$V_{co} = \frac{V_{comodule}}{N_s} \quad (IV.22)$$

N_s : le nombre de cellules en série = 72

$$V_{co} = \frac{43.5}{72} = 0.6 \text{ V}$$

IV.4.1.2 Cacul du faceteur de forme d'une cellule :

Le facteur de forme est le raport entre la puissance maximale et le prduit $I_{cc} \cdot V_{co}$, Il s'exprime par la relation (III.4) du chapitre 3 :

$$FF = \frac{V_{max} I_{max}}{V_{co} I_{cc}}$$

$$FF = \frac{34.5 \cdot 4.35}{43.5 \cdot 4.75} = 0.72$$

IV.4.2 les caractéristiques I(V) du modèle BP SX 150 :

Par l'utilisation d'un programme script MATLAB on obtient la courpe si-dessous

La valeurde $I_{cc} = 4.75 \text{ A}$ et $V_{co} = 43.5 \text{ V}$:

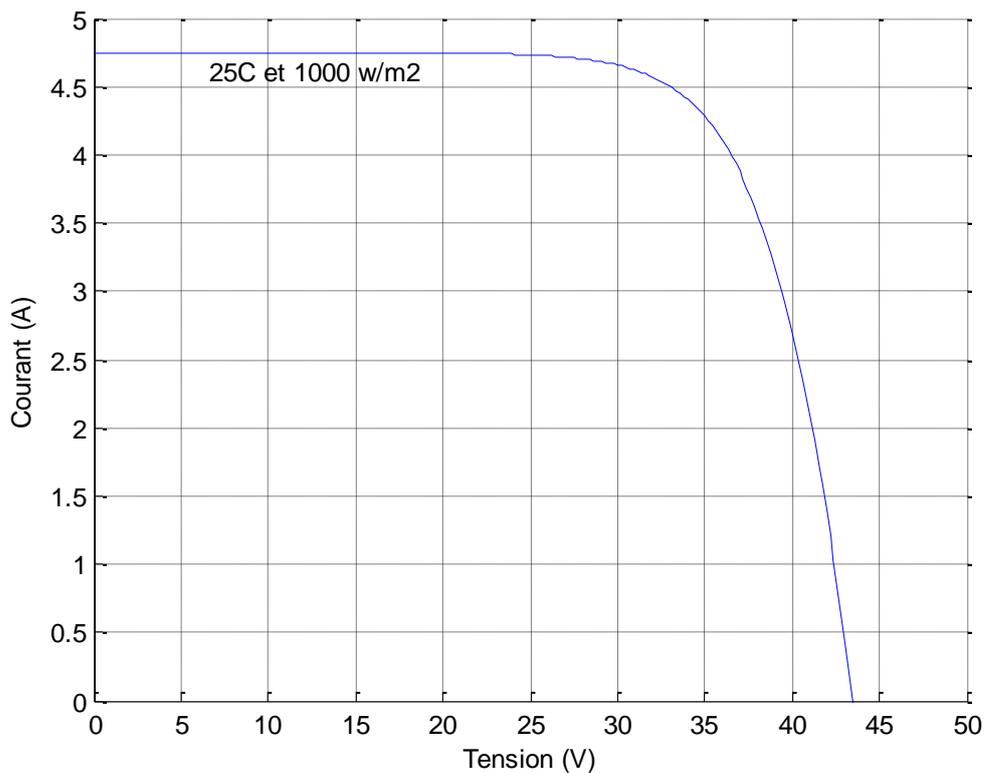


Figure 4.5 : les caractéristiques I(V) de BP SX 150

IV.4.3 Influence de l'éclairement sur la valeur de court circuit :

L'éclairement est un paramètre influant sur le courant de court circuit et la tension de circuit ouvert ainsi les caractéristiques $I(V)$, à l'aide de MATLAB on obtient les courbes $I_{cc}(G)$.

On fixe la température à la valeur de la température ambiante ou de référence $T = 25^\circ\text{C}$ (ou 298°K)

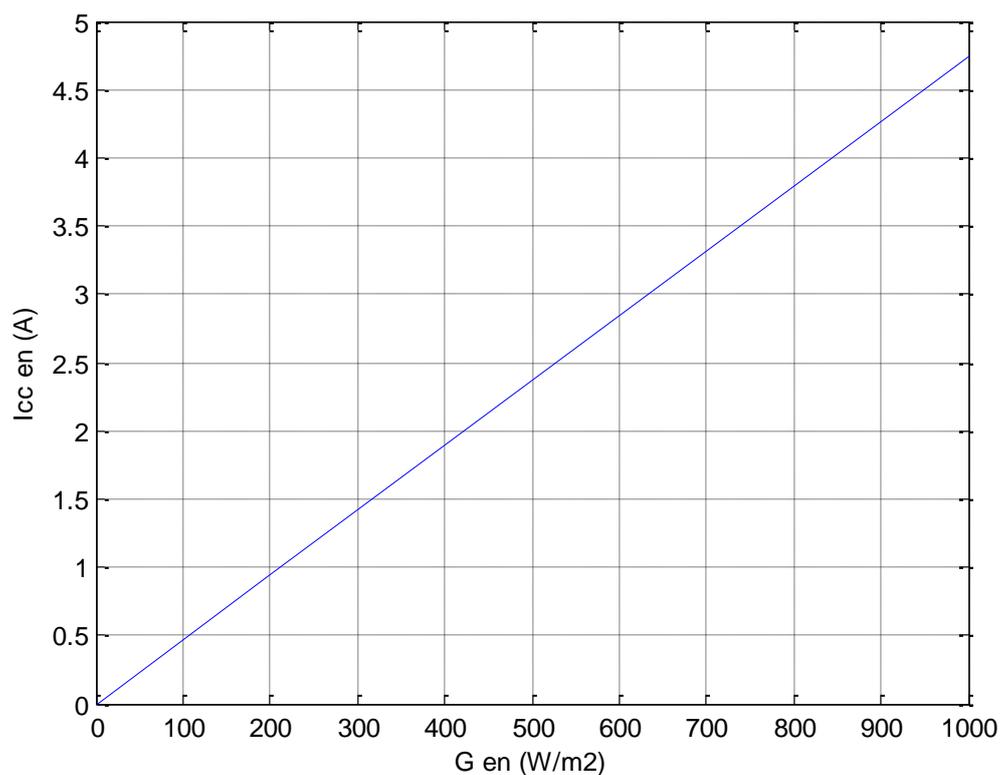


Figure 4.6 : l'influence de l'éclairement sur I_{cc}

On remarque la valeur de courant de court circuit I_{cc} est proportionnelle au éclairement G

Et tant que la valeur $I_{cc} = I_{ph}$ selon l'équation (IV.12) on distingue que l'éclairement influence directement sur le courant photonique.

IV.4.4 Influence de l'éclairement sur la valeur de V_{co} :

Comme on a vu dans la section IV.4.2 l'éclairement influe aussi sur la tension de circuit ouvert V_{co} . L'expression de la tension en circuit ouvert [15]:

$$V_{co} = n \cdot \frac{K.T}{q} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_{sat}} + 1 \right) \quad (IV.23)$$

On a l'équation :

$$I_{cc} = \left(\frac{G}{G_0} \right) \cdot I_{cc0} \quad (IV.24)$$

I_{cc0} : le courant de court circuit a la temperature de référence (A)

En remplace I_{cc} dans l'équation (IV.23) on obtient :

$$V_{co} = n \cdot \frac{K.T}{q} \ln \left(\frac{\left(\frac{G}{G_0} \right) \cdot I_{cc0}}{I_{sat}} + 1 \right) \quad (IV.25)$$

A l'aide de MATLAB on obtient la courbe suivante :

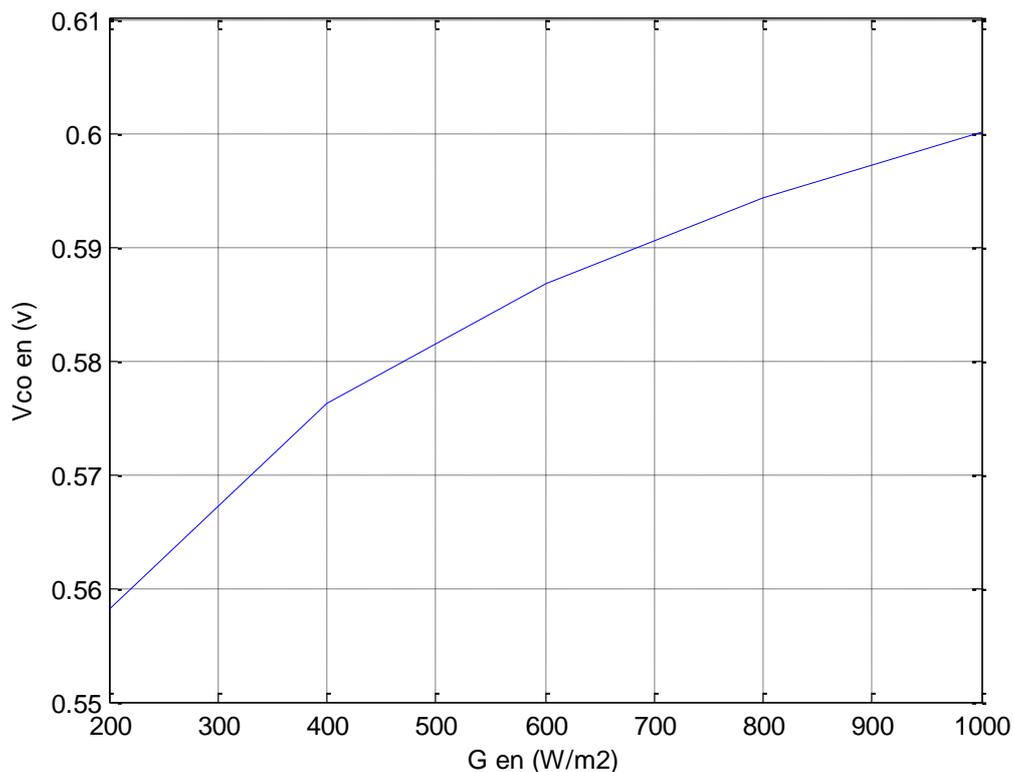


Figure 4.7 : l'influence de l'éclairement sur V_{co}

IV.4.5 L'influence de G sur les caractéristiques $I=f(V)$:

On remarque que l'éclairement influe directement sur le courant de court circuit aussi que sur la valeur de V_{co} alors il influe sur les caractéristiques $I(V)$

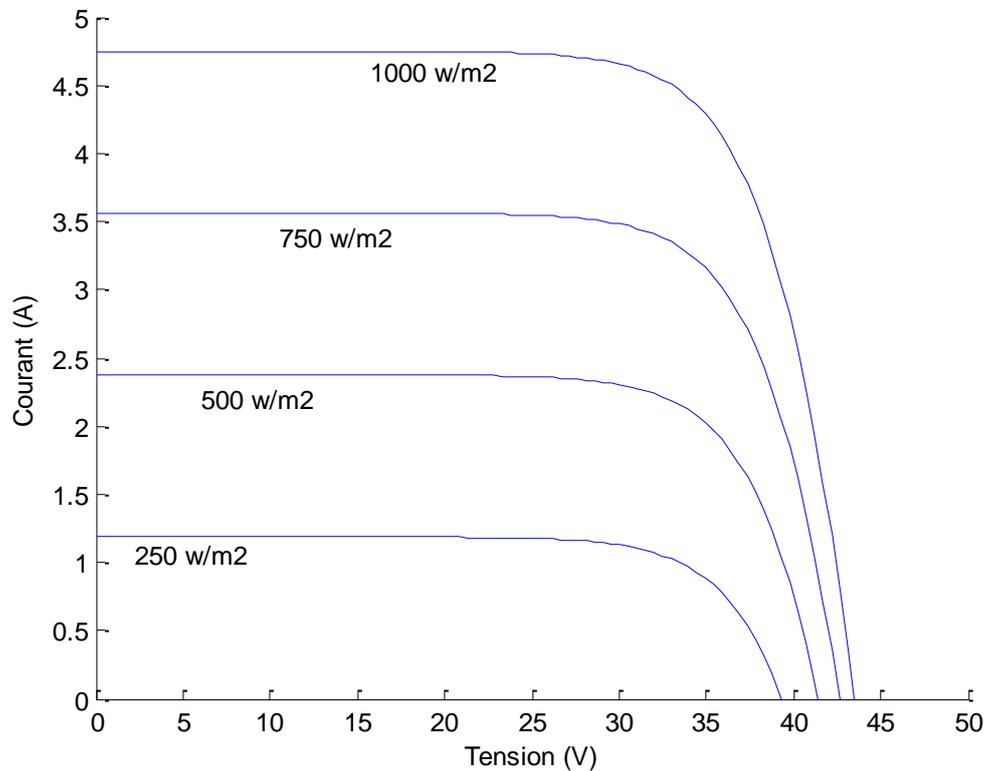


Figure 4.8 : variation des caractéristique $I(V)$ par rapport à la variation de G

On remarque que pour chaque éclairement il y a une courbe $I(V)$ qui lui correspond et ça provoque la diminution de rendement du panneau solaire.

IV.4.5 L'influence de la température sur les caractéristiques I=f(V) :

Pour des applications à faible température, le courant et la tension générés par un module PV sont supposés linéaires. Ceci permet de décrire l'effet de la température sur les performances d'un module PV par des coefficients. Si nous désignons par P un paramètre physique du module à la température T, on définit le coefficient de température correspondant comme suit [13] :

$$\beta_1 = \frac{P(T) - P(T_{ref})}{T - T_{ref}} \quad (IV.26)$$

Le coefficient de température réduit est donné par [13] :

$$\beta_2 = \frac{\beta_1}{P(T_{ref})} \cdot 100 \quad (IV.27)$$

L'évolution de la caractéristique I(V) en fonction de la température montre que le courant augmente très rapidement lorsque la température s'élève et engendre une décroissance moins prononcée de la tension de circuit ouvert.

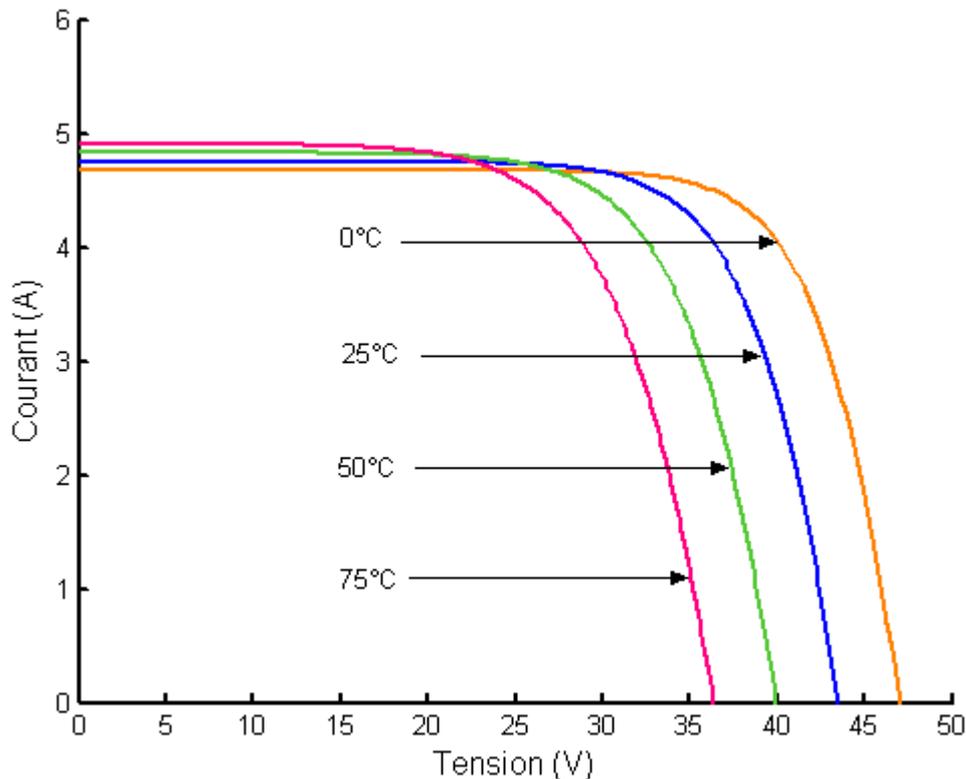


Figure 4.9 : I=f(V) et l'influence de la température

Comme on a vu l'éclairement influe sur le rendement photovoltaïque mais il n'est pas seul puisque la température aussi est un facteur influant sur le rendement η d'une cellule PV.

La figure 4.7 représente la variation des caractéristiques $I(V)$ par rapport à la température et on laisse l'éclairement $G=1000 \text{ w/m}^2$.

IV.4.7 Influence de la température sur les caractéristiques $P(V)$:

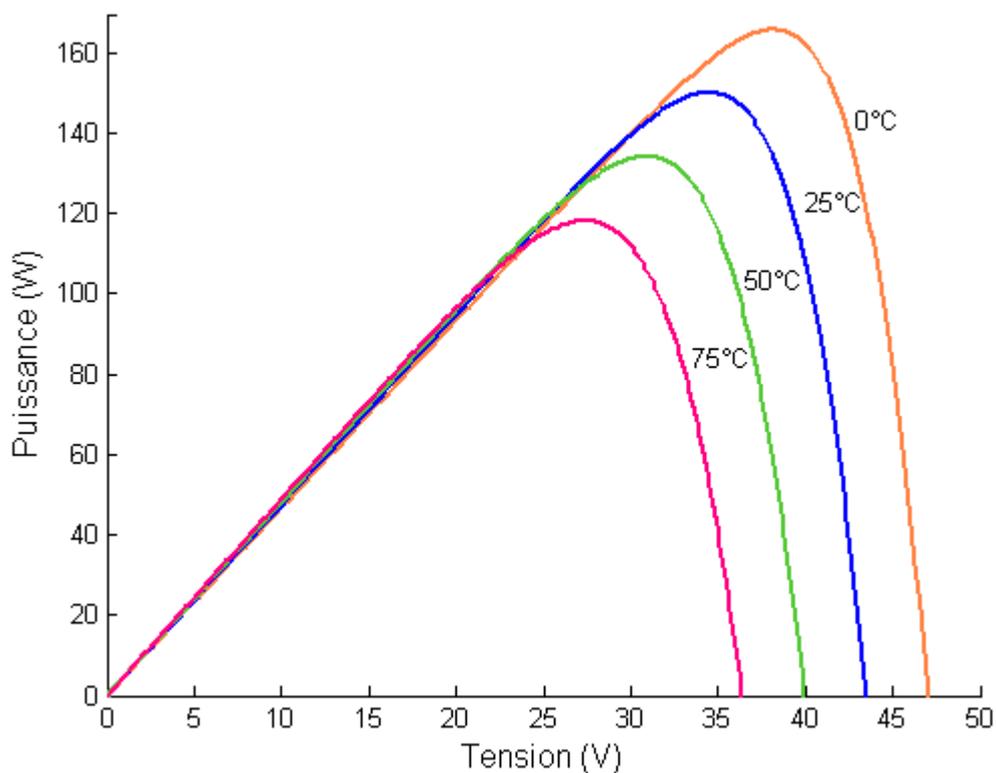


Figure 4.10 : $P=f(V)$ et l'influence de la température

IV.4.8 Influence de l'éclairement sur P(V) :

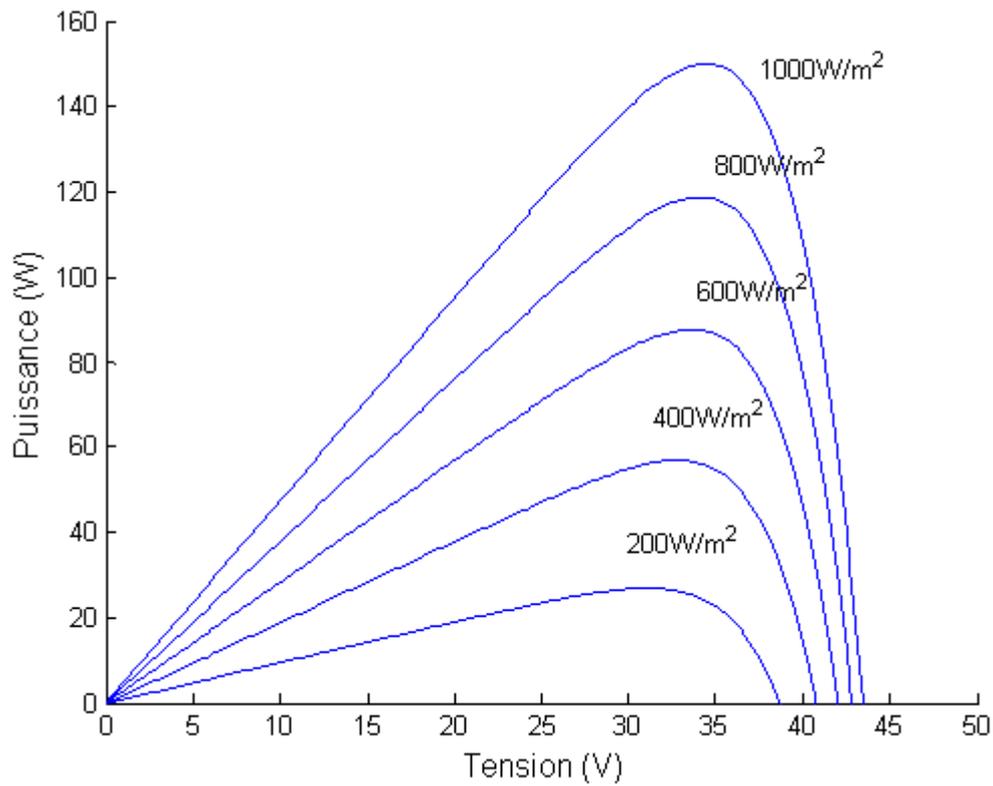


Figure 4.11 : $P=f(V)$ et l'influence de l'éclairement

L'éclairement est un facteur influant sur le courant et la tension aussi et tant que $P=V \cdot I$. On remarque une influence très apparente sur la courbe $P(V)$. La valeur de P_{max} diminue lorsque G diminue.

I.5 conclusion

D'après les résultats qu'on a obtenus on distingue que la température et un facteur influant sur les caractéristique d'une cellule photovoltaïque tell que la puissance générée ou la tension de sortie et on trouve que l'éclairement est la source général de la création d'un courant dans la cellule PV et il influx directement sur lui.

D'après les résultats que nous avons obtenus en constatons que la variation la température et l'éclairement se traduit par la dégradation de la courbe I (V) au niveau du coude.

Le mode de calcul des paramètres est simple à l'aide d'un système d'équation et l'utilisation d'un programme comme MATLAB nous aide beaucoup dans les calculs.

Le principal intérêt de ce modèle réside dans sa simplicité et sa facilité de mise en ouvre à partir des caractéristiques techniques données du constructeur.

Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce projet sont basées sur l'optimisation de la production d'énergie électrique photovoltaïque ainsi que son mode de fabrication et son avantage d'utilisation dans le future comme un remplaceant pour les autres modes de production.

A la fin de ce travail en peut résumer notre travail par les points suivants :

- Aujourd'hui, l'énergie photovoltaïque devient progressivement une source d'énergie à part entière, de plus en plus sollicitée pour produire de l'énergie électrique allant du domestique à de grandes centrales connectées au réseau.
- plusieurs étapes sont nécessaires pour la fabrication d'une cellule PV et leurs influences sur le prix de ces modules puisque le dopage et la purification possèdent des laboratoires à haute technologie et ça exigent les fabricants à faire augmenter le prix. Les panneaux solaires sont de plusieurs types mono et poly-cristalline et amorphe à une jonction ou à hétérojonction, généralement la cellule est une diode a jonction PN a des caractéristique (rendement, facteur de forme, le courant, la tension, etc...) sont généralement constantes pour chaque cellule.
- On avue aussi les caractéristiques I-V et le mode de connexion des cellules PV (série, parallèle).
- La modélisation et la conception d'un module ou générateur PV est une manière d'étude très important pour analyser le fonctionnement de système PV et voir l'influence de différents facteurs sur le module surtout la variation de l'éclairement et la température.
- Le principal intérêt de la modélisation réside dans sa simplicité et sa facilitée de mise en ouvre à partir des caractéristiques techniques données du constructeur.
- Nous avons montré que la température et l'éclairement sont des facteurs influant sur le rendement PV

Finalement, Ce travail propose le chois d'un modèle et un mode de calcul a l'aide d'un système d'équation pour un modèle a 4 paramètres et le faire traité a l'aide de MATLAB

BIBLIOGRAPHIE

- [1] : « réalisation d'un étage d'adaptation pour générateur photovoltaïque à partir d'un girateur du puissance ». **Maite Sanchez Rodriguez**. ESCOLA TECNICA SUPERIOR ENGINYERA/UNIVERCITAT ROVIRA VIRGIL
- [2] : « réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïques organiques obtenues par dépôt physique ». **Benoit BROUSSE**. Thèse doctorat 2004 UNIVERSITE DE LIMOGES.
- [3] : «Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie». **Corinne ALONSO** 2003 UNIVERSITÉ PAUL SABATIER – TOULOUSE III.
- [4]: «design and simulation of photovoltaic super système using simulink». **Tyson Denherder** 2006 california polyotchnic state university san luis Obispo.
- [5]: «simulation, fabrication et analyse de cellule photovoltaïque a contact arrière interdigtés ». these doctorat **Nichiporuk Oleksy** 2005 l'institut national des sciences appliquées de Lyon.
- [6] : « développement de cellules photovoltaïques a hétérojonctions silicium contact et en face arrière ». thes doctorat **Thibaut Desruse** 2009 l'institut national des sciences appliquées de Lyon.
- [7] : « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques ». these doctorat **M. Angel Cid Pastor** 2006 Laboratoire d'Analyse et d'Architectures des Systèmes (LAAS-CNRS).
- [8] : « Vers une ingénierie de bandes des cellules solaires à hétérojonctions a-Si:H/c-Si. Rôle prépondérant de l'hydrogène ». these doctorat **Jérôme Damon-Lacoste** 2007 ECOLE POLYTECHNIQUE, LPICM – Laboratoire de Physique des Interfaces et Couches Minces.
- [9] : « Systèmes photovoltaïques : fabrication et impact environnemental ». **Cécile Miquel sous la direction de Bruno Gaidon** 2009 HESPUL Energie Renouvelable et Efficacité Energétique.
- [10] : « dossier photovoltaïque » de la reflet physique **Bernard Equer** 2007 Dossier de la Société Française de Physique. www.sfpnet.fr.
- [11] : « Stocker l'énergie solaire: une solution d'avenir ». **Kevin Sivula, Florian Le Formal, Michael Grätzel, Massimiliano Capezzali, Hans Björn Püttgen** Bulletin SEV/AES 7/2009.
- [12]: «Étude d'un système solaire thermique : Effet de l'orientation des panneaux solaires ». **Saoussen Khalfallaoui, Dominique Seguin, Moulay Ahmed Abdelghani-Idrissi** LSPC Université de Rouen.

- [13] : «Caractérisations Electriques et Thermiques d'un Module PV au Silicium Multicristallin en Milieu Contrôlé et sur Site Saharien ». **K. Agroui, A. Belghachi et S. Kadri** Rev. Energ. Ren.: ICPWE (2003) 19-25.
- [14] : « Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques ». **V. BOITIER, P. MAUSSION** Université de Toulouse, INPT, UPS, CNRS.
- [15] : « Modélisation d'un générateur photovoltaïque dans l'environnement « Matlab ». **D.Saheb-Koussa et M.Haddadi** "4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP" 2007.
- [16] : « Optimisation du Rendement de Conversion Photovoltaïque des Cellules Solaires à base de GaAs et de Si ». **T. Baghdadli, A. Zerga et B. Benyoucef** Rev. Energ. Ren. : Valorisation (1999) 27-31.
- [17] : « Etude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire au silicium monocristallin ». W.C. Benmoussa, S. Amara et A. Zerga *Revue des Energies Renouvelables ICRESD-07 Tlemcen* (2007) 301 – 306.
- [18] : « ETUDE ET IDENTIFICATION DES DIFFERENTS MODELES ELECTRIQUES PHOTOVOLTAÏQUE ». **O.AMRANI, D. REKIOUA** Département d'électrotechnique, Université de Bejaia, (Algérie).
- [19] : «ELECTROTECHNIQUE 4^{ème} édition p 951 ». Théodore WILDI et Gilbert SYBILLE.
- [20] : « Propriétés électriques des semi-conducteurs » chapitre I.
- [21] : « PHYSIQUE DES SEMI-CONDUCTEURS II Applications Spéciales ». (Phys 233) **Marc HAELTERMAN** Service d'Optique et d'Acoustique Faculté des Sciences Appliquées Université Libre de Bruxelles.
- [22] : « propriétés électriques des semi-conducteurs p360 ».
- [23] : « approches numériques du transport de charges dans les semiconducteurs organiques ». Thèse doctorat **Hocine HOUILI** 2006 faculté des sciences et techniques de l'ingénieur ECOLE POLYTECHNIQUE LAUSANNE.
- [24] : « Croissance et Caractérisation de Nanofils de Silicium ». 2007 **Fabrice Oehler** Laboratoire Silicium Nanoélectronique Photonique et Structure (CEA/DSM/DRFMC/SP2M/SiNaPS) Ecole Normale Supérieure de Lyon Université Claude Bernad Lyon 1.
- [25] : « ETUDE DE LA JONCTION PN D'UN SEMI-CONDUCTEUR A L'EQUILIBRE THERMODYNAMIQUE ». **I. Sari-Ali, B. Benyoucef, B. Chikh-Bled** Journal of Electron Devices, Vol. 5, 2007, pp. 122-126.

[26]: «Physique et technologie des composants de puissance ». 2003 **Luc LASNE** université de Bordeaux 1 DEPARTEMENT E.E.A www.creea.u-bordeaux.fr .

[27] : « Systèmes de conversion de l'énergie éolienne ». Liuchen Chang, Université du Nouveau-Brunswick, NB www.ieee.ca/canrev/canrev40/chang_fr.pdf.

[28] : « A. VIAL, Étude des lignes de déclinaison d'un cadran solaire horizontal 2006, site internet "kaekoda.free.fr/bup/bup1" ».

[29]: Cours des semi-conducteurs ; le semi-conducteur ; chapitre 1 : les semi-conducteurs, technique de l'ingénieur.

[30] : « Production d'énergie électrique : ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE ». **B. Flèche - D. Delagnes** / juin 07 Approche générale.

[31] : « Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque». **A. Ould Mohamed Yahya, A. Ould Mahmoud et I. Youm** Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°3 (2008) 473 – 483.

[32] : <http://glloq69.free.fr/TPE/synteses.php>

[33]: « DESIGN AND SIMULATION OF PHOTOVOLTAIC WATER PUMPING SYSTEM». These doctorat **Akihiro Oi** Septembre 2005.

[34] : « La filière Photovoltaïque ». **André Mermoud** 3 avril 2008. Pôle en Sciences de l'Environnement / Groupe Energie (CUEPE)/université de Genève.

[35] : « Réalisation d'un régulateur solaire à base de microcontrôleur pour le contrôle de l'état de charge et la protection des accumulateurs ». **S. Zaamta et A. Dib**. Institut des Sciences Technologiques, Université Larbi Ben M'Hidi, Oum El Bouaghi/Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°1 (2009) 137 – 147.

[36] : « Potentiel énergétique éolien ». **N. Kasbadji Merzouk** Chargée de Recherche, Chef de projet e-mail : nachida@hotmail.com. Bulletin des énergies renouvelables - N° 1 Juin 2002.

[37]: « 20th World Energy Congress – Rome, November 11th – 15th, 2007». Projet Maghreb – Europe : Production d'Hydrogène Solaire Phase I : Etude d'Opportunité et de Faisabilité du Projet. **Bouziane MAHMAH, Maïouf BELHAMEL, Samira CHADER, Abdelhamid M'RAOUI, Farid HAROUADI, Claude ETIEVANT, Stève LECHEVALIER, Abdel-Nasser CHERIGUI**.

[38] : « Etude du transport et ingénierie de bandes dans les diodes organiques électroluminescentes a hétéro-structures ». **M. BEN KHELIFA** 2004.

