

Sommaire :

Sommaire	1
Liste des figures	5
Liste des tableaux	8
Liste des abréviations	9
Introduction générale	11
Chapitre I: Rappel de fonctionnement physique d'une cellule photovoltaïque.....	13
I.1 /Introduction.....	14
I.2/Historique de la cellule photovoltaïque.....	15
I.3/ Rayonnement solaire	15
I.3.1/ Inclinaison de la terre	17
I.3.2/Inclinaison du module par rapport au soleil	18
I.3.3/ Masse d'air	18
I.4/La cellule photovoltaïque	19
I.4.1/définition	19
I.4.2/ Principe de fonctionnement d'une cellule	20
I.4.2.1/Les matériaux semi-conducteurs	20
I.4.2.1.1/Les semi-conducteurs intrinsèques	20
I.4.2.1.2/Les semi-conducteurs extrinsèques	21
I.4.2.2/ La jonction PN	22
I.4.3/L'effet photovoltaïque	23
I.4.3.1/Définition	23
I.4.3.2/Principe de la conversion photoélectrique	23
I.4.4/Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque.....	26
I.4.4.1/ Circuit électrique idéal	26
I.4.4.2/ Schéma équivalent d'une cellule	27
I.4.4.3/Schéma bloc d'une cellule PV	28
I.4.4.4/Paramètres essentiels caractérisant une cellule PV	28
I.4.4.4.1/La courbe courant-tension d'une cellule PV	28
I.4.4.4.2/Courant de court-circuit (I_{cc})	29
I.4.4.4.3/Tension de circuit ouvert(V_{co})	29
I.4.4.4.4/La puissance caractéristique d'une cellule PV	29
I.4.4.4.5/La puissance max	30
I.4.4.4.6/Facteur de forme	31
I.4.4.4.7/Rendement de conversion d'énergie	31
I.4.4.4.8/Réponse spectrale	31
I.5/Conclusion	33
Chapitre II : Etude de nouvelle structure de cellule photovoltaïque.....	34
II.1/Introduction	35
II.2/Etat de l'art des cellules photovoltaïques	35

II.3/Les différentes filières photovoltaïques	35
II.3.1/ Le silicium	36
II.3.1.1/Le silicium monocristallin	36
II.3.1.2/Le silicium multicristallin	36
II. 3.1.3/Le silicium en ruban auto-supporté	37
II.3.1.4/Le silicium nanocristallin et amorphe	37
II.3.2/Cellules couche mince : les chalcogénures	37
II.3.2.1/ Matériaux à base de Tellure de Cadmium (CdTe)	37
II.3.2.2/Matériaux CIS, CIGS et voie « bon marché »	38
II. 3.3/Les cellules III-V multijonction	38
II.3.4/Les cellules nanocristallines à colorant ou cellules « de Graëtzl »	38
II. 3.5/Les cellules photovoltaïques organiques	39
II.4/Comparaison des différentes technologies des cellules PV	40
II.5/Structure d'une cellule photovoltaïque	41
II. 5.1/ L'émetteur et la base	41
II. 5.2/ La texturisation de la surface.....	41
II. 5.3/ Les contacts face avant et face arrière.....	42
II.5.4/ La couche antireflet.....	42
II. 5.5/BSF.....	42
II.5.6/ La passivation	42
II.6/Conclusion	42
Chapitre III: Simulation d'une cellule photovoltaïque.....	43
III.1/Introduction	44
III.2/ Logiciel de simulation PC1D	44
III.3/Aperçu du logiciel	45
III.4/ Le fonctionnement du PC1D	46
III.5/Structure simulée	47
III.6/Etude de la cellule photovoltaïque a base de Si	47
III.6.1/L'influence du dopage du substrat sur le rendement électrique	47
III.6.1.1/Graphe	48
III. 6.1.2/Interprétation du graphe	48
III. 6.2/ L'influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement électrique	48
III.6.2.1/Graphe	49
III. 6.2.2/Interprétation du graphe	49
III.7/Etude de la cellule photovoltaïque a base d'InP	49
III.7.1/L'influence du dopage du substrat sur le rendement électrique	49
III.7.1.1/Graphe	50
III. 7.1.2/Interprétation du graphe	50
III.7.2/ L'influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement électrique	50
III.7.2.1/Graphe	51
III. 7.2.2/Interprétation du graphe	51
III.8/Conclusion	51

Chapitre IV: Etude d'un panneau solaire.....	52
IV.1/Introduction	53
IV.2/De la cellule au panneau	53
IV. 2.1/La mise en série des cellules	53
IV. 2.2/La mise en parallèle des cellules	53
IV.2.3/Le module photovoltaïque	54
IV.2.4/Montages des modules photovoltaïques	54
IV. 2.4.1/Montage en série	54
IV. 2.4.2/Montage en parallèle	55
IV.2.5/Nombre de cellules par module	55
IV.3/Les panneaux	56
IV.3.1/Caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque	57
IV.3.1.1/Tension de circuit ouvert(VCO)	57
IV. 3.1.2/Courant de court circuit(ICC)	57
IV. 3.1.3/Caractéristiques $I=f(U)$	57
IV. 3.1.4/Caractéristiques $P=f(U)$	58
IV.3.2/ Le châssis	58
IV. 3.3/Le câblage	59
IV.4/Protection d'un GPV	59
IV.5/Le stockage d'énergie	60
IV. 5.1/Choix de la technologie	60
IV. 5.1.1/Les principales caractéristiques des batteries.....	60
IV. 5.1.2/ Les différents types de batteries selon leur composition.....	61
IV.5.2/Tableau comparatif des différentes technologies	62
IV.6/Le régulateur de charge	62
IV. 6.1/ Technologie des régulateurs	65
IV. 6.1.1/ Régulateurs de type shunt	65
IV. 6.1.2/Régulateurs de type série	66
IV.6.1.3/Régulateurs PWM	66
IV. 6.1.4/Régulateurs MPPT	67
IV.7/Les convertisseurs.....	67
IV. 7.1/Les convertisseurs DC/DC (ou les hacheurs)	67
IV.7.2/Les onduleurs DC/AC	68
IV.7.2.1/L'onduleur central	69
IV. 7.2.2/Les onduleurs strings	69
IV. 7.2.3/Les onduleurs intégrés aux panneaux PV	69
IV.8/Techniques de poursuite du point de puissance maximale MPPT	70
IV.8.1/Introduction	70
IV. 8.2/Principe de MPPT	71
IV.9/Les systèmes photovoltaïques	71
IV. 9.1/ Les systèmes photovoltaïques avec stockage électrique	71
IV. 9.2/ Les systèmes à couplage direct sans batterie	72
IV.10/Secteurs d'application	73
IV.11/Conclusion	74

Chapitre V: Dimensionnement d'une station solaire.....	75
V.1/Introduction	76
V.2/Détermination des besoins de l'utilisateur(Etape1).....	76
V.3/Energie solaire récupérable (Etape2).....	77
V.3.1/Données d'ensoleillement	77
V.4/Dimensionnement du générateur solaire (Etape3)	77
V.5/ Définition de la capacité de la batterie(Etape4)	78
V.6/ Dimensionnement du régulateur (Etape5)	78
V.7/Choix des câbles (Etape6).....	78
V.8/Principe de calcul	79
V. 8.1/Coefficient correctif (K)	80
V.8.2/Calcul de la puissance module requise	80
V.8.3/Calcul de la capacité de batterie requise	81
V.8.4/Calcul économique	81
V.9/Etude d'un cas (avec le logiciel PVsyst).....	82
V.9/Avantages et inconvénients de l'énergie solaire	86
V. 9.1/Avantages	86
V.9.2/ Inconvénients.....	86
V.10/Conclusion	87
Conclusion générale.....	88
Annexe.....	89
Bibliographie.....	94

Liste des figures :

Figure (1-1) : photo des 3 chercheurs américains.....	15
Figure (1-2): Géométrie schématique des rapports terre-soleil.....	16
Figure (1-3) : Spectre d'irradiante solaire.....	17
Figure (1-4) : Courbe de déclinaison du soleil.....	18
Figure (1-5) : Description du nombre de masse d'air.....	19
Figure (1-6): Une cellule PV.....	19
Figure (1-7) : La structure de Si.....	20
Figure (1-8) : Le diagramme énergétique.....	20
Figure (1-9) : Dopage de type N.....	21
Figure (1-10) : Dopage de type P.....	21
Figure (1-11) : La jonction PN.....	22
Figure (1-12) : La zone de transition.....	22
Figure (1-13) : Coupe transversale d'une cellule PV.....	23
Figure (1-14) : Principe de la conversion photoélectrique.....	24
Figure (1-15) : Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque.....	25
Figure (1-16) : Schéma électrique idéal de cellule photovoltaïque.....	26
Figure (1-17) : Schéma électrique équivalent de cellule photovoltaïque.....	27
Figure (1-18) : Schéma bloc d'une cellule PV.....	28
Figure (1-19) : Caractéristiques $I=f(V)$ sous obscurité et sous éclairage d'une cellule PV.....	28
Figure (1-20) : Puissance d'une cellule PV.....	29
Figure (1-21) : Puissance max d'une cellule PV.....	30
Figure (1-22) : Réponse spectrale.....	32
Figure (2-1): Les différentes technologies des cellules PV.....	35
Figure (2-2) : Part de marché des différentes technologies photovoltaïques en 2010.....	36

Figure (2-3): Schéma de principe d'une cellule à colorant.....	39
Figure (2-4): Structure d'une cellule photovoltaïque.....	41
Figure (3-1): Fenêtre du logiciel PC1D.....	45
Figure (3-2): Structure et paramètres de la cellule de référence simulée.....	47
Figure (3-3): Variation de du rendement η en fonction du dopage du substrat en silicium de type p.....	48
Figure (3-4): Variation de du rendement η en fonction de l'épaisseur de l'émetteur.....	49
Figure (3-5): Variation de du rendement η en fonction du dopage du substrat en InP de type p.....	50
Figure (3-6): Variation de du rendement η en fonction de l'épaisseur de l'émetteur.....	51
Figure (4-1) : Schéma de 3 cellules PV associées en série.....	53
Figure (4-2) : Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle.....	53
Figure (4-3): Module PV monocristallin.....	54
Figure (4-4) : Branchement des modules en séries.....	54
Figure (4-5): Branchement des modules en parallèles.....	55
Figure (4-6): Structure d'un panneau photovoltaïque au silicium amorphe.....	56
Figure (4-7) : $I = f(V)$ d'un panneau PV à éclairnement.....	57
Figure (4-8) : Courbes de puissance en fonction de la tension aux bornes d'un panneau PV.....	58
Figure (4-9) : Schématisation d'un GPV élémentaire avec diode by-pass et diode anti-retour.....	59
Figure (4-10) : Photo d'une batterie.....	60
Figure (4-11) : Fonctionnement d'un régulateur charge/décharge.....	64
Figure (4-12) : Les différents états de fonctionnement du système.....	64
Figure (4-13) : Schéma d'un régulateur de type shunt.....	65
Figure (4-14) : Schéma d'un régulateur de type série.....	66
Figure (4-15) : Principales configurations de convertisseurs DC-DC.....	68
Figure (4-16) : Circuit électrique de base d'un onduleur.....	68

Figure (4-17) : Schémas de principe de différentes installations PV connectés à un réseau électrique.....	70
Figure (4-18) : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.....	71
Figure (4-19) : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec stockage.....	72
Figure (4-20) : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque à couplage direct.....	72
Figure (4-21) : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque.....	73
Figure (5-1) : Détermination des sections de câble en courant continu.....	79
Figure (5-2) : Evaluation de la consommation journalière.....	80
Figure (5-3) : Stockage saisonnier de la batterie.....	81

Liste des tableaux

Tableau (2-1) : Comparaison des différentes technologies des cellules PV.....	40
Tableau (4-1) : Tableau comparatif des différentes technologies.....	62
Tableau (5-1) : Grille de calcul des consommations en énergie.....	77

Liste des abréviations:

- PV : photovoltaïque
- GPV : générateur photovoltaïque
- Si : silicium
- Ge : germanium
- Se : sélénium
- GaAs : l'arséniure de gallium
- N_S : Nombres des cellules en sérier.
- N_P : Nombres des cellules en parallèle
- ZCE : Zone de Charge d'Espace
- E_{ph} : L'énergie d'un photon
- C_{t-s} : correction terre soleil
- CdTe : tellure de cadmium
- CIS : Cuivre Indium Sélénium
- L_n : longueurs de diffusion n
- L_p : longueurs de diffusion p
- InP : indium de phosphore
- CIGS : cuivre, indium, gallium et sélénium
- KOH : L'hydroxyde de potassium
- NaOH : L'hydroxyde de sodium
- CAR : couche antireflet.
- BSF : Back Surface Field = champ électrique arrière
- c : Vitesse de la lumière
- P : puissance électrique
- V : Tension
- Max : maximum

η : Le rendement

AM : masse d'air

FF : facteur de forme

I : Intensité de Courant [A]

F : Fréquence [Hz]

V_{CO} : Tension de circuit ouvert

I_{CC} : courant de court circuit

I_{ph} : photocourant

Ah : ampères-heures

NiCd : Nickel Cadmium

NiMH : Nickel Métal Hydrures

V_{fc} : tension de fin de charge

V_{rc} : tension de recharge

MPPT : Maximum Power Tracker = Techniques de poursuite du point de puissance maximale

PWM: Pulse Width Modulation

DC= CC: Courant Continu

AC=CA : Courant alternatif

ISO : l'organisation international de standardisation

ASTM : société américaine de test et de matériaux

C_{t-s} : correction terre soleil

MOSFET: Metal Oxide Silicon Field Effect Transition

T : la température absolue en °K

K: Constante de Boltzmann [$1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K]

q : La charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C).

Wc : Watt crête.

Introduction générale

Introduction générale :

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir, en effet les besoins énergétiques des pays industrialisés ne cessent d'augmenter, par ailleurs les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement.

De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir des énergies fossiles, la consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures, et aussi face aux multiples crises économiques et pétrolières la science s'est intéressée aux ressources dites renouvelables qui constituent un secteur stratégique et occupent une place privilégiée dans les domaines de recherche et développement.

Aujourd'hui on distingue plusieurs sources d'énergies renouvelables, l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie de la biomasse, l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque (qui sera étudiée dans ce mémoire).

L'avantage principal de ces énergies renouvelables est que leurs utilisations ne polluent pas l'atmosphère et elles ne produisent pas de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote qui sont responsables du réchauffement de la terre. [1]

Ces multiples raisons donnent un regain d'intérêt au développement et à l'utilisation des énergies renouvelables sous ces différentes formes : photovoltaïque, éolienne et thermique. L'Algérie entreprend un engagement dans ce sens afin de préserver l'environnement et les ressources énergétiques d'origine fossile comme le pétrole et le gaz naturel. Vu le gisement solaire important dont dispose l'Algérie, le programme national des énergies renouvelables se concentre essentiellement sur le développement de l'énergie photovoltaïque.

Le tableau (1-1) montre le potentiel solaire en Algérie.

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heure/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m²/an)	1700	1900	2650

Tableau (1-1): Potentiel solaire en Algérie. [2]

L'énergie photovoltaïque est une possibilité de développement efficace et durable tant que le soleil brille encore, c'est pour cela que les recherches scientifiques se développent dans le sens de généraliser, améliorer et optimiser l'exploitation des systèmes solaires.

Introduction générale

L'optimisation des systèmes solaires est basée sur des critères de dimensionnement et de maximisation de la puissance générée pour avoir un bon rendement.

Sachant que le but essentiel de toutes les recherches est l'amélioration globale des performances des systèmes de conversion photovoltaïque (PV), lorsqu'un générateur photovoltaïque alimente une charge, quelle que soit sa nature, ceci n'implique pas forcément une mauvaise rentabilité du système global, mais l'équivalence entre le rendement admissible et le coût moyen d'exploitation détermine le degré d'efficacité d'utilisation de l'énergie solaire.

Ce travail comporte cinq chapitres ainsi qu'une introduction générale et une conclusion générale.

Chapitre (1) : Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension du fonctionnement physique d'une cellule photovoltaïque. Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales.

Chapitre (2) : Dans un premier temps nous présenterons les différentes technologies des cellules photovoltaïques et d'autre part nous avons fait une comparaison entre les différentes filières photovoltaïques. Puis nous exposerons la structure d'une cellule photovoltaïque.

Chapitre (3) : Dans ce chapitre nous avons étudié l'influence du dopage du substrat et l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement électrique de la cellule photovoltaïque à base de Si et InP, à l'aide du simulateur PC1D dont la structure de cette cellule est $n^+ - p - p^+$.

Chapitre (4) : Dans ce chapitre nous avons présenté : les caractéristiques des panneaux photovoltaïques, ainsi que les différents éléments des systèmes photovoltaïques : les batteries, les régulateurs, les convertisseurs et le MPPT. Et enfin on a présenté les différents systèmes photovoltaïques.

Chapitre (5) : Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes étapes de dimensionnement d'un système photovoltaïque, Puis on a étudié un cas pour alimenter une maison à contenir plusieurs modèles de charge.

Chapitre I: Rappel de fonctionnement physique d'une cellule photovoltaïque

I.1 /Introduction :

Les cellules photovoltaïques (PV) ouvrent la possibilité de produire de l'électricité directement à partir du rayonnement solaire, sans nécessiter ni pièces mobiles, ni production de chaleur et sans entraîner de pollution atmosphérique, locale ou globale. L'évolution technologique a été importante depuis les premières photopiles qui, en raison de leur coût très élevé et de leur faible rendement, étaient principalement destinées à des applications très spécifiques telles que l'alimentation énergétique des satellites. Les programmes initiés dans de nombreux pays à la suite des chocs pétroliers pour améliorer la productivité des cellules et diminuer leur coût, ont permis une progression sensible des performances ; le prix moyen des cellules qui dépassait 100 \$/Wc au début des années 1970, a ainsi été ramené autour de 5 \$/Wc à la fin des années 1980. La production industrielle qui était limitée à quelques dizaines de kWc au début des années 1970, a été multipliée par un facteur mille en l'espace d'une dizaine d'années pour atteindre 10 MWc en 1982, puis 100 MWc en 1997. [4]

La diffusion des cellules PV s'étend aujourd'hui au delà des marchés niches initiaux sur des applications spécifiques, en particulier, les télécommunications dans les pays industrialisés ou l'électrification des populations rurales isolées, dans les pays en développement. Si des applications nécessitent des mécanismes d'incitation appropriés, le PV représente d'ores et déjà, la technologie de référence sur certains segments de marché. La possibilité pour l'énergie PV de figurer un jour parmi les technologies de production d'électricité et de contribuer significativement à l'approvisionnement énergétique reste toutefois encore incertaine. L'intermittence et la faible concentration de la ressource constituent des contraintes techniques fortes pour une intégration au système électrique. Mais surtout, la progression des performances est encore insuffisante pour assurer la compétitivité du PV avec les technologies existantes de production d'électricité. Pour pénétrer sur le créneau des applications raccordées au réseau, la dynamique de progression des rendements et de décroissance des coûts doit se poursuivre. Or, il n'est pas certain que les marges de progression résiduelles sur la trajectoire technologique aujourd'hui dominante soient compatibles avec la nécessaire réduction du coût de l'électricité PV. [5]

Plusieurs technologies sont en compétition pour la production de cellules PV, mais le silicium cristallin est la technologie dominante. Sa proximité technologique avec l'industrie des composants électroniques lui a permis de s'imposer rapidement en profitant de la base de connaissance acquise par cette dernière, puis du processus d'apprentissage occasionné par l'élargissement de la diffusion du PV. Aujourd'hui le silicium cristallin est la technologie qui présente les meilleures performances mais elle dépend de procédés industriels mal adaptés à la production à grande échelle et à faibles coûts, indispensables pour pénétrer sur les marchés énergétiques. [6]

I.2/Historique de la cellule photovoltaïque :

En effet le mot " *photovoltaïque* " vient de mot grec " *photo* " qui signifie lumière et de " *voltaïque*" qui tire son origine du nom d'un physicien italien "*Alessandro volta*" (1754 -1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la « lumière électricité ».

1839 : Le physicien français « *Edmond Becquerel* » découvre l'effet photovoltaïque.

1875 :« *Werner Von Siemens*» expose devant l'Académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi conducteurs.

1887 : « *Heinrich Rudolph Hertz*» présenta pour la première fois l'effet photoélectrique dans un article de la revue scientifique « *Annalen der Physik* ».

On appelle effet photoélectrique l'émission des électrons par un matériau soumis à un éclairage ou à un rayonnement électromagnétique d'intensité propre au matériau.

Mais jusqu'a la seconde guerre mondiale, le phénomène reste encore une découverte anecdotique.

1954 : Les chercheurs américains "*Gerald Pearson*", "*Darry Chapin*" et "*Calvin Fuller*" fabriquent une cellule Photovoltaïque en silicium.

1958 : une cellule avec un rendement de 9% est mise au point les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de Delaware.



Figure (1-1) : photo des 3 chercheurs américains. [7]

1983 : La première voiture alimentée en énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 Km en Australie.

2013 : "*Lem*" et "*Heweliusz* ", les premiers nano-satellites polonais de la constellation BRITe, Décolleront. [4]

I.3/ Rayonnement solaire :

La distance de la terre au soleil est environ 150 million de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000 km/h, les rayons du soleil mettent donc environ 8 minutes à nous parvenir. La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est communément prise égale à 1360 W/m^2 . Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduit à 1000 W/m^2 à cause de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein à découvert en travaillant sur l'effet

photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon étant donnée par la relation :

$$E_{\text{ph}} = h\nu = hc/\lambda \quad (1-1)$$

Avec :

h : Constante de Planck (J.s).

ν : Fréquence (s^{-1}).

c : Vitesse de la lumière dans le vide (m.s).

λ : Longueur d'onde (m).

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande.

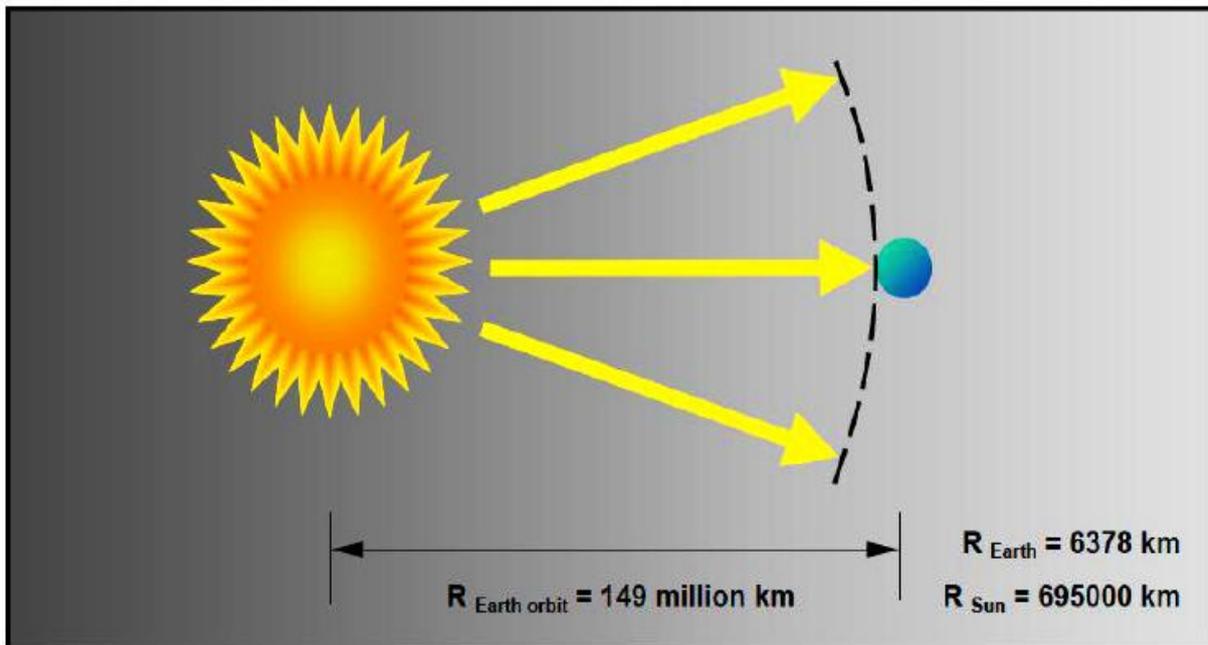


Figure (1-2): Géométrie schématique des rapports terre-soleil.

Une façon commode d'exprimer cette énergie est :

$$E_{\text{ph}} = 1.26/\lambda \quad (1-2)$$

Le rayonnement du soleil parvenant à la surface de la terre se compose de l'infrarouge qui procure de la chaleur, le visible qui est nécessaire à la croissance des plantes et des animaux, l'ultraviolet qui brunit la peau et tue les bactéries. Le spectre du soleil s'étend de 200 nm à 3000 nm tel que montré à la figure (1-3). [8]

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit:

- 9 % dans la bande des ultraviolets ($< 0.4 \mu\text{m}$).
- 47 % dans la bande visibles ($0.4 \text{ à } 0.8 \mu\text{m}$).
- 44 % dans la bande des infrarouges ($> 0.8 \mu\text{m}$).

Les photopiles se différencient par leur sensibilité spectrale, ou capacité à convertir certaines longueurs d'onde.

Au cours de ces dix dernières années ce spectre a été homologué par l'organisation internationale de standardisation (ISO 9845-1 :1992) et la société américaine de test et de matériaux (ASTM E 892-87 :1992) ont fixées le flux de standardisation à 1000 W/m^2 .

Cette énergie est définie comme paramètre solaire qui à une valeur variable suivant la saison, l'heure, la localisation géographique du site, les conditions météorologiques (poussière, humidité,...etc.).

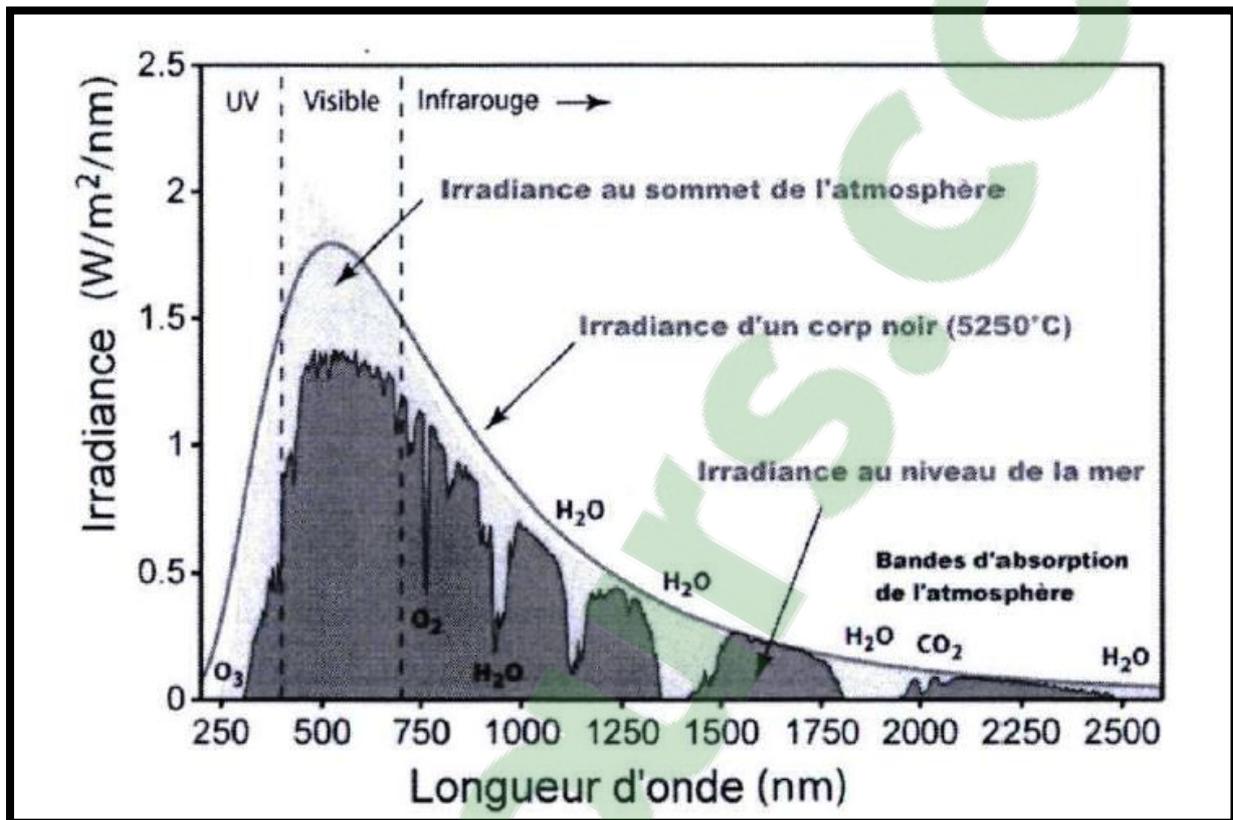


Figure (I-3) : Spectre d'irradiance solaire.

La valeur retenue pour la constante solaire est : $E_0 = 1360 \text{ W/m}^2$ Cette valeur est variable pendant l'année puisque la distance terre-soleil est elle-même variable (résultat de la trajectoire elliptique), on peut déduire que : $1300 \text{ W/m}^2 < E_0 < 1390 \text{ W/m}^2$.

La correction terre soleil est donnée par:

$$C_{t-s} = 1 + 0.034 \cos [(360/365) (j-2)]$$

Où:

j : Angle entre le soleil et le plan horizontal du lieu.

La constante solaire corrigée est: $E = E_0 * C_{t-s}$

I.3.1/ Inclinaison de la terre :

L'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan équatorial est donné par :

$$d = \arcsin [0.389 \sin [(360/365) * (N-82)] + 2 \sin [(360/365) * (N-2)]]$$

Où :

N : est le nombre de jours de l'année à partir du premier janvier.

I.3.2/Inclinaison du module par rapport au soleil :

Les panneaux solaires doivent être placés perpendiculairement au soleil pour obtenir un résultat optimal.

Pour récupérer un maximum de rayonnement solaire, on doit ajuster à la fois l'orientation et l'inclinaison du panneau solaire.

L'orientation indique vers quel point cardinal un panneau est exposé : face au sud, au nord, à l'est, ou à l'ouest. L'inclinaison est l'angle que fait le panneau avec le plan horizontal.

L'ajustement sur le plan horizontal (azimut) s'obtient en pointant les panneaux solaires : vers le sud lorsqu'on est dans l'hémisphère nord, vers le nord lorsqu'on est dans l'hémisphère sud. L'ajustement sur le plan vertical nécessite de connaître la trajectoire du soleil, en fonction de la saison et du lieu géographique.

Aux équinoxes du 21 mars et du 21 septembre, le soleil est perpendiculaire à l'Equateur. Au solstice du 21 juin, il est perpendiculaire au tropique du Cancer (hémisphère nord). Au solstice du 21 décembre, il est perpendiculaire au tropique du Capricorne (hémisphère sud). Le soleil se lève à l'Est et se couche à l'ouest et le Québec se situe dans l'hémisphère nord à une latitude de 46° environ. Le soleil au zénith est donc vers le sud. Globalement, les rayons du soleil viennent donc plus du sud que des autres directions, d'autant plus qu'à midi, lorsque le soleil est au zénith et donc plein sud, le rayonnement est le plus intense.

La déclinaison varie entre -23,45° le 21 décembre et +23,45° le 21 juin. [8]

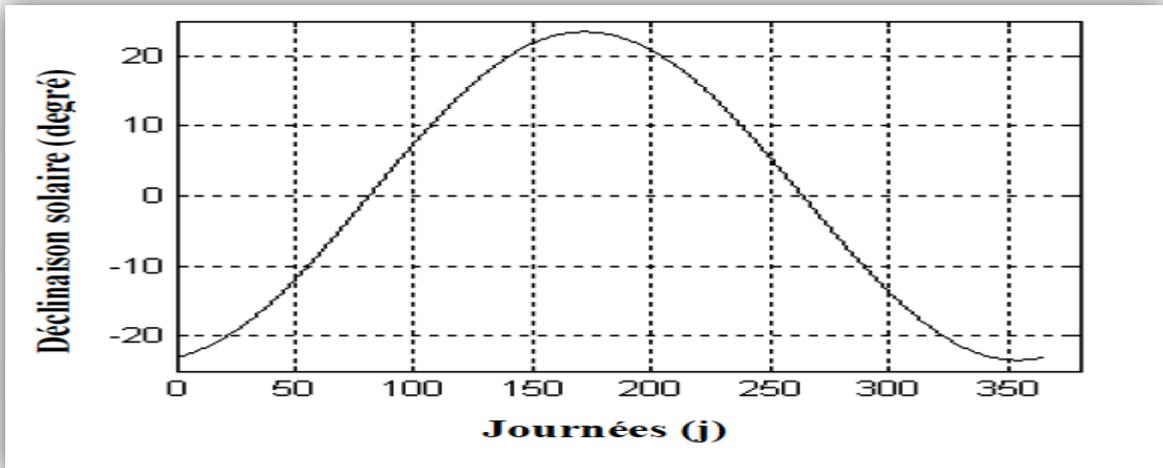


Figure (1-4) : Courbe de déclinaison du soleil.

I.3.3/ Masse d'air :

On appelle masse d'air AM , la perte de l'énergie solaire par l'absorption atmosphérique. Elle est donnée en fonction de l'angle entre le soleil et le zénith.

$$AM \approx 1/\sin \theta$$

Où :

θ : représente l'angle entre la position du soleil et le zénith exprimée en (Degré).

Le spectre solaire AM0 correspond à une masse d'air nulle pour un rayonnement arrivant au dessus de la couche atmosphérique à incidence normale, AM1 pour un soleil vertical à la terre (le soleil est au zénith), et AM1.5 pour un rayonnement solaire correspondant à une inclinaison du soleil de 45° par rapport au zénith.

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.

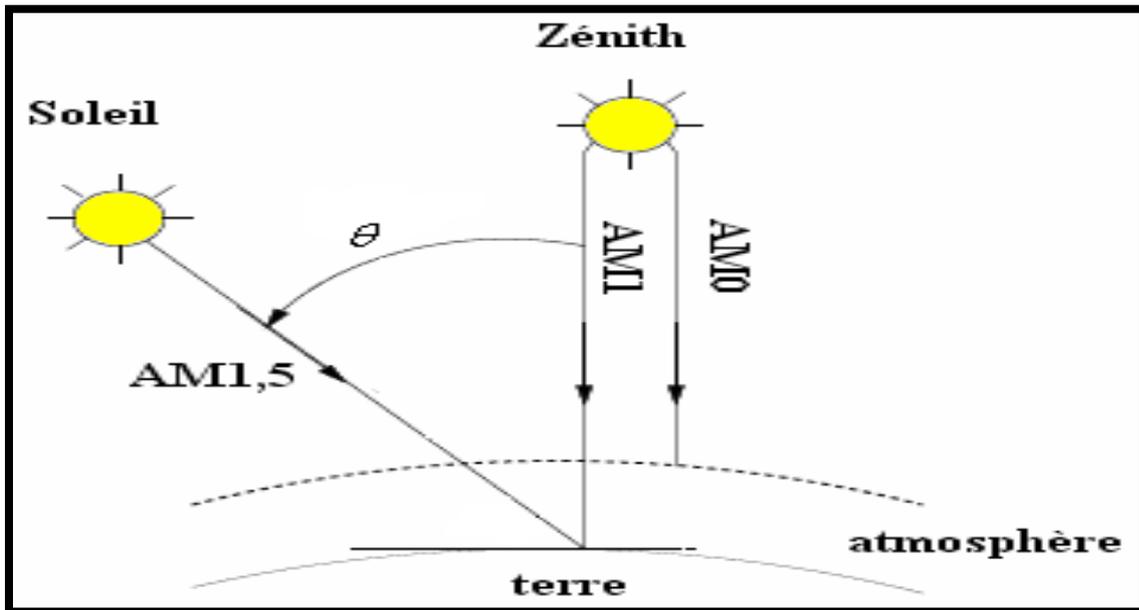


Figure (1-5) : Description du nombre de masse d'air.

I.4/La cellule photovoltaïque :

I.4.1/définition :

La cellule PV est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Elle est réalisée à partir de matériaux semi-conducteurs (par exemple le silicium).

Sa réalisation est comparable à une diode classique.

La cellule est composée de deux différentes couches, la couche supérieure est dopée N et la couche inférieure est dopée P créant ainsi une jonction PN. [1]



Figure (1-6): Une cellule PV.

I.4.2/ Principe de fonctionnement d'une cellule :

I.4.2.1/Les matériaux semi-conducteurs :

Les matériaux semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants.

Les quatre électrons de valence du silicium permettent de former quatre liaisons covalentes avec un atome voisin.

Dans ce cas, tous les électrons sont utilisés et aucun n'est disponible pour créer un courant électrique.

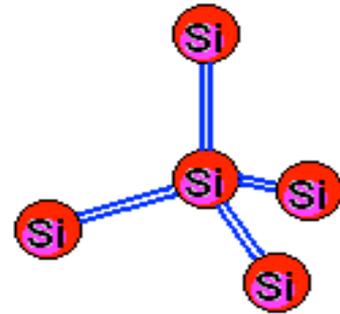


Figure (1-7) : La structure de Si.

Il existe différentes techniques permettant la conversion directe de la lumière solaire en électricité. La plus connue est la conversion photovoltaïque effectuée à l'aide de matériaux semi-conducteurs tel que le silicium (Si), le germanium (Ge), le sélénium (Se) ou les composés semi-conducteurs tel que l'arséniure de gallium (GaAs), ou le tellurure de cadmium (CdTe).

Les cellules solaires de type (GaAs) sont très coûteuses dans leur fabrication et leur utilisation est aujourd'hui limitée aux applications spatiales.

La majorité des cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir du silicium cristallin, car il possède la caractéristique d'être non toxique contrairement au cadmium ou au sélénium.

En plus, il permet d'atteindre des efficacités de conversion remarquables.

Le silicium constitue environ 28% de l'écorce terrestre sous forme de composés (silicates, silice), ce qui en fait une source quasi inépuisable. [5]

I.4.2.1.1/Les semi-conducteurs intrinsèques :

Les électrons situés sur la couche la plus éloignée du noyau, qui participent aux liaisons covalentes peuvent, sous l'effet de l'agitation thermique, devenir porteur de charge.

Le diagramme énergétique est constitué de deux bandes (conduction et valence) séparé par une bande interdite (gap). Pour franchir cette bande l'électron doit acquérir de l'énergie (thermique, photon, ...).

Mais le nombre d'électrons libres dans un semi-conducteur intrinsèque reste très faible. Ici le nombre de trou et d'électron est égal. [9]

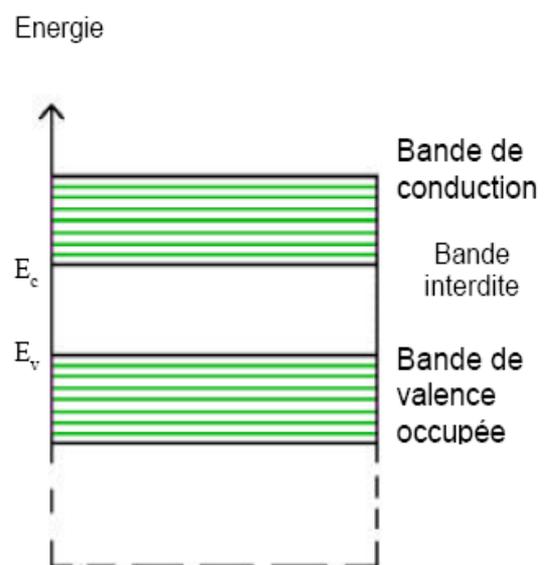


Figure (1-8) : Le diagramme énergétique.

I.4.2.1.2/ Les semi-conducteurs extrinsèques :

Pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs on y introduit des impuretés. Ce procédé est appelé dopage.

Dopage de type N :

On remplace un atome de silicium par un atome pentavalent.

Quatre d'entre eux assurent les liaisons avec les atomes voisins de silicium et le cinquième resté disponible va être excité vers la bande de conduction très facilement par l'agitation thermique. D'où le nombre d'électron libre qui va fortement augmenter : dans ce cas le nombre de trou est très inférieur au nombre d'électron libre.

On obtient ainsi un cristal dopé N (négatif).

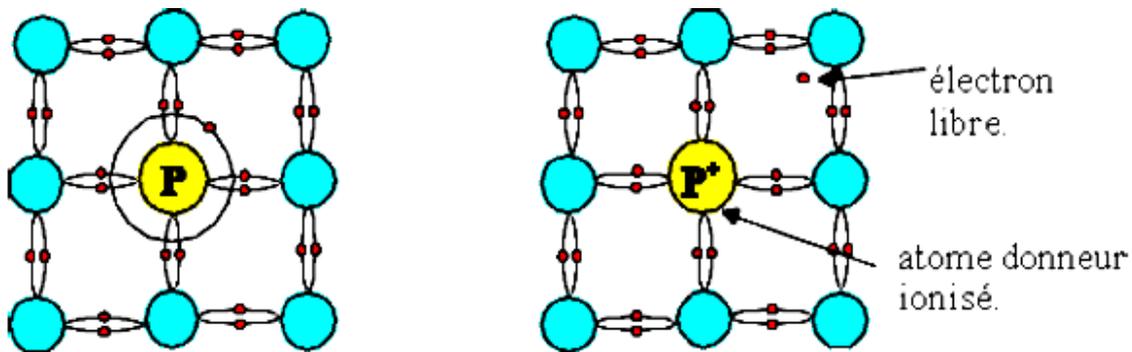


Figure (1-9) : Dopage de type N.

Dopage de type P :

De la même façon on introduit des atomes trivalents, ses trois électrons vont assurer les liaisons covalentes avec trois atomes voisins mais laisser un trou au quatrième. Ce trou se déplace de proche en proche dans le cristal pour créer un courant.

Ici le nombre de trous est très supérieur au nombre d'électrons libres du cristal intrinsèque, on obtient donc un cristal dopé P (positif), les impuretés utilisées sont souvent du Bore.[1]

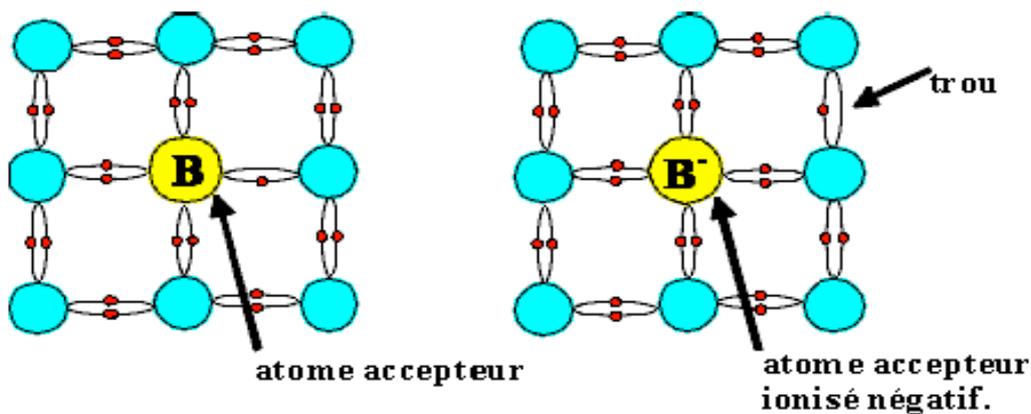


Figure (1-10) : Dopage de type P.

I.4.2.2/ La jonction PN :

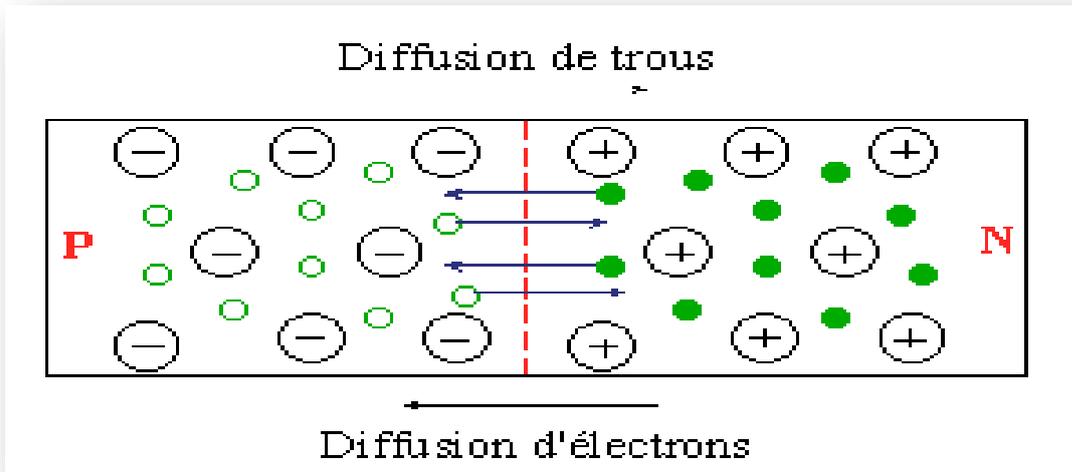


Figure (1-11) : La jonction PN.

Une jonction PN est l'accolement d'une région dopé P et d'une région dopée N. Lors de cet assemblage les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction où les porteurs libres disparaissent : c'est la zone de transition.

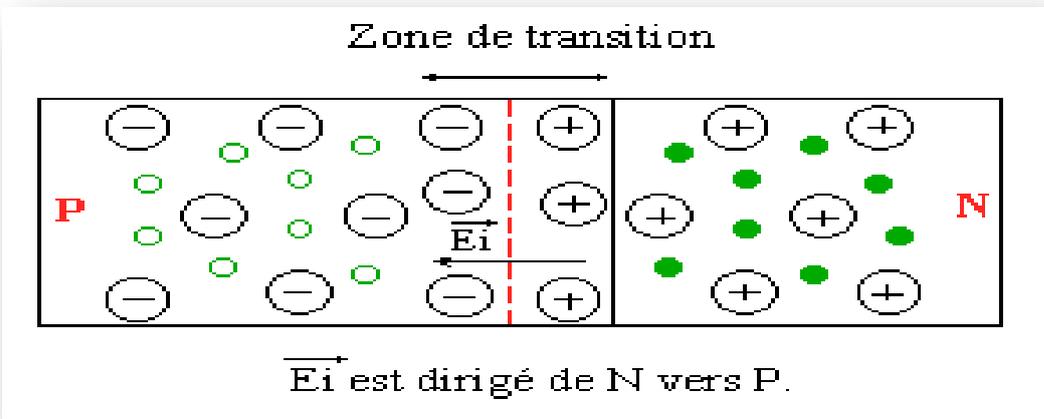


Figure (1-12) : La zone de transition.

Il ne reste donc plus que les ions dans cette zone qui vont créer un champ électrique interne au niveau de la jonction et qui empêche les charges libres restantes dans chaque zone de traverser la jonction pour se recombiner.

I.4.3/L'effet photovoltaïque :

I.4.3.1/Définition :

Le fonctionnement de la cellule PV est basé sur un phénomène physique appelé l'effet photovoltaïque.

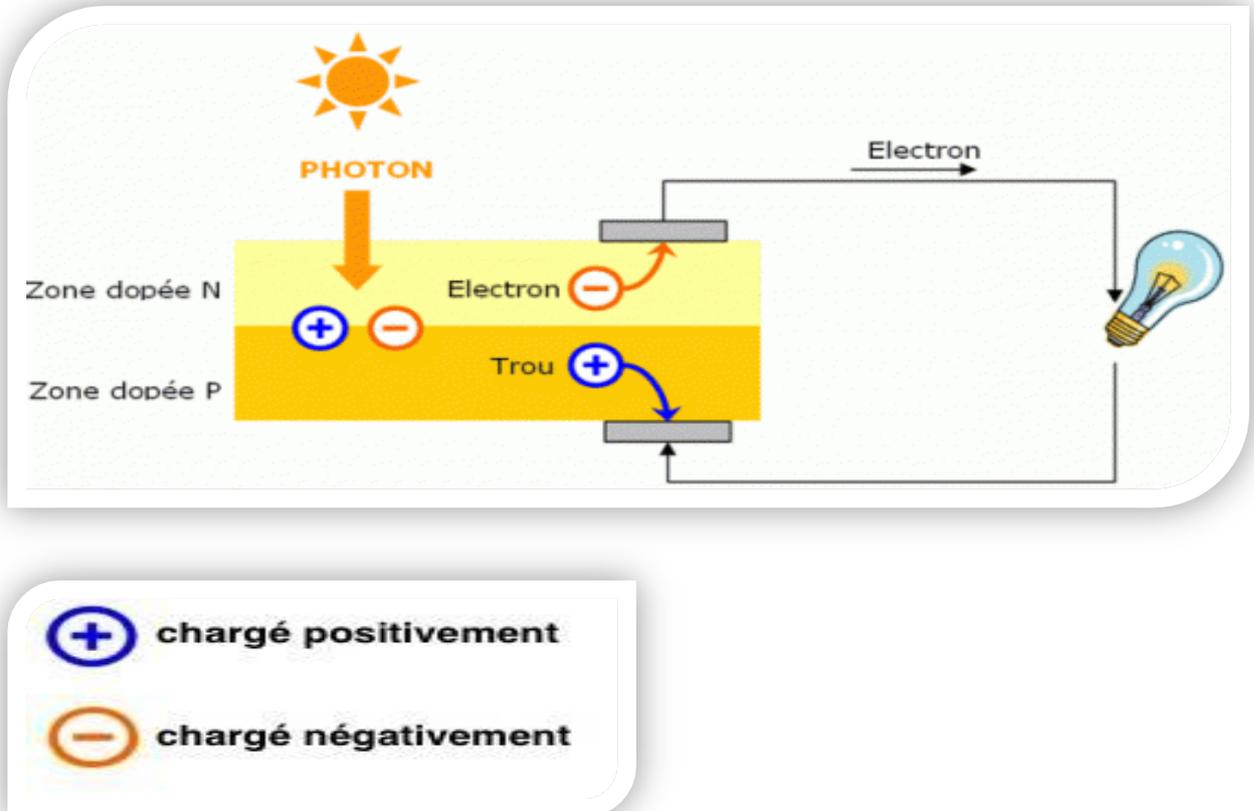


Figure (1-13) : Coupe transversale d'une cellule PV.

I.4.3.2/Principe de la conversion photoélectrique :

Un semi-conducteur est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique, quoique faible, est suffisamment importante. En d'autres termes, la conductivité électrique d'un semi-conducteur est intermédiaire entre celle des métaux et celle des isolants.

Le comportement des semi-conducteurs, comme celui des métaux et des isolants est décrit via la théorie des bandes. Ce modèle stipule qu'un électron dans un solide ne peut prendre des valeurs d'énergie comprises dans certains intervalles que l'on nomme « bandes », plus spécifiquement bandes permises, lesquelles sont séparées par d'autres « bandes » appelées bandes d'énergie interdites ou bandes interdites. [1]

Lorsque la température du solide tend vers le zéro absolu, deux bandes d'énergie permises jouent un rôle particulier:

- la dernière bande complètement remplie, appelée « bande de valence ».
- la bande d'énergie permise suivante appelée « bande de conduction ».

La bande de valence est riche en électrons mais ne participe pas aux phénomènes de conduction (pour les électrons). La bande de conduction, quant à elle, est soit vide (comme aux températures proches du zéro absolu dans un semi-conducteur) soit semi-remplie (comme dans le cas des métaux) d'électrons. Cependant c'est elle qui permet aux électrons de circuler dans le solide.

Dans un semi-conducteur, comme dans un isolant, ces deux bandes sont séparées par une bande interdite, appelée couramment par son équivalent anglais plus court « gap ». L'unique différence entre un semi-conducteur et un isolant est la largeur de cette bande interdite, largeur qui donne à chacun ses propriétés respectives. [10]

Dans un semi-conducteur exposé à la lumière, un photon d'énergie suffisante arrache un électron, créant au passage un « trou ». Normalement, l'électron trouve rapidement un trou pour se replacer, et l'énergie apportée par le photon est ainsi dissipée. Le principe d'une cellule photovoltaïque est de forcer les électrons et les trous à se diriger chacun vers une face opposée du matériau au lieu de se recombiner simplement en son sein : ainsi, il apparaîtra une différence de potentiel et donc une tension entre les deux faces, comme dans une pile.

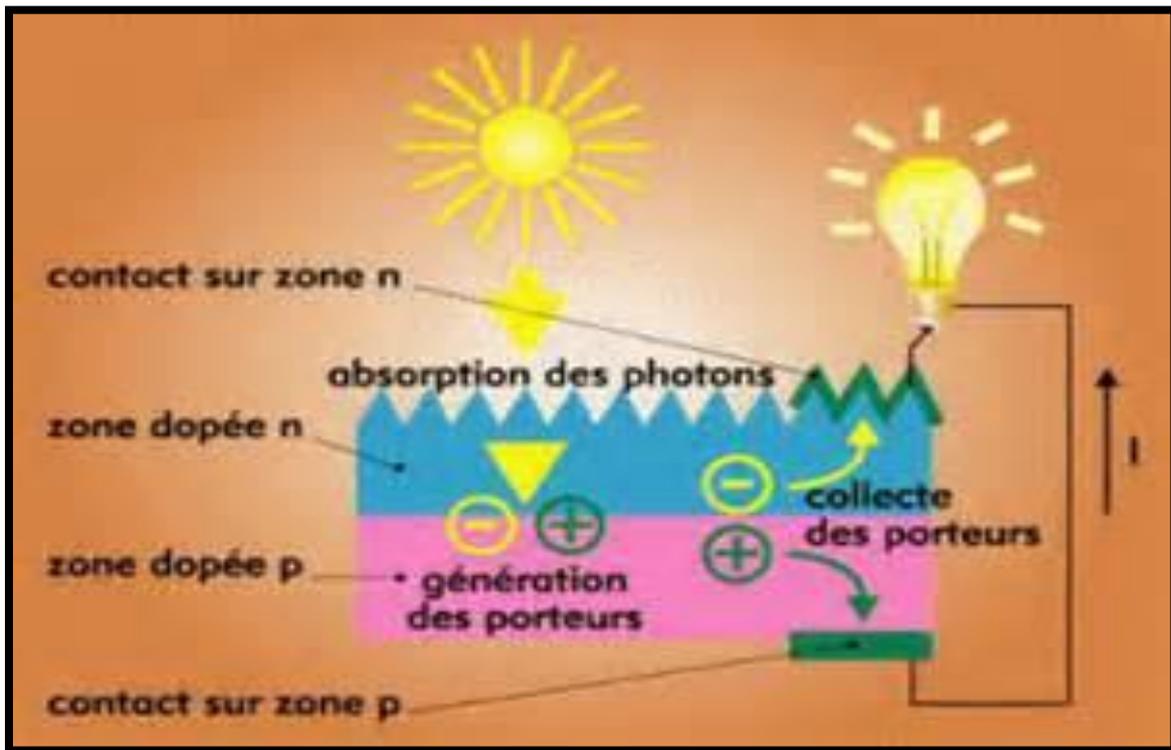


Figure (1-14) : Principe de la conversion photoélectrique.

Pour cela, on s'arrange pour créer un champ électrique permanent au moyen d'une jonction PN, entre deux couches dopées respectivement P et N :

- La couche supérieure de la cellule est composée de silicium dopé N. Dans cette couche, il existe une quantité d'électrons libres supérieure à une couche de silicium pur, d'où l'appellation de dopage N, comme négatif (charge de l'électron). Le matériau reste électriquement neutre : c'est le réseau cristallin qui supporte globalement une charge positive.

- La couche inférieure de la cellule est composée de silicium dopé P. Cette couche possédera donc en moyenne une quantité d'électrons libres inférieure à une couche de silicium pur, les électrons sont liés au réseau cristallin qui, en conséquence, est chargé positivement. La conduction électrique est assurée par des trous, positifs (P).

Au moment de la création de la jonction P-N, les électrons libres de la région N rentrent dans la couche P et vont se recombinier avec les trous de la région P.

Il existera ainsi, pendant toute la vie de la jonction, une charge positive de la région N au bord de la jonction (parce que les électrons en sont partis) et une charge négative dans la région P au bord de la jonction (parce que les trous en ont disparu) ; l'ensemble forme la Zone de Charge d'Espace (ZCE) et il existe un champ électrique entre les deux, de N vers P. Ce champ électrique fait de la ZCE une diode, qui ne permet le passage du courant que dans un sens : les électrons peuvent passer de la région P vers la région N, mais pas en sens inverse ; inversement les trous ne passent que de N vers P.

En fonctionnement, quand un photon arrache un électron à la matrice, créant un électron libre et un trou, sous l'effet de ce champ électrique ils partent chacun à l'opposé : les électrons s'accroissent dans la région N (qui devient le pôle négatif), tandis que les trous s'accroissent dans la couche dopée P (qui devient le pôle positif).

Ce phénomène est plus efficace dans la ZCE, où il n'y a pratiquement plus de porteurs de charges (électrons ou trous) puisqu'ils se sont annihilés, ou à proximité immédiate de la ZCE : lorsqu'un photon y crée une paire électron-trou, ils se séparent et ont peu de chance de rencontrer leur opposé, alors que si la création a lieu plus loin de la jonction, l'électron (resp. le trou) nouveau conserve une grande chance de se recombiner avant d'atteindre la zone N (resp. la zone P). Mais la ZCE est forcément très mince, aussi n'est-il pas utile de donner une grande épaisseur à la cellule.

En somme, une cellule photovoltaïque est l'équivalent d'un générateur de courant auquel on a adjoint une diode.

Pour que la cellule fonctionne, et produise le maximum de courant, on ajuste le gap du semi-conducteur au niveau d'énergie des photons.

On peut éventuellement empiler les jonctions, de façon à exploiter au mieux le spectre d'énergie des photons, ce qui donne les cellules multi jonctions.[11]

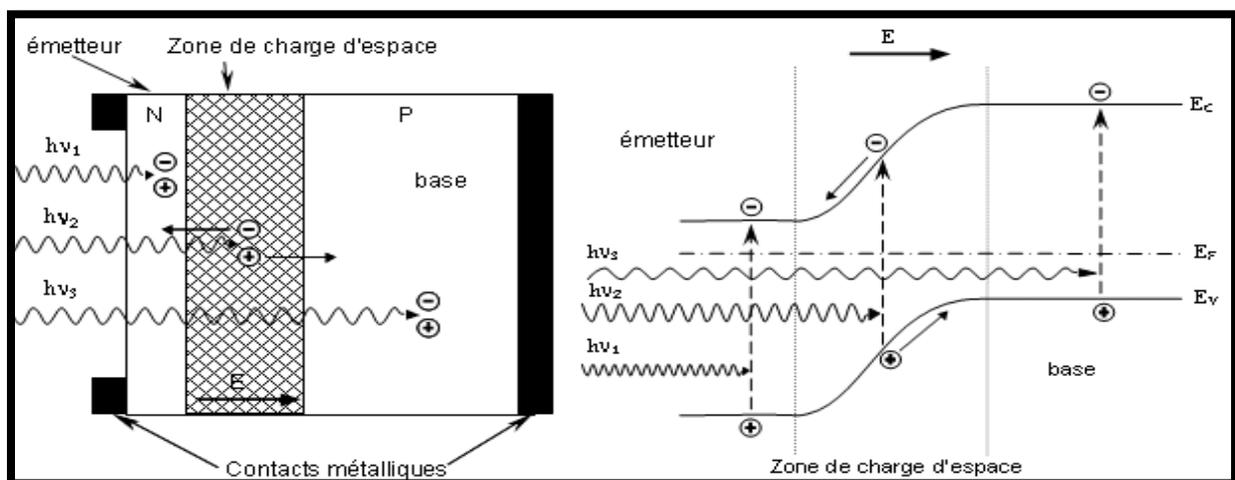


Figure (1-15) : Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque.

I.4.4/Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :

I.4.4.1/ Circuit électrique idéal :

La cellule photovoltaïque peut être représentée par le circuit électrique équivalent donnée par la figure (1-16) composé d'un générateur de courant et d'une diode parallèle. Le courant I généré par la cellule s'écrit alors.

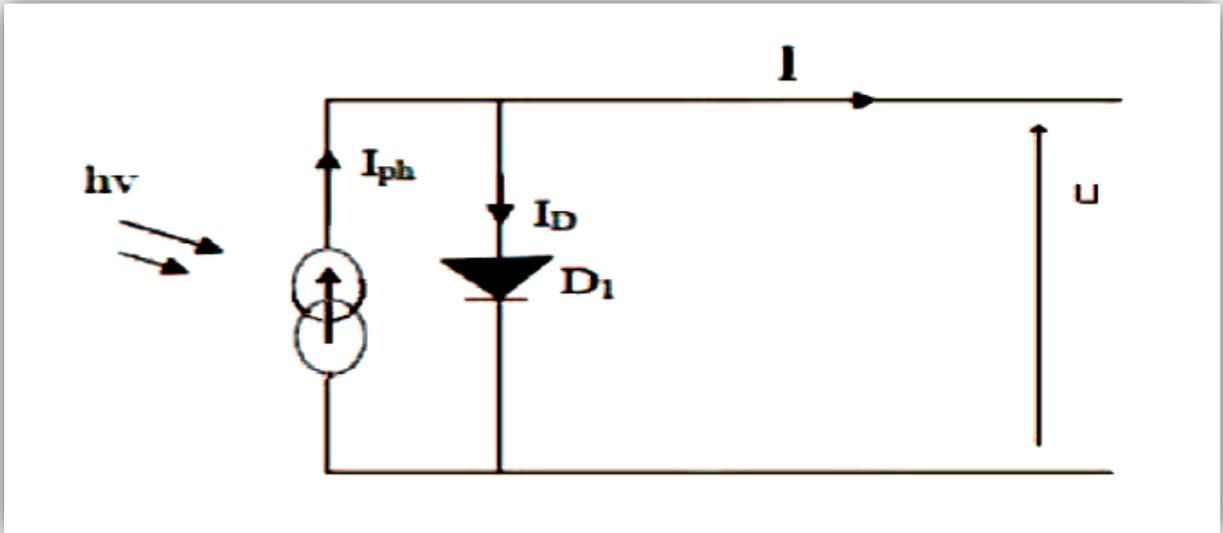


Figure (1-16) : Schéma électrique idéal de cellule photovoltaïque.

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

$$I_D = I_s \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (1-2)$$

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (1-3)$$

V : tension.

$K = 1.38 \times 10^{-23}$: constant de Boltzmann.

$q = 1.602 \times 10^{-19}$: charge de l'électron.

T : température absolue en °K.

I_s : Courant de saturation de la diode.

I_{ph} : Photo courant.

I_D : Courant de la diode.

I.4.4.2/ Schéma équivalent d'une cellule :

Si l'on considère le cas simple d'une cellule idéale à jonction donneur-accepteur soumise à un flux lumineux, celle-ci fonctionne comme un générateur de courant. Son schéma équivalent (Figure 1-17) est représenté par une diode idéale montée en parallèle avec une source de courant.

R_s est une résistance série liée à la résistivité volumique et à l'impédance des électrodes et des matériaux.

R_{sh} est une résistance parallèle liée aux effets de bord et aux recombinaisons volumiques.

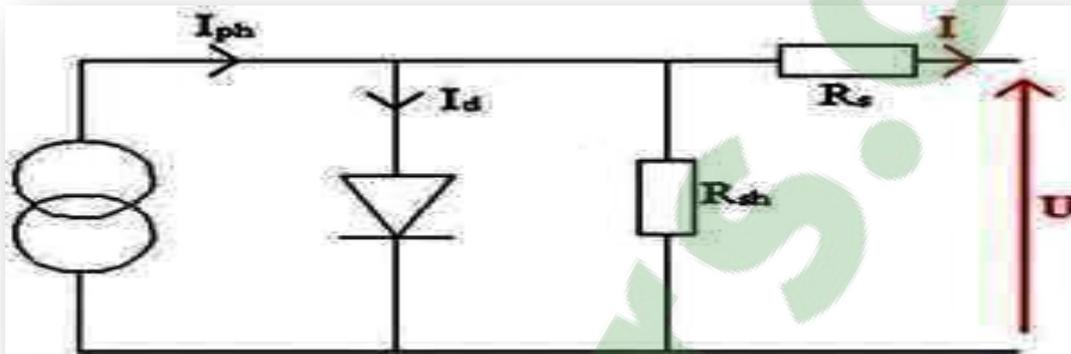


Figure (1-17) : Schéma électrique équivalent de cellule photovoltaïque.

Le modèle mathématique associé à une cellule se trouve à partir de celui d'une jonction PN. On y ajoute le courant I_{ph} , proportionnel à l'éclairement, ainsi qu'un terme modélisant les phénomènes internes. Le courant I issu de la cellule s'écrit alors :

$$I = I_{ph} - I_{sc} \left(e^{\frac{q(U+R_s.I)}{KT}} - 1 \right) - \frac{U+R_s.I}{R_{sh}} \quad (1-4)$$

$$I_d = I_{sc} \left(e^{\frac{q(U+R_s.I)}{KT}} - 1 \right) \quad (1-5)$$

Avec:

U : tension aux bornes de la cellule.

I_{ph} : photo courant, ou courant généré par l'éclairement.

I_{sc} : courant de saturation de la diode.

R_s : résistance série.

R_{sh} : résistance shunt.

K : constante de Boltzmann.

q : charge de l'électron.

T : température absolue de la cellule.

I_d : Courant de la diode.

I.4.4.3/Schéma bloc d'une cellule PV :

D'une façon générale on peut mettre le circuit électrique équivalent d'une cellule solaire en schéma bloc comportant quatre paramètres (Figure (1-18)).

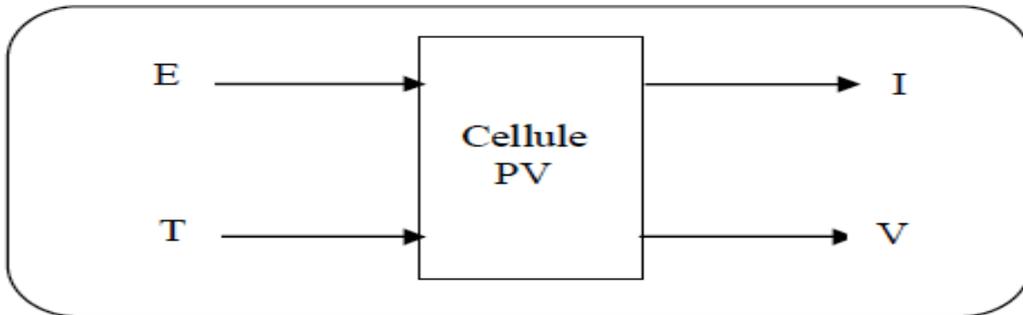


Figure (1-18) : Schéma bloc d'une cellule PV.

Avec deux variables d'entrée :

E : ensoleillement dans le plan de la cellule (W/m^2).

T : température de la cellule ($^{\circ}\text{C}$).

Et deux variables de sortie :

I : intensité de courant fournie par la cellule (A).

V : tension aux bornes de la cellule.

I.4.4.4/Paramètres essentiels caractérisant une cellule PV :

I.4.4.4.1/La courbe courant-tension d'une cellule PV :

La courbe caractéristique $I(V)$ d'une cellule PV représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule PV depuis le courant de court-circuit I_{cc} jusqu'au courant de la tension du circuit ouvert V_{co} (Figure (1-19)).

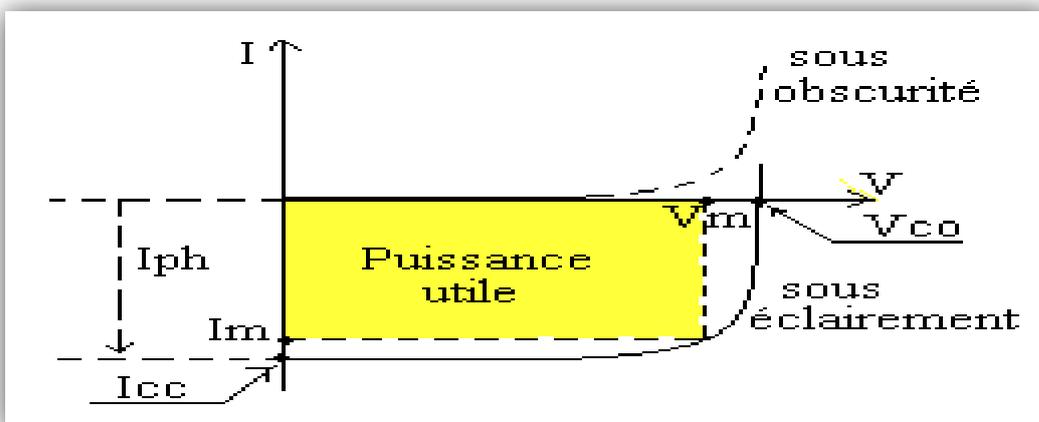


Figure (1-19) : Caractéristiques $I=f(V)$ sous obscurité et sous éclaircement d'une cellule PV.

I.4.4.2/Courant de court-circuit (I_{cc}) :

Si les deux électrodes sont en court-circuit à travers un ampèremètre, les électrons drainés par un champ interne de la jonction vont donner naissance à un courant de court-circuit (I_{cc}) qui correspond au photocourant (I_{ph}) généré par le rayonnement.

Le courant de court-circuit (obtenu pour $V = 0$).

Pour une distribution spectrale donnée, ce photocourant est proportionnel à l'irradiation du rayonnement incident et à la surface active de captation. Il définit la quantité de paire électron trou générée G qui traverse la jonction sans recombinaison entre les longueurs de diffusion L_n et L_p , donné par la relation:

$$I_{cc}=I_{ph}=q.G (L_n + L_p) \quad (1-6)$$

I.4.4.3/Tension de circuit ouvert(V_{co}) :

Si la cellule est laissée en circuit ouvert, les porteurs générés par le rayonnement et séparés par le champ interne vont s'accumuler de part et d'autre de la jonction, induisant une autopolarisation de la jonction dans le sens passant. Cette autopolarisation induit un courant de diode dans le sens direct égal et opposé au photocourant.

La tension alors mesurée aux bornes des électrodes est appelée tension de circuit ouvert V_{co} . C'est la tension qu'il faudrait appliquer à la diode dans le sens passant pour générer un courant égal au photocourant, elle est donnée par la relation :

$$V_{co} = \left(\frac{KT}{q}\right) \ln [(I_{cc}/I_0) + 1] \quad (1-7)$$

I.4.4.4/La puissance caractéristique d'une cellule PV :

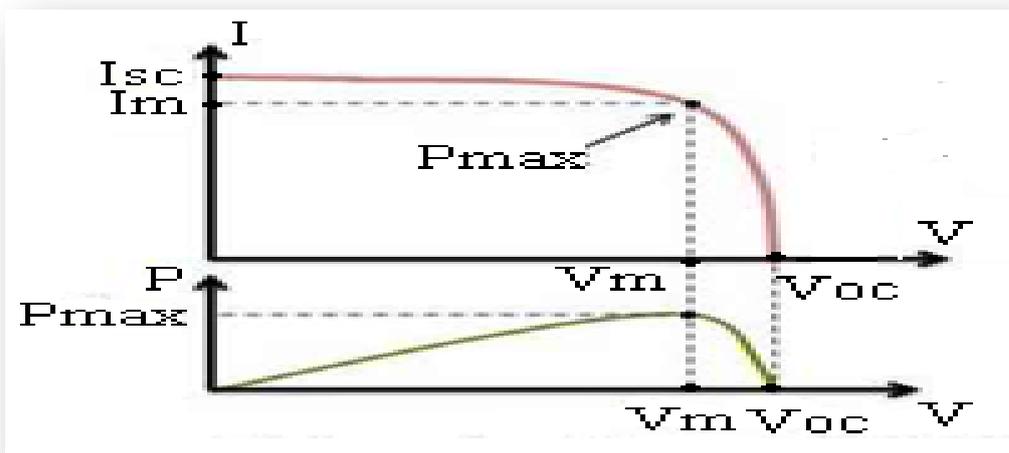


Figure (1-20) : Puissance d'une cellule PV.

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant,...etc.), la puissance électrique P disponible aux bornes d'une cellule photovoltaïque (Figure (1-20)) est égale au produit du courant continu fourni I par une tension continue donnée V :

$$P = V \cdot I \quad (1-8)$$

P : Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV.

V : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV.

I : Intensité mesurée aux bornes de la cellule PV.

I.4.4.5/La puissance max :

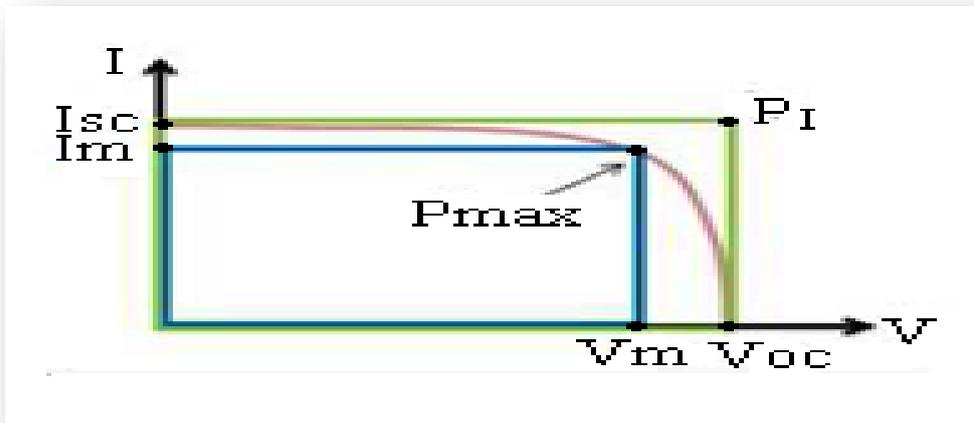


Figure (1-21) : Puissance max d'une cellule PV.

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximum idéale P_I correspondrait donc à la tension de circuit ouvert V_{CO} multipliée par le courant de court-circuit I_{CC} (Figure (1-21)):

$$P_I = P_{\max} \text{ idéale} = V_{CO} \cdot I_{CC} \quad (1-9)$$

En pratique, la courbe caractéristique d'une cellule PV est plus "arrondie", et la tension au point de puissance maximum $V(P_{\max})$ est inférieure à la tension de circuit ouvert V_{CO} , de même que le courant fourni $I(P_{\max})$ est inférieur, pour cette même tension, au courant de court-circuit I_{CC} .

$$P_{\max} = V_m \cdot I_m \quad (1-10)$$

I.4.4.4.6/Facteur de forme :

Le facteur de forme représente l'efficacité de la cellule ou encore, il peut nous renseigner sur le vieillissement de la cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale débitée P_{max} et la puissance idéale PI, on le note :

$$FF = \frac{P_{max}}{PI} = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (1-11)$$

I.4.4.4.7/Rendement de conversion d'énergie :

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident P_0 . On appelle rendement maximal, le rapport entre la puissance maximale et la puissance P_0 :

$$\eta_m = \frac{V_m \cdot I_m}{P_0} = FF \frac{V_{co} \cdot I_{cc}}{P_0} \quad (1-12)$$

I.4.4.4.8/Réponse spectrale :

La sensibilité des cellules solaires à la lumière traduite par la réponse spectrale, chaque longueur d'onde génère un photocourant correspond au nombre de photons incidents ayant la même énergie sur la surface.

La réponse spectrale est le rapport entre la densité de courant collecte et la densité de photons incidente, pour chaque longueur d'onde du rayonnement lumineux. La réponse spectrale dépend beaucoup plus des propriétés optiques des matériaux solaires que de la distribution spectrale de la lumière reçue, son optimisation exige une amélioration au niveau de la surface avant et même arrière (Light Trapping).[12]

Les deux formes de la réponse spectrale (IQE, EQE) sont fortement liées à la recombinaison en surface et en volume, à la longueur de diffusion des porteurs et à l'épaisseur de la région concernée.

Supposons que le flux de photons incidents est $F(\lambda)$, une portion de ce flux se réfléchit, si $R(\lambda)$ est le coefficient de réflexion pour la longueur d'onde λ et la partie $F(\lambda)[1-R(\lambda)]$ pénètre dans le matériau, (Figure (1-22)).

La réponse spectrale interne est définie comme le nombre de paires électron-trou collectés sous les conditions de court-circuit relatif au nombre de photons pénétrant dans le matériau :

$$SR(\lambda) = \frac{J(\lambda)}{qF(\lambda)[1-R(\lambda)]} = \frac{J_p(\lambda)}{qF(\lambda)[1-R(\lambda)]} + \frac{J_n(\lambda)}{qF(\lambda)[1-R(\lambda)]} + \frac{J_{dr}(\lambda)}{qF(\lambda)[1-R(\lambda)]} \quad (1-13)$$

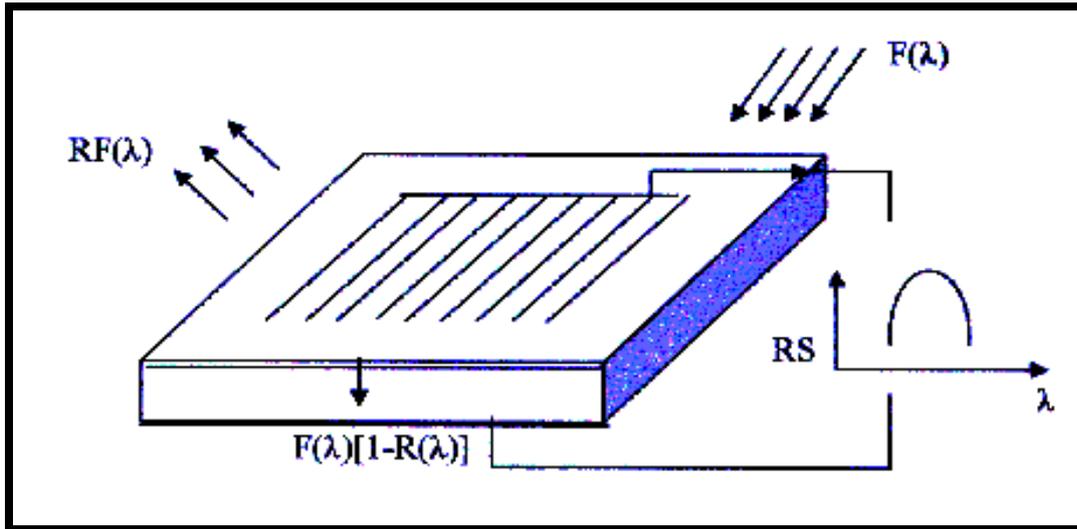


Figure (1-22) : Réponse spectrale.

Cependant, la réponse spectrale externe n'est autre que la réponse interne, mais prend en compte la réflexion de la lumière au niveau de la surface avant, c'est-à-dire, le rapport entre le nombre de paires électron-trou collectées par la jonction par unité de temps et de surface et le nombre de photons incidents par unité de temps et de surface .[13]

$$SR(\lambda)_{\text{ext}} = SR(\lambda) [1 - R(\lambda)] = \frac{J(\lambda)}{qF(\lambda)} \quad (1-14)$$

$$SR(\lambda)_{\text{ext}} = (1-R-T) SR(\lambda)_{\text{int}} \quad (1-15)$$

Où :

T : représente la transmission des photons à travers le matériau solaire.

On introduit aussi la notion de sensibilité spectrale SS (A /W), définie comme suit:

$$SS_{\text{int}}(\lambda) = \frac{J(\lambda)}{F(\lambda)[1-R(\lambda)]h\nu} \quad (1-16)$$

$$SS_{\text{ext}}(\lambda) = \frac{J(\lambda)}{F(\lambda)h\nu} \quad (1-17)$$

La plupart des porteurs génèrent dans la base issue de longueurs d'onde longues à cause des mauvaises propriétés optiques du silicium. La contribution de la région de déplétion est considérable dans l'intervalle [2.0 - 2.9] eV pour une cellule de 1 Ohm-cm, mais n'atteint jamais la contribution de l'émetteur même si la résistivité de la base est plus élevée et la jonction plus étroite. Cette contribution diminue pour des résistivités plus faibles et des jonctions plus larges. Dans un matériau solaire à gap indirect, par exemple, le silicium, la contribution majeure au courant total provient de la base. [14]

Les trois régions d'une cellule à base de silicium (gap indirect) contribuent au photocourant comme suit :

- La base contribue par 85% photocourant total ($500\text{nm} < \lambda$).
- L'émetteur génère plus de 15% du courant total ($\lambda < 400\text{nm}$).
- La contribution de ZCE est négligeable ($400 < \lambda < 500\text{nm}$).

I.5/Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension du fonctionnement physique d'une cellule photovoltaïque. Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales.

Chapitre II :
Etude de nouvelle structure
de cellule photovoltaïque

II.1/Introduction :

Plusieurs technologies sont actuellement développées pour la réalisation de cellules photovoltaïques. Les degrés de maturité, de performance et de durée de vie sont très différents d'une technologie à l'autre. Les efforts de recherche et développement actuels entraînent des progrès rapides, faisant de la filière photovoltaïque une filière en constante évolution. [1]

II.2/Etat de l'art des cellules photovoltaïques :

Le secteur des composants optoélectroniques qui se développe le plus rapidement est sans conteste, celui du photovoltaïque (PV) pour une production d'électricité basée sur la conversion de la lumière du soleil.

Pour le moment, plus de 90% des cellules sont à base de silicium cristallin, qui est la voie la plus avancée sur le plan technologique et industriel. En effet, le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre, parfaitement stable et non toxique. A l'avenir d'autres matériaux, au stade préindustriel ou encore au niveau de la recherche et même au niveau de la validation des concepts viendront contribuer à la stimulation de ce marché très prometteur.

En vingt-cinq ans, le prix du watt photovoltaïque a considérablement baissé de plus de 100 Euros en 1975, il est aujourd'hui tombé aux environs de 2 Euros avec une production industrielle mondiale en plein essor (plus de 30% de croissance en moyenne du marché par an depuis 5 ans).

La production de module a été de l'ordre de 550MWc en 2002 (vingt fois plus qu'il y a 15ans) et en 2010 une multiplication par 20 de la production a été effectuée. [5]

II.3/Les différentes filières photovoltaïques :

La filière photovoltaïque en elle-même n'est pas unifiée : de nombreuses filières technologiques existent, se caractérisant soit par les matériaux employés, soit par leur principe même.

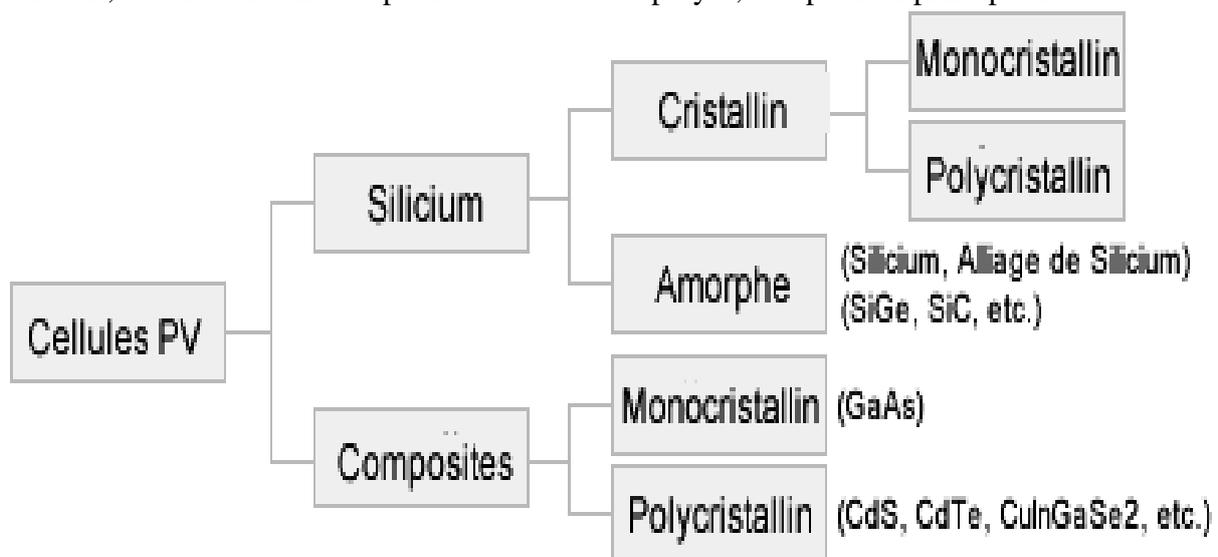


Figure (2-1): Les différentes technologies des cellules PV.

II.3.1/ Le silicium :

La filière silicium représente aujourd'hui l'essentiel de la production mondiale de panneaux photovoltaïques (Figure (2-2)). Il s'agit d'un matériau extrêmement abondant, stable et non toxique. Cette filière est elle-même subdivisée en plusieurs technologies distinctes de part la nature du silicium employé et/ou sa méthode de fabrication.

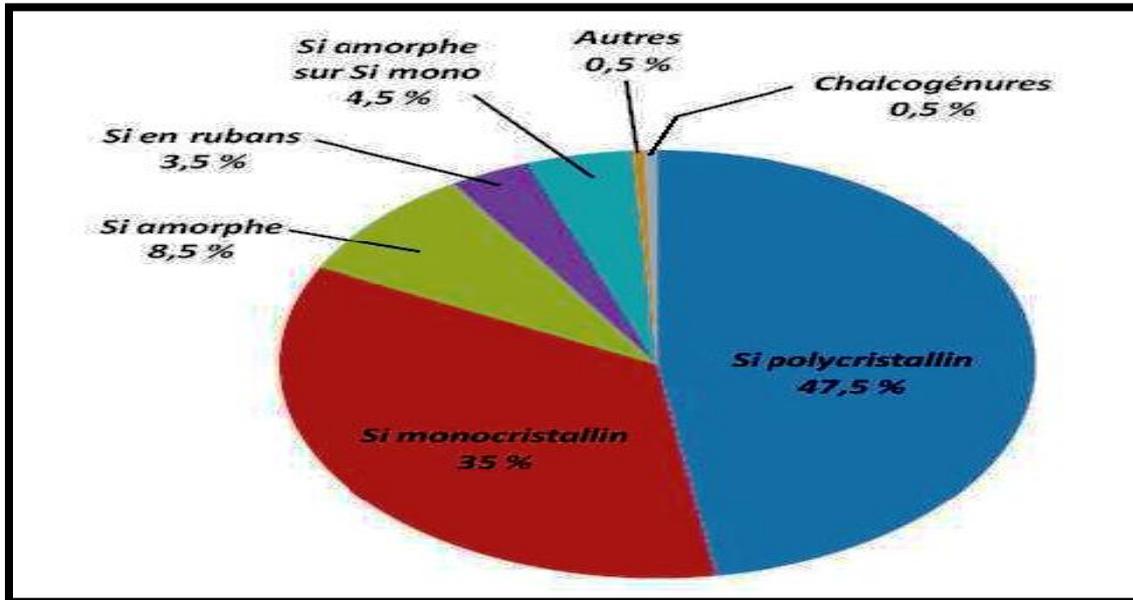


Figure (2-2) : Part de marché des différentes technologies photovoltaïques en 2010. [15]

II.3.1.1/Le silicium monocristallin :

Il s'agit de la technologie donnant des valeurs record en termes de rendement de conversion pour ce matériau: plus de 25% en laboratoire. Il existe deux méthodes de fabrication. La méthode dite de Czochralski est couramment employée dans l'industrie aujourd'hui encore et consiste en la croissance d'un monocristal de silicium sous forme de lingot à partir d'un creuset de silicium fondu. La méthode « Float zone » donne des puretés de matériau bien supérieures car elle est conduite sous vide (pas de pollution par l'oxygène) et que le procédé s'affranchit de la présence du creuset et donc des impuretés métalliques qu'il est susceptible d'introduire dans le monocristal.

Si les rendements commerciaux sont de l'ordre de 17%, ce qui constitue le meilleur rendement pour des panneaux photovoltaïques produits en masse de quelques technologies que ce soit, la technologie souffre de rendements médiocres en lumière faible et/ou diffuse, et de coûts de production extrêmement élevés.

II.3.1.2/Le silicium multicristallin :

Cette méthode est moins coûteuse d'un point de vue énergétique mais aussi financier : les cellules polycristallines supportent mieux la présence d'impuretés que les cellules monocristallines. On utilise donc généralement du silicium de moindre pureté, moins onéreux mais aussi nécessitant moins d'étapes de fonte/purification et donc moins d'énergie.

Le silicium multicristallin est souvent produit en jetant du silicium fondu dans un creuset. En contrôlant la vitesse de refroidissement on peut facilement contrôler la taille des cristaux formés lors de la solidification. Le contrôle de la taille de ces cristaux est primordial puisque les joints de grain ont un effet néfaste sur les performances photovoltaïques.

La société japonaise Mitsubishi a établi en février 2010 un nouveau record pour ce matériau (cellule 15*15cm) avec un rendement de 19,6% obtenu en laboratoire.

Ces cellules sont généralement utilisées pour les applications de type toiture car elles sont moins onéreuses que les cellules monocristallines et possèdent un meilleur retour sur investissement.

II.3.1.3/Le silicium en ruban auto-supporté :

Séduisant d'un point de vue technologique, ce mode de production consiste à faire croître un film de silicium entre deux lèvres de carbone par capillarité ou sur un film.

Largement pénalisée par une vitesse de croissance très lente (quelques cm/mn) imposée par des critères de solidification (permettant la ségrégation des impuretés et de maîtriser la taille des cristaux), elle est aujourd'hui de moins en moins utilisée.

II.3.1.4/Le silicium nanocristallin et amorphe :

C'est le seul type de silicium donnant accès aux applications flexibles. Le silicium amorphe est étudié depuis les années 70 et connaît pendant longtemps son application principale dans les cellules présentes dans les calculatrices, destinées à rallonger la durée de vie des piles. Il offre l'avantage d'être facilement déposable sur de grandes surfaces, d'avoir un fort coefficient d'absorption (et donc de nécessiter de faibles épaisseurs pour fonctionner, limitant l'utilisation des ressources en silicium), de pouvoir fonctionner sous faible éclaircissement (et donc en intérieur contrairement au silicium multi et mono cristallin) et enfin d'utiliser très peu d'énergie lors de sa fabrication, raccourcissant ainsi son retour sur investissement énergétique. Les rendements maxima atteints sont de l'ordre de 10% au niveau industriel. Son principal inconvénient provient de la dégradation de ses performances avec le temps passé sous éclaircissement. Des solutions technologiques permettent cependant de s'affranchir de cette dégradation et de marier les avantages de cette technologie avec d'autres (exemple de la structure HIT de Sanyo). [16]

II.3.2/Cellules couche mince : les chalcogénures :

II.3.2.1/ Matériaux à base de Tellure de Cadmium (CdTe) :

Il s'agit d'une technologie extrêmement prometteuse, permettant d'obtenir des rendements tout à fait convenables (16,5% en laboratoire). De part une bande interdite de 1,45eV parfaitement adaptée au spectre solaire¹¹ et un très fort coefficient d'absorption, seule une couche de 2 μm est nécessaire pour obtenir un matériau très opaque et absorbant une grande partie du spectre solaire.

Le développement des panneaux CdTe est néanmoins largement freiné par l'utilisation du cadmium, qui pose problème au niveau environnemental (cf. l'interdiction des piles utilisant ce métal).

II.3.2.2/Matériaux CIS, CIGS et voie « bon marché » :

Le Diséléniure de Cuivre et d'Indium (CIS) est un matériau I-III-VI possédant une structure chalcopyrite. Il possède un coefficient d'absorption entre 100 et 1000 fois supérieur à celui du silicium amorphe.

Les cellules à base de matériau chalcopyrite quaternaire comme les CIGS (pour Cu (Ga, In) (Se, S)₂) possèdent également des performances extrêmement intéressantes : le Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung (ZSW) a annoncé à la presse en mai 2009 une efficacité record certifiée par le Fraunhofer Institut de 19,6%. Il s'agit d'un record pour des cellules de cette taille et produites sur un pilote de semi-industrialisation.

Ces deux voies en ont ouvert une troisième.

L'impact environnemental d'une cellule doit être pris en compte lors de sa fabrication.

Tenter de régler le problème de l'approvisionnement en électricité propre (du point de vue émission de gaz à effet de serre) en utilisant des matériaux toxiques ou non recyclables n'est pas une option : c'est ce qui limite les cellules CdTe dans leur développement, par exemple.

Un autre facteur limitant peut être la disponibilité des matériaux. Ainsi un des inconvénients majeurs des cellules CIGS provient du fait que le sélénium, l'indium et le gallium sont des matériaux dont les ressources sont limitées. Cela entraîne évidemment des coûts de fabrication plus importants car ces matériaux étant rares, ils sont chers.

C'est pour répondre à ces deux problématiques qu'une équipe de recherche de l'université de Chicago en collaboration avec IBM travaille sur des cellules à la fois dépourvues d'éléments dangereux pour la santé ou l'environnement et dont les ressources sont relativement importantes. Ces cellules dites CZTS (pour cuivre, zinc, étain et soufre) permettent d'atteindre des rendements de près de 10% en laboratoire. [17]

II.3.3/Les cellules III-V multijonction :

Il est parfois difficile de trouver un matériau absorbant l'ensemble du spectre solaire avec un fort coefficient d'absorption. Les cellules multijonction III-V dites « de troisième génération » répondent à cette problématique. En effet il s'agit de l'empilement de divers composés III-V, chacun optimisés pour absorber une partie du spectre solaire avec efficacité. L'empilement, obtenu par croissance épitaxiale, permet donc de capter une grande partie du spectre solaire, et mène à une cellule unique composée en réalité de plusieurs cellules en série.

De part le domaine de spectre solaire dont les photons sont récoltés et la minimisation des pertes dues à la thermalisation, ces cellules permettent d'atteindre les records connus à ce jour en matière de conversion photovoltaïque.

Des rendements de plus de 40% ont ainsi été obtenus sous lumière concentrée.

Le procédé de fabrication et les matériaux utilisés pour la fabrication de ces cellules entraînent un coût extrêmement élevé qui cantonne ces matériaux à des applications spatiales.

II.3.4/Les cellules nanocristallines à colorant ou cellules « de Graätzel » :

Reproduisant le phénomène de la photosynthèse, ces cellules développées dans le début des années 90 par le Pr Graätzel et son équipe à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne ont depuis connues de nombreux succès. Des rendements de plus de 10% certifiés ont été obtenus

par Sharp grâce à ces cellules utilisant un oxyde semi-conducteur inorganique, un électrolyte et un colorant.

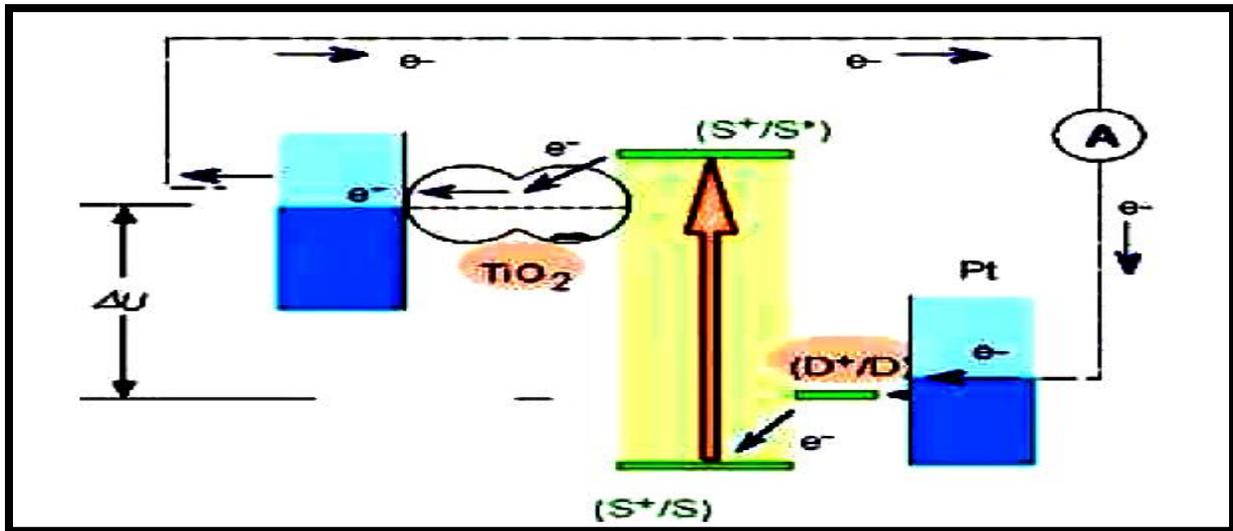


Figure (2-3): Schéma de principe d'une cellule à colorant.

Le principe de fonctionnement de ces cellules est le suivant : un colorant (ou sensibilisateur, noté S dans la Figure (2-3)) est greffé sur une couche de fines particules de TiO_2 . Le rayonnement solaire excite ce sensibilisateur et le promeut à un état excité S^* , état qui lui permet de délivrer un électron directement au TiO_2 , qui joue donc le rôle de cathode. Le sensibilisateur est régénéré grâce à un médiateur D, lui même régénéré à l'anode. [18]

II.3.5/Les cellules photovoltaïques organiques :

Observé depuis 30 ans dans les matériaux semi-conducteurs organiques, l'effet photovoltaïque a connu cette dernière décennie un grand essor. Initialement donnant des valeurs très faibles de rendement de conversion ($<10^{-5}\%$), cette application particulière des semi-conducteurs organiques commence à attirer l'attention en 1986 lorsque l'équipe de Tang montre que les rendements proches du pourcent sont atteignables, conformément aux prédictions de Merritt en 1978. La cellule, composée alors d'une bicouche de molécules évaporées sous vide, atteint 0,95% de rendement de conversion.

D'autres matériaux et structures ont depuis été développés spécifiquement pour cette application et testés, pour mener à une valeur record de 7,9%, détenu par la firme SOLARMER. Les matériaux utilisés sont un dérivé du fullerène nommé PCBM et un copolymère alterné.

L'intérêt de ces cellules vient aussi du fait que, contrairement aux cellules à base de matériaux inorganiques, elles offrent l'avantage de pouvoir être déposées en grande surface, à grande vitesse, par des techniques d'impression classiques. Elles ouvrent également la voie aux applications légères, nomades et souples. Enfin, grâce à des coûts de fabrication et de matériaux plus faibles, ces cellules devraient dans l'ensemble revenir beaucoup moins chères que leurs concurrentes. [16]

Elles possèdent en revanche à l'heure actuelle des durées de vie jugées inférieures à celles des cellules inorganiques, et des rendements de conversion plus faibles.

II.4/Comparaison des différentes technologies des cellules PV :

Matériau	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principales utilisations
Silicium mono cristallin	12 à 18% (24,7% en laboratoire)	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% (19,8% en laboratoire)	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% (13% en laboratoire)		* 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% (27.5% en laboratoire)		* Lourd, fissure facilement Systèmes de concentrateurs.	Aérospatiale (satellites)
Composite poly cristallin (CdS, CdTe, CuiGaSe2, etc.)	8% (16% en laboratoire)		*Nécessite peu de matériaux mais Certains contiennent des substances polluantes.	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment.

Tableau (2-1) : Comparaison des différentes technologies des cellules PV. [1]

II.5/Structure d'une cellule photovoltaïque :

Comme nous l'avons vu précédemment le fonctionnement des cellules photovoltaïques est basé sur trois mécanismes : l'absorption des photons, la conversion de l'énergie optique en énergie électrique et la collecte de cette énergie sur un circuit extérieur. Chacun de ces mécanismes engendrent des pertes et la partie suivante présente les principaux composants utilisés à ce jour pour améliorer le rendement de conversion.

Ces composants sont utilisés dans de nombreuses structures de cellules et nous les présenterons sur la structure la plus commune, la cellule photovoltaïque avec contacts sur les deux faces (Figure (2-4)). [19]

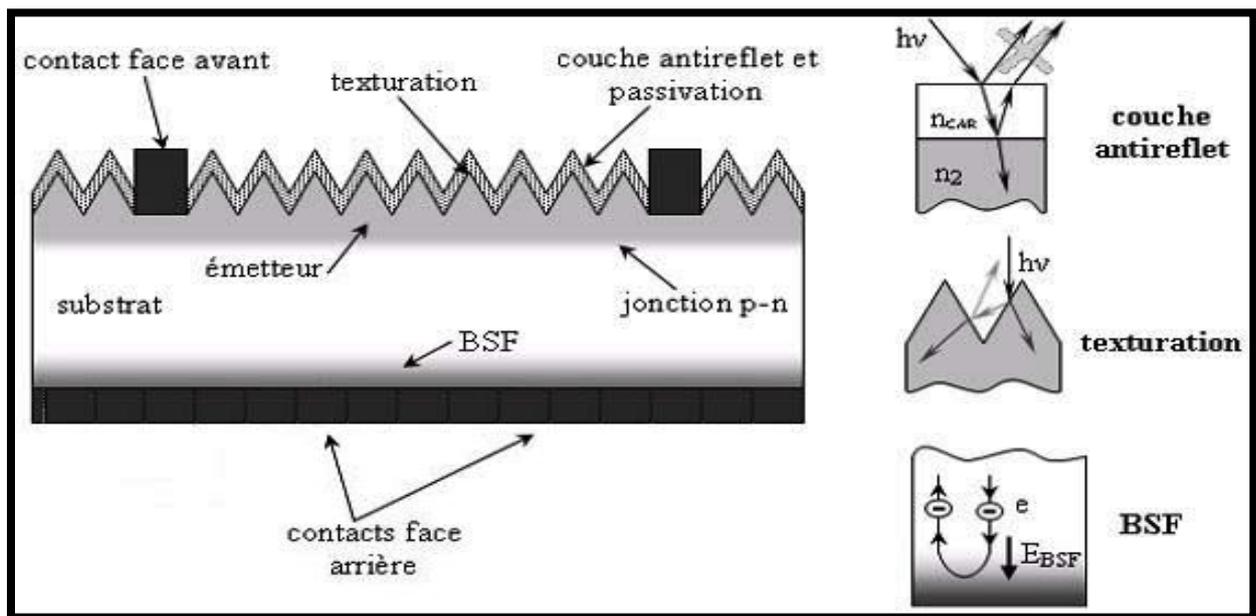


Figure (2-4): Structure d'une cellule photovoltaïque.

II.5.1/ L'émetteur et la base :

L'émetteur (dopage type N) est réalisé par dopage en surface d'un substrat de type P. La partie dopée P du substrat (c'est-à-dire la majeure partie de celui-ci sauf la surface) constitue la base. L'interface de ces deux zones est celle d'une jonction PN qui permet de dissocier les paires électron-trou créées. L'épaisseur totale de la cellule est actuellement proche de 200 μm . Les trous photo générés ayant une longueur de diffusion (L_p) plus faible que celle des électrons (L_n).

Le fort dopage de l'émetteur permet de limiter la résistance du contact métal-semi-conducteur (créé par la connexion entre les contacts métalliques et l'émetteur) et de créer un champ électrique suffisant au niveau de la ZCE.

II.5.2/ La texturisation de la surface:

La réflexion est à l'origine de pertes importantes pour la cellule. La texturisation est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramidale. Le relief créé permet d'augmenter la surface et induit des réflexions multiples sur les facettes des pyramides. La

texturisation assure ainsi le piégeage d'un maximum de lumière réduisant les pertes liées à la réflectivité.

Différents procédés sont utilisés pour réaliser la texturisation : attaques chimiques de la surface (KOH, NaOH, acides), texturisation mécanique, plasma ou laser. Ces méthodes peuvent faire passer la réflectivité effective de 40 % à moins de 10 %.

II.5.3/ Les contacts face avant et face arrière:

Les contacts constituent la structure de collecte qui récupère et envoie les porteurs photo générés vers le circuit externe. Pour assurer efficacement ce rôle, les contacts doivent être ohmiques.

De mauvais contacts, c'est-à-dire entraînant une forte résistance série, auront essentiellement une répercussion sur le facteur de forme de la cellule et sur le courant récupéré.

II.5.4/ La couche antireflet:

La texturisation de la surface de la cellule permet de limiter les réflexions face avant. Pour réduire encore la réflexion, une couche antireflet (CAR) est ajoutée.

L'indice et l'épaisseur de cette couche sont ajustés pour obtenir une lame quarte d'onde, l'objectif étant de minimiser le coefficient de réflexion de la cellule en créant des interférences destructives.

II.5.5/BSF :

Le champ électrique arrière (BSF : Back Surface Field) consiste à créer une barrière de potentiel (par exemple, jonction p+-p) sur la face arrière de la cellule pour assurer une passivation.

La barrière de potentiel induite par la différence de niveau de dopage entre la base et le BSF tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base. Ceux-ci sont donc tenus à l'écart de la face arrière qui est caractérisée par une vitesse de recombinaison très élevée.

II.5.6/ La passivation :

Sur les surfaces de la cellule, le réseau cristallin s'interrompt brutalement. Certaines liaisons électroniques du silicium sont pendantes et deviennent des centres de recombinaisons pour les porteurs de charges. A ces liaisons s'ajoutent les impuretés présentes dans le réseau cristallin et les défauts du cristal (dislocations. . ..). La passivation consiste à améliorer la qualité électronique en surface et en volume en neutralisant les sites actifs, sources de recombinaisons.

II.6/Conclusion :

Il existe un grand nombre de technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque. Beaucoup sont encore en phase de recherche et développement.

Les principales technologies industrialisées en quantité à ce jour sont : le silicium mono ou poly-cristallin (plus de 80% de la production mondiale) et le silicium en couche mince à base de silicium amorphe ou CIS (Cuivre Indium Sélénium).

***Chapitre III:
Simulation d'une cellule
photovoltaïque***

III.1/Introduction :

Quelque soit la structure d'une cellule solaire, une optimisation de ses paramètres est nécessaire pour avoir un bon rendement. Habituellement, les paramètres à optimiser sont l'épaisseur de la cellule, les niveaux et les profils de dopage, et le confinement optique. Les valeurs des paramètres optimaux dépendent, bien sûr, de la structure de la cellule solaire, de la qualité du matériau du substrat (duré de vie, mobilité, longueur de diffusion), de la vitesse de recombinaison en surface (faces avant et arrière), ...etc. L'optimisation de la cellule solaire comprend donc l'étude de l'influence de ces paramètres sur le rendement afin d'obtenir une structure conduisant au rendement maximum.

La simulation présente ainsi les avantages suivants :

- elle permet d'éviter la fabrication de plusieurs prototypes de cellules avec des paramètres différents ;
- elle est indépendante de la technologie utilisée (on peut donc faire varier largement les paramètres) ;
- on peut séparer l'influence de chaque zone de la cellule dans le cas de paramètres interdépendants (par exemple: mobilité, longueur de diffusion et durée de vie).

Les logiciels les plus utilisés pour la simulation numérique sont : **PC1D** ; **ISE** ; **TCAD** ; **AFORS-HET** ; **SILVACO**.

Dans notre cas, nous avons utilisé le simulateur de dispositifs, le **PC1D**.

III.2/ Logiciel de simulation PC1D :

Le **PC1D** a été développé en 1985 (première version) et 1988 deuxième version, ADEPTF et AMPS. Les équations de base sont l'équation de Poisson, reliant la charge au potentiel électrostatique, et les équations de continuité pour les électrons et les trous. Cependant, plusieurs options additionnelles doivent être réunies dans le programme quand on veut simuler des photopiles solaires à couches minces. Il devrait être capable de prendre en compte la présence de plusieurs couches dans la cellule; le phénomène de recombinaison à l'interface des couches, introduit par les discontinuités dans les bandes d'énergie (E_c et E_v). Il devrait aussi, traiter correctement le problème de recombinaison et les centres de génération-recombinaisons dans les états profonds dans le volume des couches. Il devrait être aussi capable de calculer et simuler des mesures électro-optiques effectuées généralement sur les piles solaires à couches minces, non seulement la caractéristique $I(V)$, mais également la réponse spectrale et les mesures de capacité $C(V)$ et $C(f)$. En fin, il devrait fournir la convergence au moins pour les structures les plus communes des cellules à couches minces. Toutes ces options sont mises en application dans le programme de simulation SCAPS. [20]

III.3/Aperçu du logiciel :

La fenêtre du logiciel *PCID* est présentée sur la Figure (3-1).

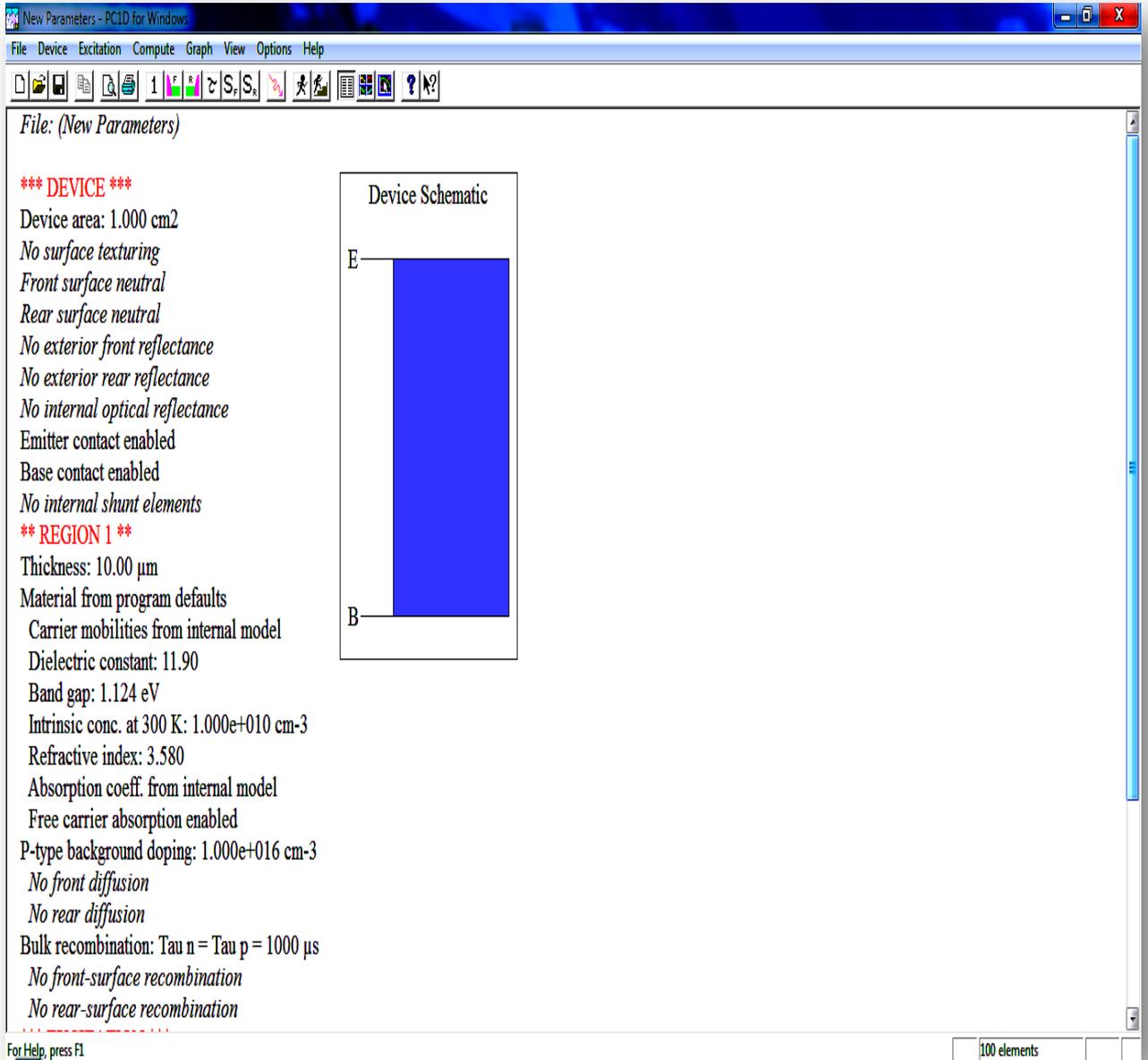


Figure (3-1): Fenêtre du logiciel PCID.

Pour visualiser les résultats de la simulation, il faut d'abord introduire les paramètres du dispositif, des régions et de l'excitation, et ensuite exécuter le programme de la simulation, ce qui permet de visualiser les résultats sous forme de données ou de graphes.

Elle contient toutes les données nécessaires pour faire une simulation des cellules solaires.

Beaucoup d'améliorations ont été apportées sur cette interface, cette page nous permet de bien simuler une cellule solaire. La structure technologique de la cellule à étudier est présentée dans cette interface. Cette dernière peut comprendre jusqu'à 5 couches empilées. Chaque couche est prise en charge par le simulateur à travers la fiche suivante :

- Epaisseur de la couche.
- Type de matériau utilisé.
- Mobilité des porteurs.
- Constante diélectrique du matériau.
- Energie du gap.
- Concentration intrinsèque.
- Indice de réfraction.
- Coefficient d'absorption.
- Dopage de la couche.
- Diffusion avant (épaisseur et dopage).
- Diffusion arrière (épaisseur et dopage).
- Recombinaison en volume (durée de vie des porteurs).
- Vitesse de recombinaison à l'avant de la couche.
- Vitesse de recombinaison à l'arrière de la couche.

III.4/ Le fonctionnement du PC1D :

Après l'introduction de toutes les données nécessaires au matériau étudié, ainsi que la configuration de la cellule solaire, le simulateur permet d'obtenir des résultats.

Le fonctionnement du *PC1D* nécessite plusieurs critères à respecter :

- 1- Le choix des gammes de valeurs des différents paramètres n'est pas aléatoire, elles doivent être réalisables par la technologie.
- 2- Pour des considérations numériques, les valeurs à introduire, doivent être comprises dans des intervalles bien déterminés.
- 3- Pour une convergence rapide, il est indispensable de minimiser au maximum la taille des éléments finis, et choisir un nombre adéquat des itérations.
- 4- Le bon choix des paramètres numériques.
- 5- Une initialisation convenable des différents paramètres de la simulation.

Ces critères sont nécessaires dans chaque simulation, mais ils ne sont pas suffisants.

Plusieurs fichiers externes sont aussi obligatoires pour exécuter le programme, nous citons, à titre d'exemple, la sélection des fichiers caractérisant chaque matériau, tels que celui du coefficient d'absorption (*.abs), et celui de l'indice de réfraction (*.inr).

Le choix des fichiers d'excitation (*.exc) sont aussi nécessaires avant l'exécution, ces fichiers spécifient l'étude à faire, soit en obscurité (dark-iv-exc.), ou bien sous illumination, dans le dernier cas on trouve deux fichiers (one-sun.exc, scan-qe.exc).

La sélection du fichier (one-sun.sxc) permet le calcul des caractéristiques (I-V, P-V) on obtient également le rendement η et le facteur de forme FF.

Le fichier (scanqe.exc) permet le calcul de la réponse spectrale.

Ils existent plusieurs spectres solaires standards, chacun d'eux spécifie l'endroit de l'étude, par exemple, dans les études spatiales on choisit le spectre AM0, l'air masse AM1.5 pour les applications terrestres.

Le *PC1D* utilise trois spectres différents (am0.spc, am1.5g.spc, am1.5.spc).

III.5/Structure simulée :

La structure de la cellule utilisée pour la simulation est de type $n^+ - p - p^+$ de surface 1 cm^2 avec une texturisation à la surface avant. Le substrat a été pris en compte par un coefficient de réflexion interne **80%** (diffus).

Pour simuler l'influence des différents paramètres, nous avons tout d'abord défini une cellule solaire de référence (conventionnelle) avec un ensemble des paramètres fixes, puis nous avons fait varier les paramètres un par un (les autres restant fixes) afin d'analyser leur influence sur les caractéristiques de la cellule solaire.

La figure (3-2) représente la structure et les paramètres de la cellule de référence utilisée pendant la simulation :

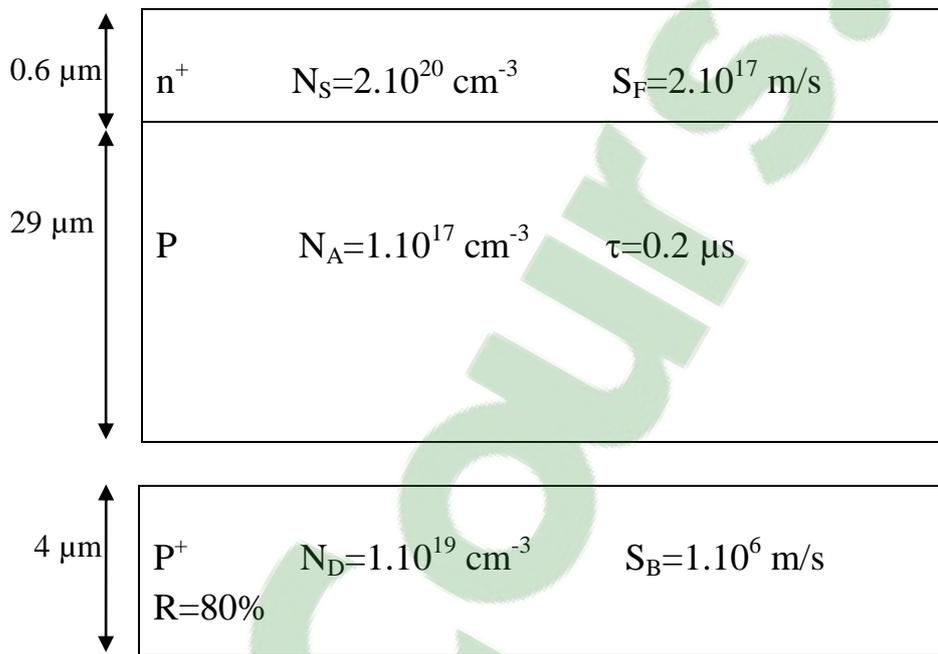


Figure (3-2): Structure et paramètres de la cellule de référence simulée.

III.6/ Etude de la cellule photovoltaïque a base de Si :

III.6.1/L'influence du dopage du substrat sur le rendement électrique :

A partir de la cellule de référence décrite plus haut, nous avons tout d'abord fait varier le dopage de substrat et nous avons fixé les autres paramètres. Puis nous avons analysé l'influence du dopage de substrat sur le rendement électrique pour déterminer les meilleurs paramètres géométrique de la cellule.

III.6.1.1/Graphe :

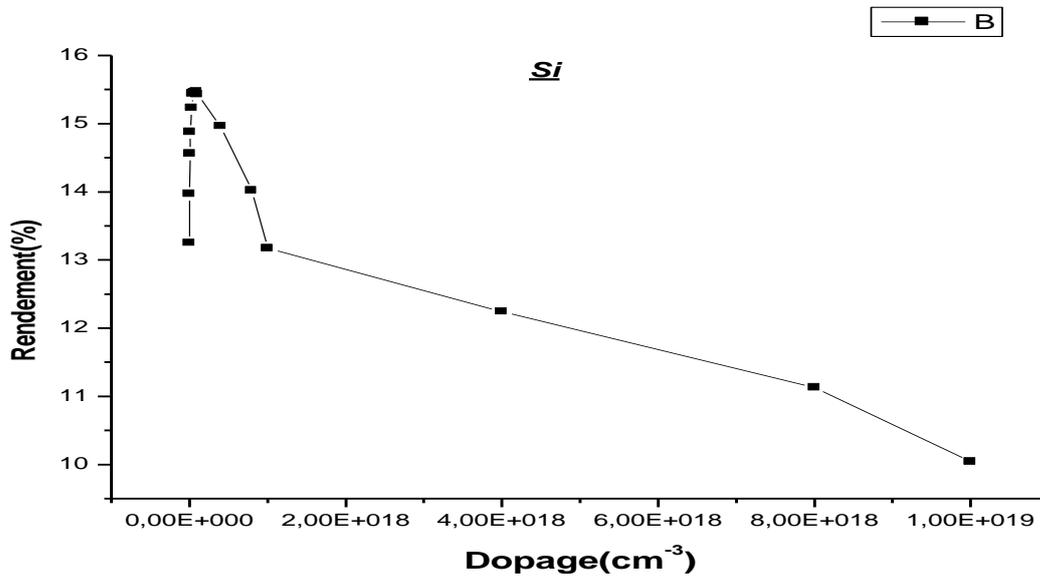


Figure (3-3): Variation de du rendement η en fonction du dopage du substrat en silicium de type p.

III.6.1.2/Interprétation du graphe :

La figure (3-3) montre la variation des paramètres des cellules solaire au silicium en fonction du dopage du substrat.

Les meilleures valeurs des paramètres photovoltaïques de ces cellules sont obtenues pour des substrats à fort dopage. Un dopage du silicium type p de ($9.10^{16} \text{ cm}^{-3}$) donne le meilleur rendement photovoltaïque ($\eta=15.47 \%$) pour ces cellules.

III.6.2/ L'influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement électrique :

Pour étudier l'influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement électrique, nous avons varié cette dernière entre [0.1-1] μm et en fixant les autres paramètres.

III.6.2.1/Grappe :

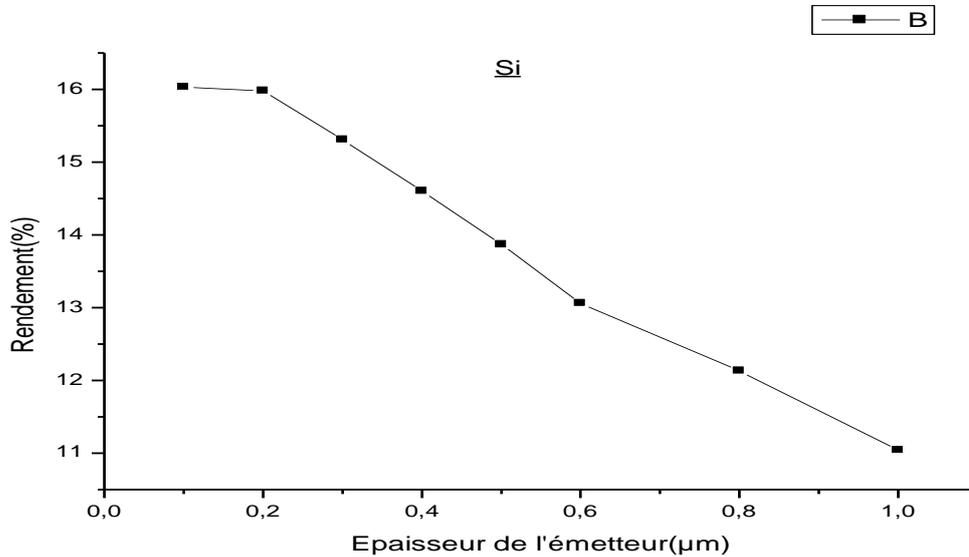


Figure (3-4): Variation de du rendement η en fonction de l'épaisseur de l'émetteur.

III.6.2.2/Interprétation du graphe :

Dans la figure (3-4), le rendement photovoltaïque décroît rapidement dans le sens positif de l'épaisseur de l'émetteur, cela est dû au rendement élevé obtenu par rapport aux autres épaisseurs plus grandes.

D'après les résultats obtenus, nous pouvons conclure que l'épaisseur de l'émetteur est un facteur important pour l'absorption des photons.

III.7/Etude de la cellule photovoltaïque a base d'InP :

III.7.1/L'influence du dopage du substrat sur le rendement électrique :

A partir de la cellule de référence décrite plus haut, nous avons tout d'abord fait varier le dopage de substrat et nous avons fixé les autres paramètres. Puis nous avons analysé l'influence du dopage de substrat sur le rendement électrique pour déterminer les meilleurs paramètres géométrique de la cellule.

III.7.1.1/Graphe :

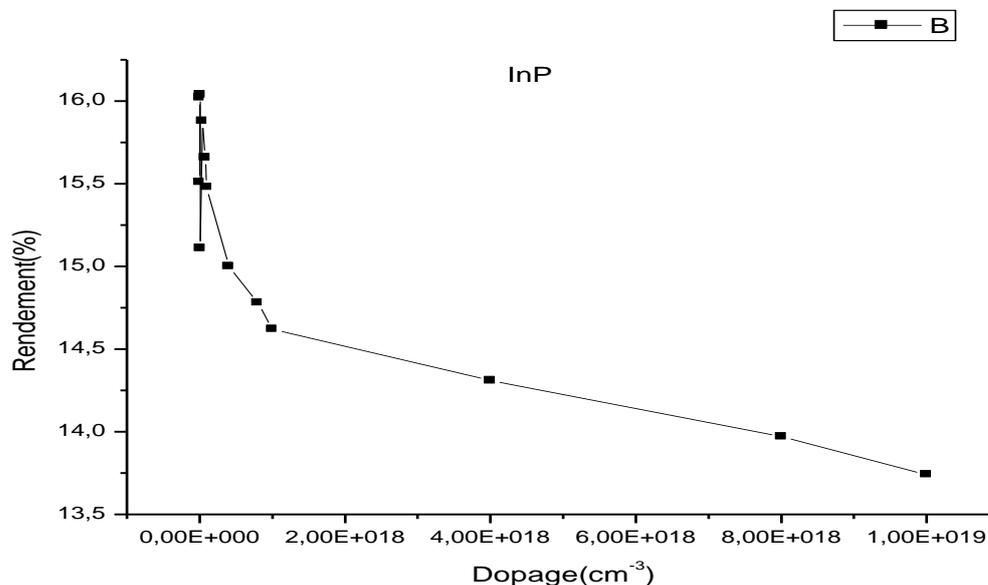


Figure (3-5): Variation de du rendement η en fonction du dopage du substrat en InP de type p.

III.7.1.2/Interprétation du graphe :

La figure (3-3) montre la variation des paramètres des cellules solaire à l'InP en fonction du dopage du substrat.

Les meilleures valeurs des paramètres photovoltaïques de ces cellules sont obtenues pour des substrats à fort dopage. Un dopage du InP type p de ($8.10^{15} \text{ cm}^{-3}$) donne le meilleur rendement photovoltaïque ($\eta=16.04 \%$) pour ces cellules.

III.7.2/ L'influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement électrique :

Pour étudier l'influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement électrique, nous avons varié cette dernière entre [0.1-1] μm et en fixant les autres paramètres.

III.7.2.1/Graphe :

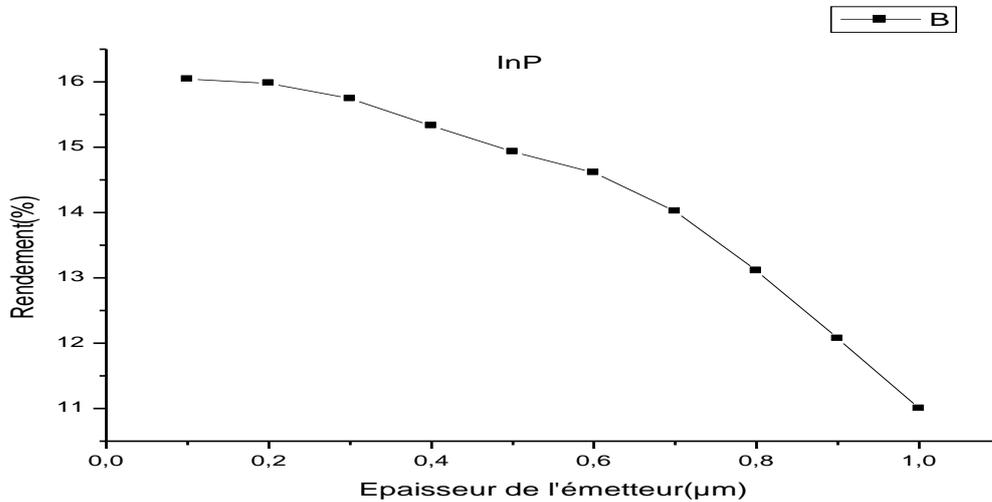


Figure (3-6): Variation de du rendement η en fonction de l'épaisseur de l'émetteur.

III.7.2.2/Interprétation du graphe :

Dans la figure (3-6), le rendement photovoltaïque décroît rapidement dans le sens positif de l'épaisseur de l'émetteur, cela est dû au rendement élevé obtenu par rapport aux autres épaisseurs plus grandes.

D'après les résultats obtenus, nous pouvons conclure que l'épaisseur de l'émetteur est un facteur important pour l'absorption des photons.

III.8/Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié l'influence du dopage du substrat et l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement électrique de la cellule photovoltaïque à base de Si et InP, à l'aide du simulateur PC1D dont la structure de cette cellule est $n^+ - p - p^+$.

Le but de cette étude a été d'optimiser les paramètres géométriques afin d'obtenir un rendement maximum. Nous avons trouvés que le rendement de la cellule étudiée varie de façon monotone avec ces paramètres.

Chapitre IV :
Etude d'un panneau solaire

IV.1/Introduction :

Une cellule photovoltaïque seule est souvent peu utilisable ; son faible épaisseur la rend très fragile et elle produit une très faible puissance électrique de l'ordre de 1 à 3 W, avec une tension de moins de 1V. Ainsi pour accroître la puissance, on assemble ces cellules soit en série, soit en parallèle.

Les cellules sont assemblées pour former un GPV élémentaire (module photovoltaïque).

IV.2/De la cellule au panneau :

IV.2.1/La mise en série des cellules :

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné.

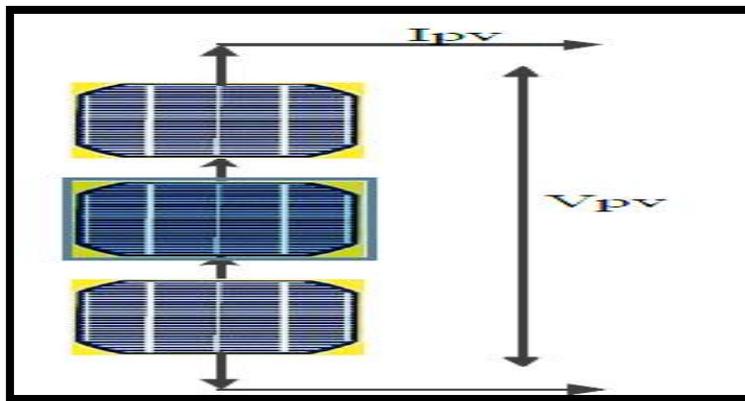


Figure (4-1) : Schéma de 3 cellules PV associées en série.

IV.2.2/La mise en parallèle des cellules :

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement des cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée.

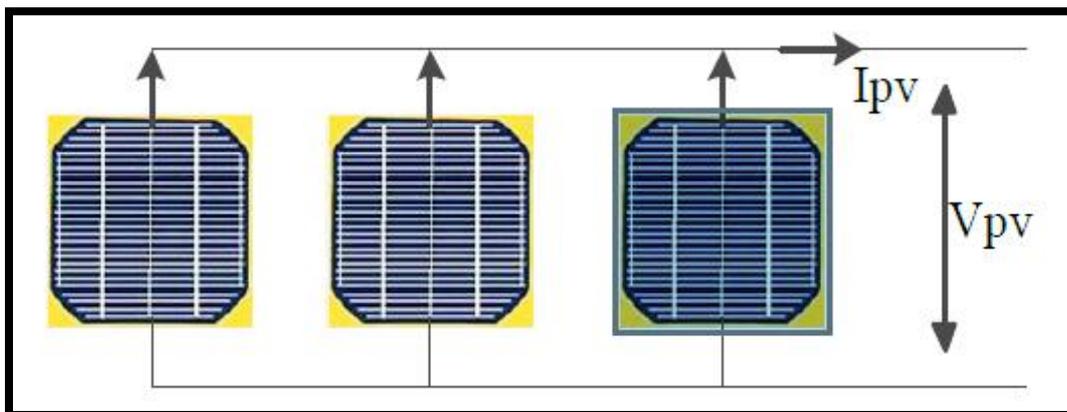


Figure (4-2) : Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle.

IV.2.3/Le module photovoltaïque :

Un module photovoltaïque est tout d'abord un convertisseur d'énergie lumineuse en électricité. Par définition, c'est un ensemble de photopiles assemblées pour générer une puissance électrique suffisante lors de son exposition à la lumière. En effet, une photopile seule ne génère qu'une tension faible : de 0,5 à 1,5 V selon les technologies. Il est donc nécessaire d'associer plusieurs photopiles en série pour pouvoir produire une tension exploitable.

On réalise ainsi un module dont la puissance va dépendre de la surface mise en œuvre.

Celui-ci va produire un courant continu en basse tension lorsqu'il sera exposé à la lumière, et il constitue la seule partie productrice d'énergie de notre générateur photovoltaïque.

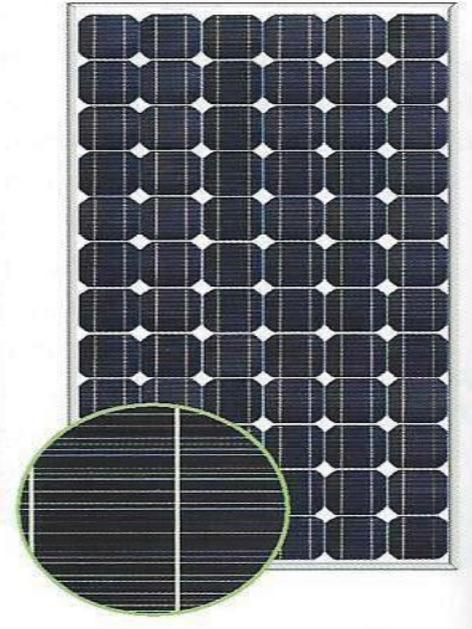


Figure (4-3): Module PV monocristallin.

Par ailleurs, il ne faut pas oublier que ce module sera aussi exposé aux rigueurs du climat et de l'environnement (variations de température, humidité, salinité, etc.). Etant un assemblage fragile et sensible à la corrosion, il conviendra donc de le protéger mécaniquement et efficacement. [21]

IV.2.4/Montages des modules photovoltaïques :

IV.2.4.1/Montage en série :

Les tensions s'additionnent et le courant traversant les modules reste identique, lorsque les panneaux sont montés en série l'intensité traversant les panneaux sera celle du panneau le moins performant de la série. Ainsi, si l'ombre apparaît sur un des panneaux, toute la série aura pour rendement celui du panneau le plus faible. L'intensité restant faible, les sections de câbles sont moins importantes.

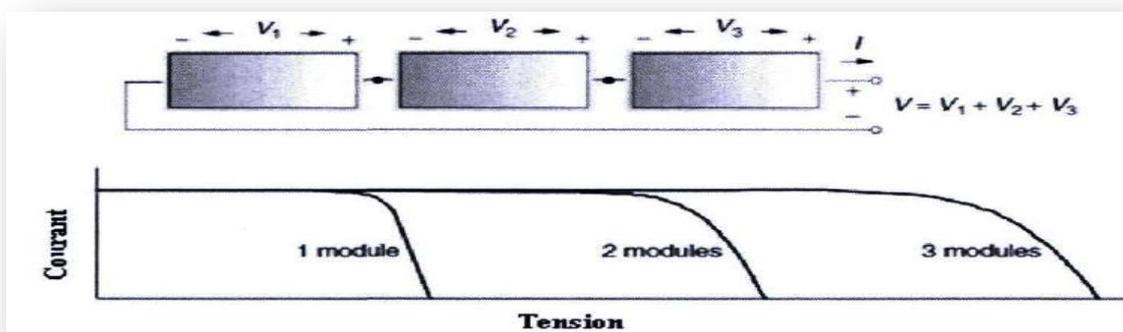


Figure (4-4) : Branchement des modules en séries.

IV.2.4.2/Montage en parallèle :

Les courants des différents modules s'additionnent et la tension reste identique. Un tel montage peut demander une section de câble plus importante due à la forte intensité.

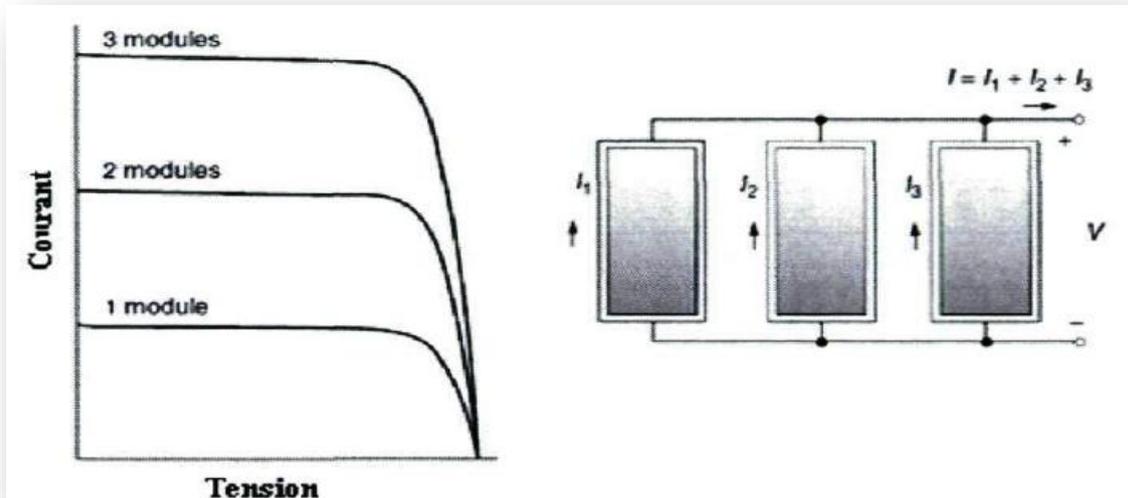


Figure (4-5): Branchement des modules en parallèles.

IV.2.5/Nombre de cellules par module :

Une cellule au silicium cristallin présente une tension de circuit ouvert de 0.58 V à 0.60 V et un point de puissance maximale situé entre 0.46 V et 0.47 V. Considérant que notre panneau doit pouvoir charger une batterie 12V jusqu'à sa tension maximale d'environ 14V et que l'on va perdre 2 à 3V en câblage et du fait des élévations de température, il faut disposer d'un panneau fournissant au minimum 16-17V à sa puissance maximale. Si l'on divise 16.5 par 0.46, on trouvera le nombre arrondi de 36, valeur courante comme nombre de cellules en série des panneaux usuels du marché. Cela permet de disposer les photopiles d'un module en 4 rangées de 9.

En pratique, les modèles les plus courants de 12V comportent 32 à 44 cellules, suivant la valeur exacte de la tension de chaque cellule et de la température d'utilisation.

Par exemple, dans le désert de certain pays chauds où la température ambiante monte jusqu'à 50°, on peut être amené à installer des panneaux 12V à 40 cellules. À raison de - 2mV/°C, chaque cellule perd 50 mV entre 25 et 50°C, et la tension de fonctionnement d'un panneau 36 cellules chute de 1.8 V. Il faut donc théoriquement 4 cellules supplémentaires pour y remédier ($1.8/0.46=3.9$). [22]

IV.3/Les panneaux :

Pour obtenir des puissances importantes, les modules solaires doivent être associés en série- parallèle pour constituer un panneau solaire. Ceux-ci sont reliés électriquement et assemblés sur un châssis.

Un panneau photovoltaïque est un assemblage en série de cellules permettant d'obtenir une tension de 12 volts.

La puissance d'un panneau solaire est fonction de sa surface, c'est à dire du nombre de cellules photovoltaïques.

Le dimensionnement du système solaire détermine le nombre de branches à mettre en parallèle pour un fonctionnement satisfaisant de l'ensemble en fonction de la consommation de l'utilisation et de l'ensoleillement du lieu.

Un panneau constitué de 24 cellules photovoltaïques va donc délivrer une tension U de 12 V, et cela quel que soit l'ensoleillement. Mais pour faire fonctionner des appareils électriques, c'est l'intensité I du panneau, variant en fonction de l'ensoleillement, qui va déterminer l'énergie électrique. [23]

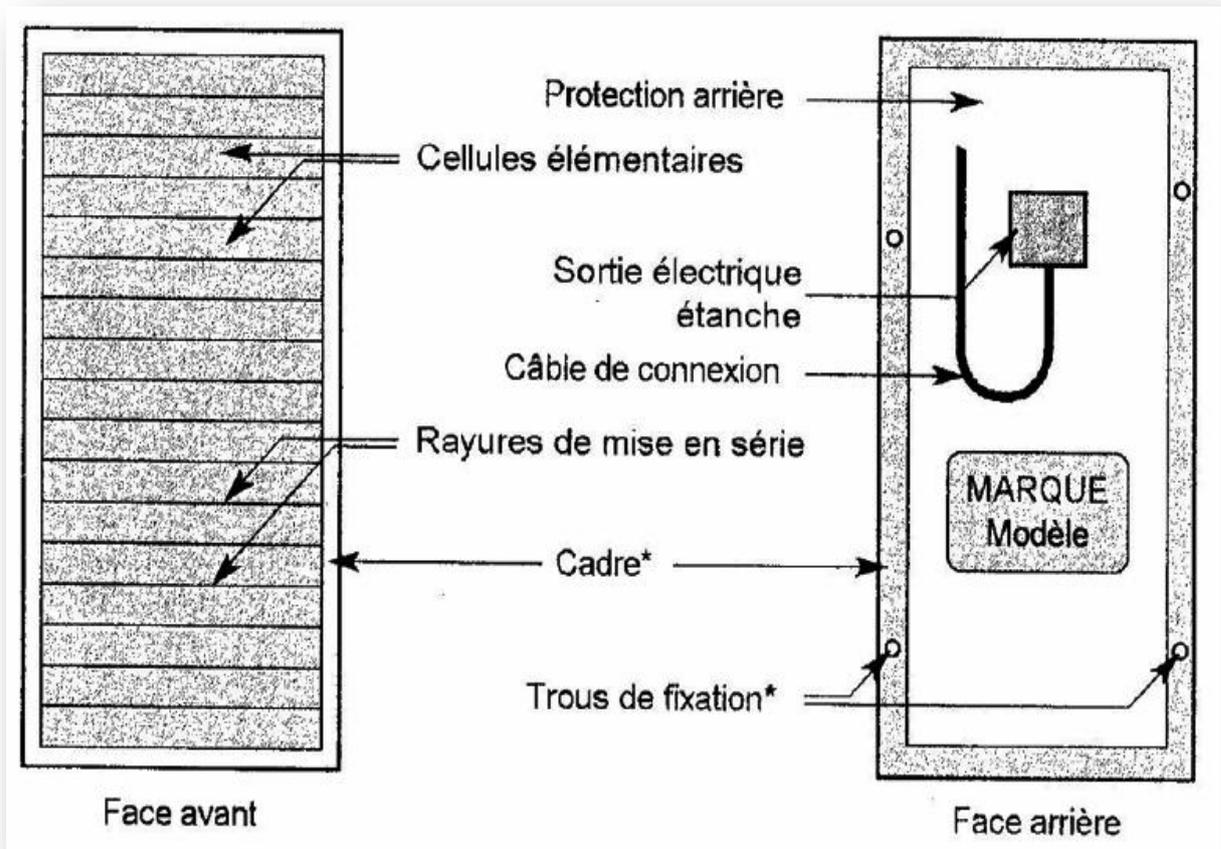


Figure (4-6): Structure d'un panneau photovoltaïque au silicium amorphe.

IV.3.1/Caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque :

IV.3.1.1/Tension de circuit ouvert(V_{CO}) :

Si on place un panneau sous une source lumineuse constante sans aucune circulation de courant, on obtient à ses bornes une tension continue, dite tension à circuit ouvert V_{CO} .

Tel que :

$$V_{CO} = n \cdot 0.6V \quad (4-1)$$

- 0.6V: tension pour une cellule élémentaire (elle varie suivant la technologie et l'éclairement).
- n : est le nombre de cellules.

Mesures en pratique :

Sur un seul panneau : $V_{CO} = 20.6 V$.

Sur deux panneaux en parallèles : $V_{CO} = 21 V$.

IV.3.1.2/Courant de court circuit(I_{CC}) :

Lorsqu'on place le photogénérateur en court circuit, il débite son courant maximal à tension nulle. On appelle ce courant : courant de court circuit I_{CC} .

Avec : $I_{CC} = I_{CCn}$ tel que : n : est le nombre de cellules.

Mesures en pratique :

Sur un seul panneau : $I_{CC} = 6.08 A$.

Sur deux panneaux en parallèles : $I_{CC} = 11.85 A$.

IV.3.1.3/Caractéristiques $I=f(U)$:

Réseau de caractéristique $I = f(U)$ suivant un éclairement variable (pour une température de jonction de 25°C et une répartition spectrale du rayonnement dit AM 1,5).

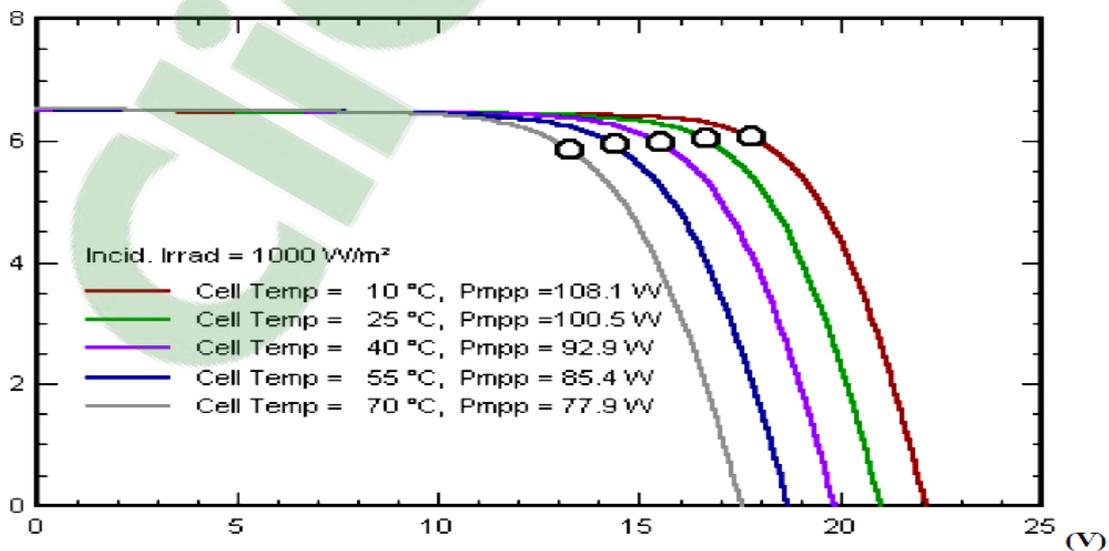


Figure (4-7) : $I = f(V)$ d'un panneau PV à éclairement.

IV.3.1.4/Caractéristiques $P=f(U)$:

La puissance crête d'une cellule PV, notée W_c (Watt crête) ou W_p (Watt peak), représente la puissance électrique maximum délivrée dans les conditions suivantes dites conditions standard :

- éclairement solaire de $1 \text{ kW} / \text{m}^2$;
- température de la cellule PV égale à $+ 25 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Masse d'air AM 1,5.

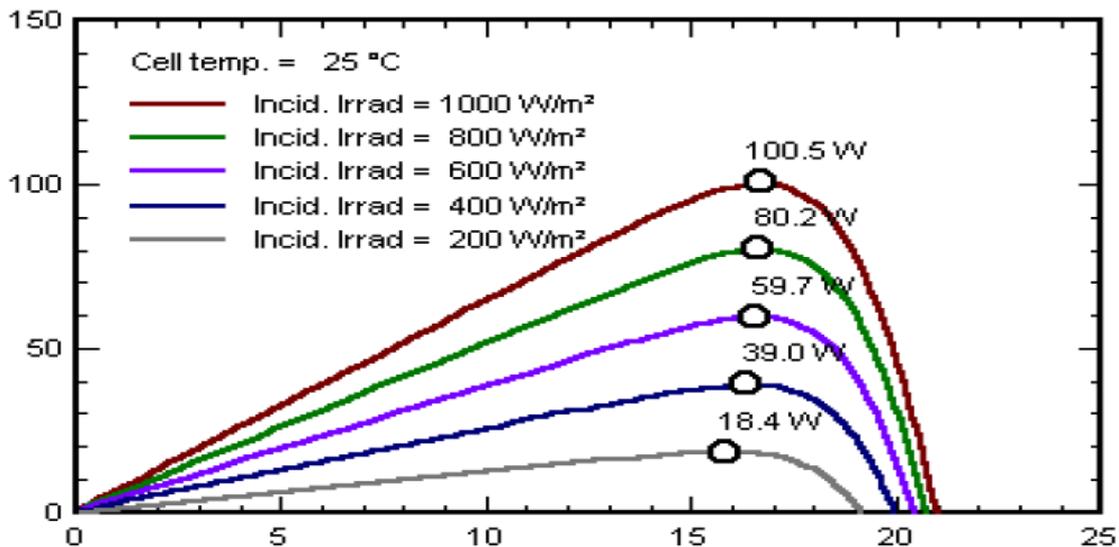


Figure (4-8) : Courbes de puissance en fonction de la tension aux bornes d'un panneau PV.

IV.3.2/ Le châssis :

Dans la plupart des systèmes isolés, le panneau solaire est constitué de modules photovoltaïques assemblés sur un support généralement métallique. Cette charpente est réalisée le plus souvent en aluminium ou en acier galvanisé. Ce choix de matériau est justifié par des contraintes telles que :

- Résistance mécanique (vent) ;
- Tenue à la corrosion ;
- Conductivité thermique ;
- Facilité d'assemblage ;
- Poids, etc.

De nombreux types de châssis existent et sont fonction du nombre de modules et de leur taille, du support d'implantation (dalle, mur, toit, ...), de leur hauteur, et de leur inclinaison.

Leur hauteur doit être telle que les modules solaires soient hors de portée d'éléments indésirables (flore, faune ...). Leur inclinaison est généralement fixe et déterminée par le dimensionnement. [24]

IV.3.3/Le câblage :

Le câblage a pour but de regrouper électriquement les modules solaires. Généralement, les modules sont câblés tout d'abord en série pour réaliser des branches qui comportent chacune leur diode en série. La mise en parallèle de branches est réalisée, pratiquement, à l'aide de boîtes de jonction fixées sur les châssis. Il est indispensable d'apporter un soin particulier au serrage des cosses et au câblage d'une installation.

Une chute de tension trop importante dans les connexions et dans les câbles peut réduire considérablement le courant de charge de la batterie.

Cette chute de tension est loin d'être négligeable lorsque de forts courants sont fournis sous de faibles tensions. Cette contrainte impose l'utilisation de câbles résistant aux intempéries et dont la section sera fonction de la distance entre panneau solaire et batterie. [25]

La chute de tension dans les câbles est donnée par la formule:

$$\Delta U = 2 R l I$$

Avec : U en volts, R en Ohm/m, l en m, I en A.

IV.4/Protection d'un GPV :

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leurs fonctionnements. Pour cela, deux types de protection sont classiquement utilisés dans les installations actuelles :

- la protection en cas de connexions en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour).
- La protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass). [16]

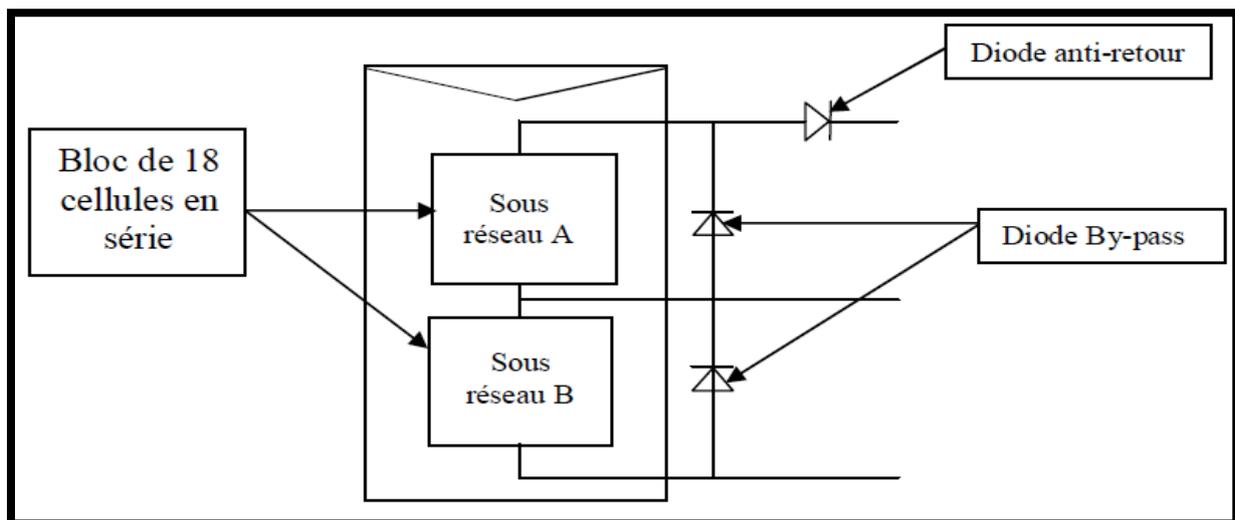


Figure (4-9) : Schématisation d'un GPV élémentaire avec diode by-pass et diode anti-retour.

La diode anti-retour est utilisée pour éviter les courants inverses et la diode By-pass n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble.

IV.5/Le stockage d'énergie :

La batterie pour le solaire sera sollicitée dans la durée à des courants faibles.

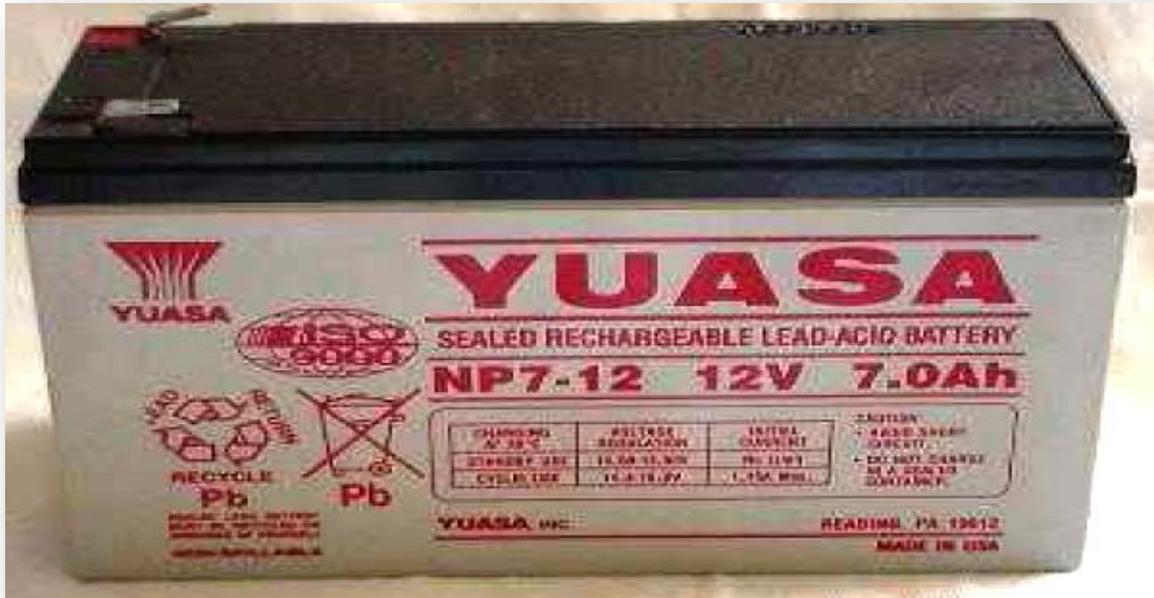


Figure (4-10) : Photo d'une batterie.

IV.5.1/Choix de la technologie :

IV.5.1.1/Les principales caractéristiques des batteries :

- ✓ **La tension nominale** : c'est la force électromotrice de l'accumulateur en fonction du couple électrochimique utilisé.
- ✓ **La tension de charge** : c'est la tension minimale à appliquer pour charger efficacement l'accumulateur.
- ✓ **La capacité nominale**: c'est la quantité d'énergie que l'on peut stocker dans la batterie, elle s'exprime en ampères-heures (Ah). Elle est donnée dans des conditions de référence (durée de décharge de 20h et température de 25°C).
- ✓ **La profondeur de décharge** : rapport entre la quantité d'électricité déchargée à un instant t et la capacité nominale.

Il y a différents types de batterie. Celles-ci diffèrent de part leur taille, leur utilisation et leur mode de construction.

Les 2 types de batteries, qui diffèrent selon leur utilisation, sont les batteries de démarrage et les batteries à cycles profonds ;

- Une batterie de démarrage est utilisée dans la plupart des voitures et a pour but de produire un courant important pendant un temps très court.
- Une batterie à cycles profonds a la capacité de pouvoir se décharger complètement quelques centaines de fois. Elle a moins d'énergie instantanée mais une production d'énergie à long terme bien supérieure. [26]

IV.5.1.2/ Les différents types de batteries selon leur composition :

✓ **Les accumulateurs au plomb « ouvert » :**

L'électrolyte est liquide et doit être renouvelé. Cet élément Plomb-acide se compose de 2 électrodes de Plomb baignant dans l'acide sulfurique dilué. La tension nominale est de 2V par élément.

✓ **Les accumulateurs au plomb étanche :**

Ils ont les mêmes caractéristiques que les Plomb « ouverts » mais ils sont étanches, c'est-à-dire qu'ils peuvent fonctionner dans toutes les positions et ne nécessitent absolument aucun entretien.

Les avantages essentiels de la technologie Plomb pour le photovoltaïque sont : la longévité, le rapport qualité/prix, un entretien faible ou nul, une bonne tenue aux températures extrêmes, et la possibilité de charge à courant faible.

Cependant, il faut éviter les décharges profondes et les surcharges et il faut maintenir ces batteries chargées quand on les stocke.

✓ **Les accumulateurs Nickel Cadmium (NiCd) :**

La tension nominale est de 1,2V par élément. Ces accumulateurs sont plus intéressants pour le solaire, du fait de leur meilleure efficacité de charge à faible courant et de leur bonne tenue aux basses températures. Ils sont surtout utiles pour des capacités de stockage inférieures à 2 Ah. Cependant, le cadmium est toxique pour l'environnement.

✓ **Les accumulateurs Nickel Métal Hydrures (NiMH) :**

Ces accumulateurs sont dérivés des NiCd et ont été développés pour augmenter la capacité par unité de volume, favoriser les charges rapides, et éliminer le cadmium.

Ils sont plus compacts que les NiCd.

Les avantages des accumulateurs NiCd et NiMH pour le photovoltaïque sont : de petites capacités disponibles sous de multiples formes de 30 à 2000 Ah, leur compacité, une excellente tenue à la chaleur, une gamme de tensions disponible plus grande du fait de la valeur de 1,2V par élément.

Cependant, ils présentent de nombreux inconvénients comme l'autodécharge, une charge difficile pour les NiMH à moins de 0°C, et un effet mémoire quand les accumulateurs sont peu sollicités.

✓ **Les accumulateurs Lithium Ion :**

Les batteries lithium-ion acceptent des charges électriques plus importantes que les batteries au nickel cadmium. Le lithium étant le métal le plus léger, ces batteries permettent une autonomie plus longue dans un boîtier moins lourd. La batterie Li-ion nécessite peu d'entretien, ce qui constitue un avantage qu'aucune autre composition chimique ne peut égaler.

Il n'y a pas de mémoire et aucun recyclage périodique n'est requis pour prolonger la durée de vie de la batterie. En plus de sa densité d'énergie élevée et de son poids léger, le degré

d'autodécharge de la Li-ion est deux fois moins élevé que celui de la NiCd et de la NiMH, ce qui fait de la Li-ion un produit qui convient très bien aux applications modernes utilisant des jauges à essence.

Par contre, la Li-ion est fragile et requiert un circuit de protection pour assurer un fonctionnement sécuritaire. Le courant de charge est modéré, et la charge de la batterie doit être effectuée en respectant des normes rigoureuses. En outre, la Li-ion est sujette au vieillissement, qu'elle soit utilisée ou non.

✓ Les accumulateurs Lithium Ion Polymère :

Apparues en 1999, les batteries Lithium ion polymère sont une variante de la technologie Lithium ion. Les performances sont sensiblement les mêmes, mais l'électrolyte est remplacée par un polymère gélifié, qui permet de donner toutes les formes possibles à la batterie. Encore chère aujourd'hui, cette technologie est promise à beaucoup d'avenir. Elle doit, à terme, revenir moins chère que le lithium-ion classique. [27]

IV.5.2/ Tableau comparatif des différentes technologies :

Type	Énergie massique	Tension d'un élément	Durée de vie (nombre de recharges)	Temps de charge	Autodécharge par mois
<i>Plomb</i>	30-50 Wh/kg	2 V	200-300	8h- 16h	5 %
<i>Ni-Cd</i>	48-80 Wh/kg	1,25 V	1500	1h	20 %
<i>Ni-MH</i>	60-120 Wh/kg	1,25 V	300-500	2h-4h	30 %
<i>Li-ion</i>	110-160 Wh/kg	3,7 V	500-1000	2h-4h	10 %
<i>Li-Po</i>	100-130 Wh/kg	3,7 V	300-500	2h-4h	10 %

Tableau (4-1) : Tableau comparatif des différentes technologies. [28]

IV.6/Le régulateur de charge :

C'est l'élément central du système photovoltaïque car il permet de protéger la batterie pour lui assurer une meilleure durée de vie ce qui est important car la batterie a une durée de vie inférieure aux photogénérateur (5 ans au lieu de 20 ans).

Le régulateur de charge améliore la durée de vie en empêchant la surcharge et la décharge profonde (c'est-à-dire que la batterie soit vidée de plus de 90% de sa charge).

Ces deux fonctions sont réalisées avec un régulateur charge/décharge connecté avec les panneaux, la batterie et les systèmes utilisateurs. La tension d'une batterie chargée à courant constant augmente de façon linéaire jusqu'à ce qu'elle atteigne pratiquement la fin de charge où soudainement elle augmente beaucoup plus rapidement.

C'est lorsque sa matière active est presque complètement transformée et quand l'électrolyte commence à libérer des gaz (décomposition de l'eau en hydrogène et oxygène). Si on laisse durer ce phénomène, la batterie deviendra surchargée, ce qui accélérera la corrosion du plomb, fera perdre de l'électrolyte et endommagera les plaques de plomb. La fonction principale du régulateur est d'empêcher cette surcharge. [1]

Une légère gazéification est cependant nécessaire et recommandée car lorsque la gazéification commence, une partie du courant entrant va permettre de terminer la charge, tandis que le reste produira l'électrolyse et les gaz traversant l'électrolyse vont l'agiter et ainsi, homogénéiser son acidité. Si on n'atteint jamais ce stade final, l'électrolyte deviendra stratifié, la concentration d'acide sera plus importante au fond du bac, ce qui accélérera la corrosion des plaques et entraînera une sulfatation. La sulfatation est la transformation d'une partie du plomb actif en cristaux durs qui ne peuvent plus participer au stockage de l'énergie. Ces deux phénomènes causeront une diminution de la durée de vie de la batterie.

Afin de paramétrer le régulateur de charge, il est nécessaire d'utiliser deux valeurs caractéristiques de la batterie : la tension de fin de charge V_{fc} et la tension de recharge V_{rc} , valeur pour laquelle le processus de charge recommence. La plupart des régulateurs travaillent en tout ou rien et utilisent ces deux tensions pour arrêter ou recommencer la charge. Pour interrompre le courant, on peut utiliser un relais, un transistor ou bien un MOSFET. Quand la tension aux bornes de la batterie atteint 14,5 V, le régulateur coupe la liaison avec le panneau, ce qui implique que la batterie n'est plus chargée. Cette charge est rétablie vers 13,5 V.

De même, quand la tension atteint 11,5 V (seuil bas typique), le régulateur coupe la liaison avec le récepteur, ce qui ne permet plus son utilisation, puisqu'il met ainsi l'appareil hors service jusqu'à ce que la tension batterie soit revenue à un niveau de 12,5 V. Il rétablit alors l'utilisation. [26]

Le schéma (Figure (4-11)) illustre le principe du fonctionnement d'un régulateur charge/décharge.

ET la (Figure (4-12)) présente Les différents états de fonctionnement du système.

Note : La protection décharge, contrairement à la protection surcharge n'est pas indispensable.

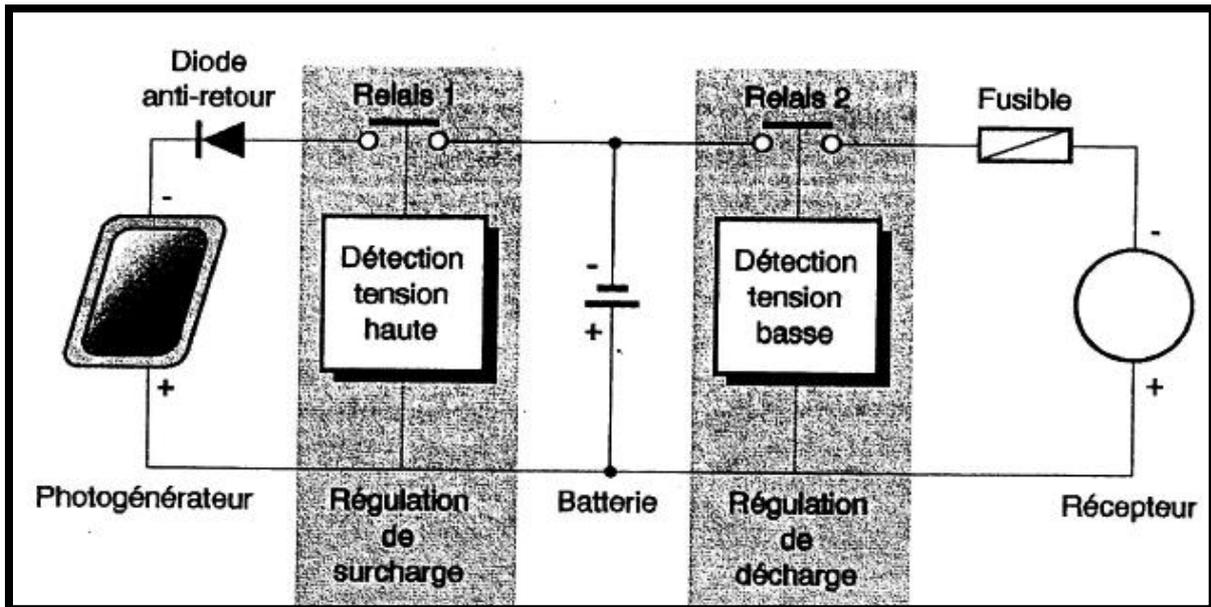


Figure (4-11) : Fonctionnement d'un régulateur charge/décharge. [29]

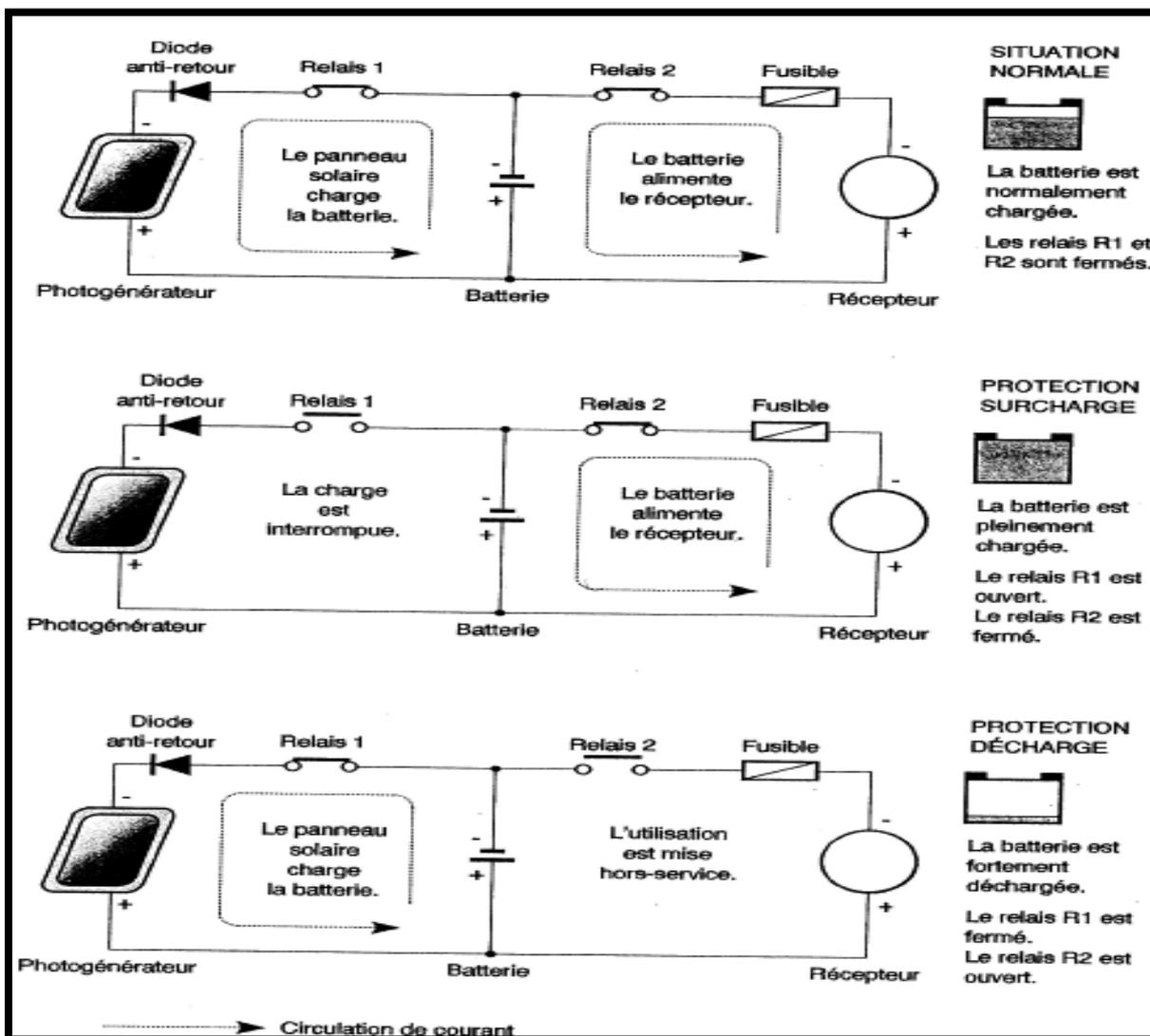


Figure (4-12) : Les différents états de fonctionnement du système. [29]

IV.6.1/ Technologie des régulateurs :

Les différentes méthodes de contrôle de charge sont généralement utilisées: les types shunt, série, MPPT (Maximum Power Tracker) et PWM (Pulse Width Modulation).

Les régulateurs de type série incorporent un interrupteur entre le générateur et l'accumulateur afin d'arrêter la charge.

Pour les régulateurs de type shunt, le courant de charge des batteries est dévié vers une résistance et un court-circuit est effectué au niveau des modules solaires en fin de charge.

Les régulateurs à recherche de point de puissance maximum, afin de réaliser une transformation en puissance, utilisent un circuit électronique spécial permettant de soutirer en permanence du champ de capteur sa puissance maximale. [26]

IV.6.1.1/ Régulateurs de type shunt :

C'est le modèle le plus répandu car il est simple à réaliser. Le courant des panneaux solaires est envoyé dans un interrupteur en parallèle avec la batterie lorsque celle-ci atteint sa pleine charge. Le principe du circuit est un simple aiguillage. Tout le courant des panneaux passe normalement dans la batterie et lorsque le seuil de coupure est atteint, tout le courant passe dans l'interrupteur. Il est donc nécessaire de rajouter une diode entre cet interrupteur et la batterie pour ne pas court-circuiter la batterie. Cette diode pourra servir de diode anti-retour. L'interrupteur utilisé est le plus souvent un MOSFET car il est plus intéressant qu'un transistor bipolaire car il dissipe moins d'énergie. Il est également plus intéressant qu'un relais car le relais présente une résistance de passage très faible mais il devra être temporisé pour ne pas atteindre rapidement sa durée de vie de commutation, ce qui pose des problèmes si le courant de charge pour une capacité de batterie donnée est important.

Le principe du régulateur shunt est illustré sur le schéma (Figure (4-13)) suivant :

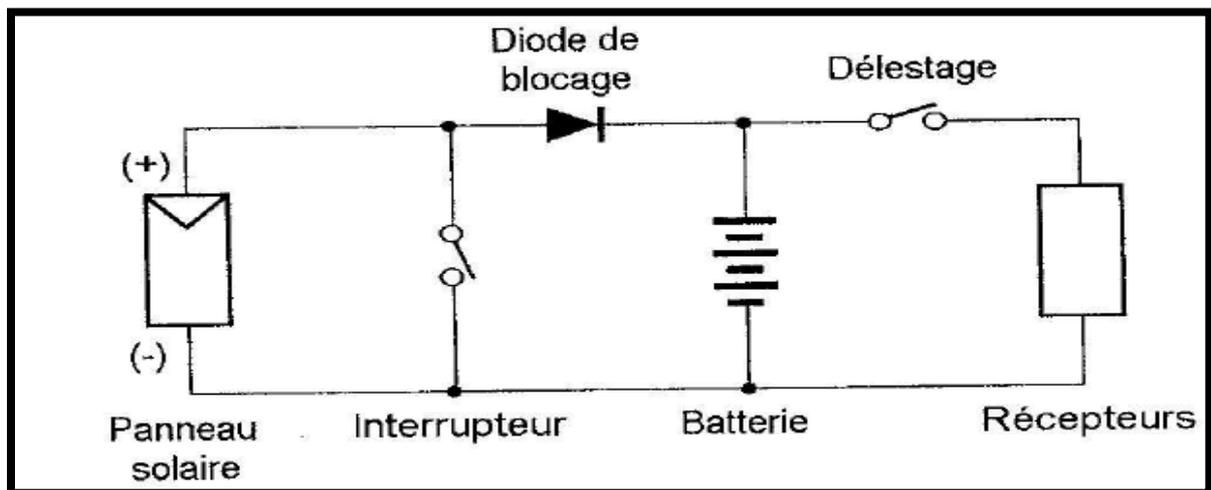


Figure (4-13) : Schéma d'un régulateur de type shunt.

Parmi les régulateurs shunt, il y a des régulateurs shunt linéaires. Ceux-ci maintiennent une tension constante aux bornes de la batterie lorsque celle-ci atteint sa pleine charge.

L'avantage est que la charge totale de la batterie est garantie et le désavantage est que la puissance non utilisée du panneau en fin de charge doit être dissipée par le transistor en parallèle, ce qui limite ce type de régulation aux petits courants.

IV.6.1.2/Régulateurs de type série :

Ce régulateur devient de plus en plus répandu et devrait à terme supplanter le régulateur shunt. L'interrupteur de charge est ici en série avec la batterie et il s'ouvre lorsque la fin de la charge est atteinte. Les mêmes interrupteurs peuvent être utilisés que pour les shunts avec une différence pour le relais. Celui-ci peut être commutant et laisser passer le courant vers un autre récepteur lorsque la batterie est chargée.

Dans le modèle linéaire, on ajoute une source de courant en parallèle avec l'interrupteur pour réaliser l'égalisation de la batterie par flottement ; cette source sera par exemple un transistor contrôlé ou une simple résistance en série avec une diode. La diode anti-retour peut faire partie ou non du régulateur. Le désavantage par rapport au type shunt est que l'interrupteur selon sa résistance de passage ajoute une chute de tension supplémentaire entre les panneaux et la batterie. [25]

Le principe du régulateur série est illustré sur le schéma (Figure (4-14)) suivant :

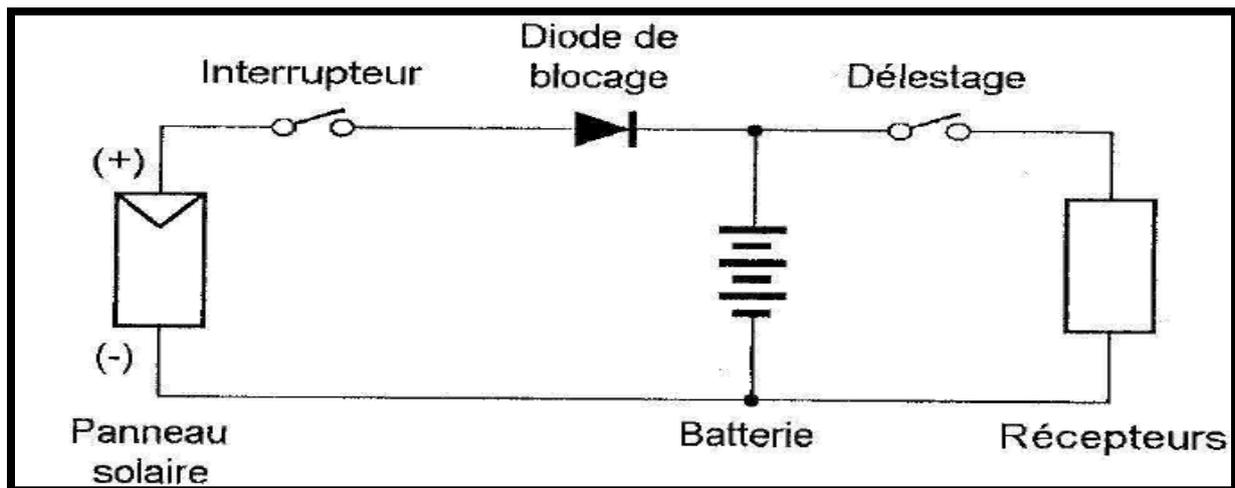


Figure (4-14) : Schéma d'un régulateur de type série.

IV.6.1.3/Régulateurs PWM :

Ce type de régulateur essaie de rassembler les avantages des deux techniques précédentes en utilisant un interrupteur actif modulé par impulsions de largeurs variables (PWM; Pulse Width Modulation). Les avantages sont que l'on peut maintenir une tension constante aux bornes de la batterie pour terminer la charge tout en dissipant dans le transistor (un MOSFET en général) uniquement les pertes dues à la résistance de passage. Les deux techniques shunt et série peuvent être utilisées dans ce cas mais la majorité des fabricants utilisent la technique série. La recharge de la batterie étant un processus relativement lent, cette technique doit être utilisée à fréquence assez basse (au maximum quelques centaines de hertz) pour que la charge fonctionne. [24]

IV.6.1.4/Régulateurs MPPT :

Dans ce régulateur, un circuit mesure en permanence la tension et le courant du panneau pour tirer de l'énergie au point de puissance maximale (MPPT Max Power Point Tracker). Ceci permet de garantir que le maximum d'énergie sera récupéré, quels que soient la température et l'ensoleillement. En général, ces régulateurs fonctionnent soit en élevant, soit en réduisant la tension. Un premier circuit ajuste la demande au point de puissance maximale de l'ensemble des panneaux et un deuxième circuit transforme le courant et la tension pour l'adapter au type de batterie. L'avantage de ce type de régulateur est qu'il permet de travailler dans une grande plage de température et ainsi récupérer l'excès non négligeable de tension en hiver lorsque le point de puissance maximale peut monter au-dessus de 17 à 18 V dans un système 12V. [27]

IV.7/Les convertisseurs :

Les convertisseurs sont des appareils servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, soit à une tension alternative. Aujourd'hui, la grande majorité des convertisseurs est électronique mais on peut encore trouver des génératrices fournissant du 230 VAC entraînées par des moteurs à courant continu.

IV.7.1/Les convertisseurs DC/DC (ou les hacheurs) :

Un hacheur peut être réalisé à l'aide d'interrupteur électronique commandé à l'ouverture et à la fermeture tels que les thyristors GTO ou les transistors bipolaire ou à effet de champ à grille isolée fonctionnant en régime de commutation (tout ou rien). Le principe du hacheur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source-charge à l'aide de l'interrupteur électronique. Celui-ci doit pouvoir être fermé ou ouvert à volonté afin d'avoir une tension de sortie continue réglable (Figure (4-15)).

Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source DC variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante.

Les convertisseurs DC-DC sont classés en deux types : les convertisseurs non isolés et les convertisseurs isolés de la source. [25]

✓ Non isolés de la source :

Quatre configurations de base sont :

- Convertisseur abaisseur « BUCK » ;
- Convertisseur élévateur « BOOST » ;
- Convertisseur abaisseur-élévateur « BUCK-BOOST » ;
- Convertisseur «SEPIC».

✓ Isolés de la source :

Comme le convertisseur « Flyback ».

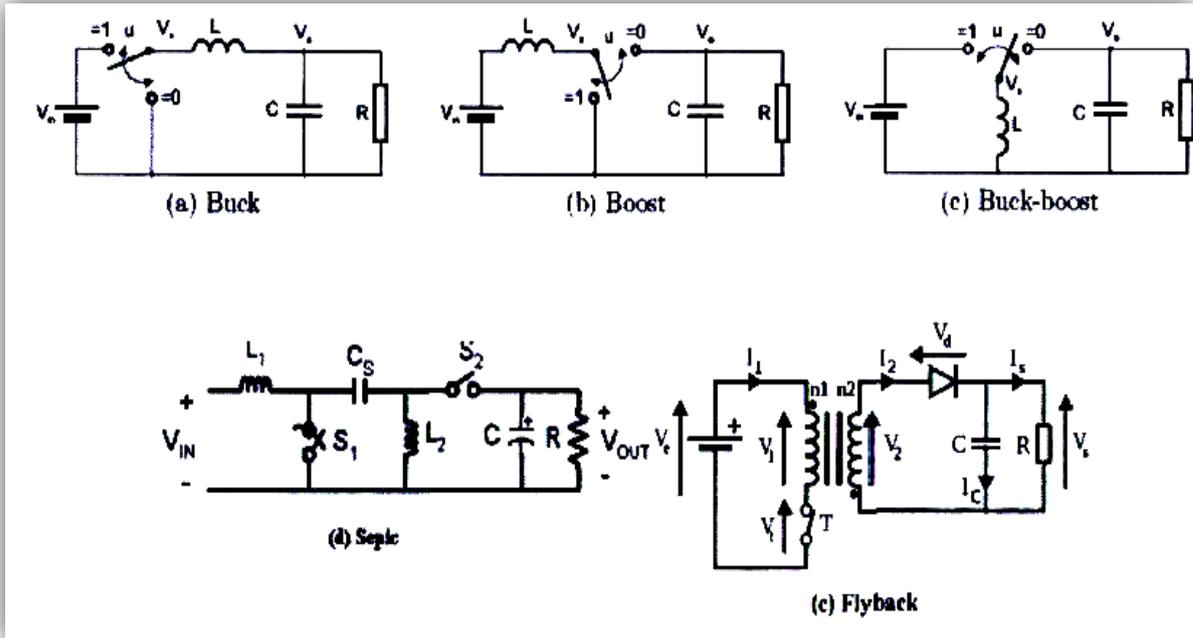


Figure (4-15) : Principales configurations de convertisseurs DC-DC.

IV.7.2/ Les onduleurs DC/AC :

Ce type d'adaptation, bien connu également, fait appel à des structures de convertisseurs continu/alternatif de type onduleur. On peut distinguer aujourd'hui trois grands types de structures utilisées au milieu industriel :

- les onduleurs à source de courant.
- les onduleurs à source de tension et modulation de largeur d'impulsion.
- les onduleurs à résonance.

Le principe de conversion d'un onduleur est schématisé sur la (Figure (4-16)).

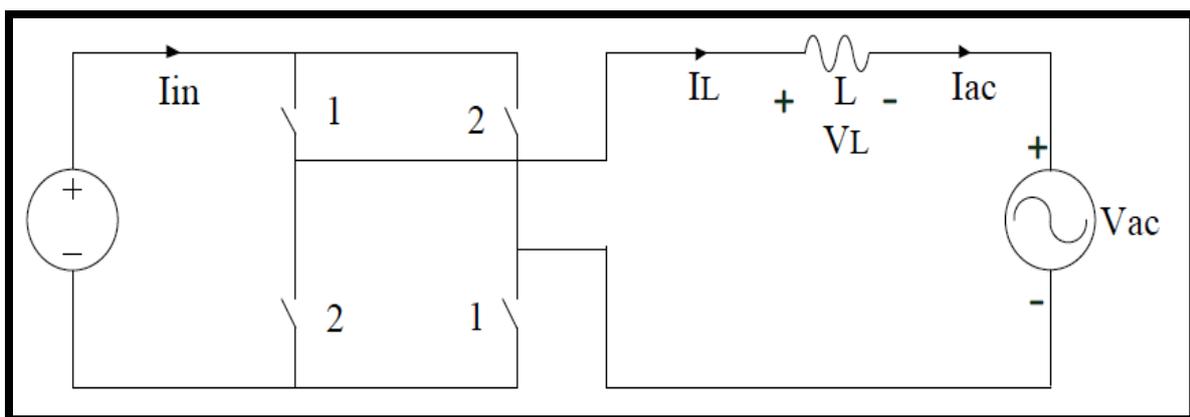


Figure (4-16) : Circuit électrique de base d'un onduleur.

Il existe différentes topologies de gestion de ces installations. Néanmoins, toutes ces approches reposent sur un GPV raccordé au réseau par le biais d'onduleurs qui transfèrent et mettent en forme l'énergie solaire électrique. Les progrès effectués ces dernières années dans

le développement des onduleurs dédiés aux photovoltaïques ont permis de faire évoluer grandement ces systèmes de gestion. Les onduleurs ne se limitent plus seulement à transformer la puissance continue (DC) générée par les panneaux solaires en puissance alternative sous forme d'une tension sinusoïdale de fréquence souhaitée (par ex. 230V/400V-50Hz) mais ils exploitent également la puissance délivrée par le GPV en le forçant à fonctionner à son point de puissance maximum. De plus, ils assurent une surveillance fiable du réseau pour protéger ce dernier contre les pannes et interrompre l'alimentation en cas de problèmes survenant soit du réseau soit de l'installation. Actuellement, il existe principalement trois architectures d'onduleurs donnant de bonnes solutions techniques : l'onduleur central, les onduleurs strings et les onduleurs intégrés aux panneaux. Nous décrivons brièvement leur propriété ci-dessous. [27]

IV.7.2.1/L'onduleur central :

Dans le cas d'onduleur central, les divers panneaux solaires pour une grande installation (>10kW) sont montés en rangées pour former une chaîne (String en anglais), elle-même couplée en parallèle avec des diodes anti-retours à plusieurs autres, (Figure (4-17)-« a »).

Le générateur PV de forte puissance ainsi structuré est relié du côté DC à un seul onduleur. Cet onduleur central présente une grande efficacité énergétique à des coûts réduits. La fonction principale de cet appareil est de créer une tension alternative à partir d'une tension continue la, plus compatible avec le réseau et d'examiner en permanence la présence ou non du réseau pour autoriser l'injection du courant. La structure classique de l'onduleur est souvent un circuit en pont permettant de relier chacun des deux pôles d'entrée à chacun des deux pôles de sortie par le biais d'interrupteurs de puissance. [29]

IV.7.2.2/Les onduleurs strings :

De même que pour l'onduleur central, le champ PV est, ici aussi constitué de strings (chaînes). Chaque string est toutefois relié à un onduleur (Figure (4-17)-« b »). Chaque string peut ainsi fonctionner à son PPM. Cette technologie réduit considérablement le risque de problèmes d'adaptation ainsi que les pertes dues aux effets d'ombrage, tout en éliminant celles occasionnées par les diodes anti-retour et un câblage prolongé vers le générateur DC. Ces propriétés techniques avantageuses accroissent la fiabilité de l'installation ainsi que sa production énergétique. Mais il faut prendre en compte l'augmentation du nombre d'onduleurs de moyenne puissance disposant de rendement compris entre 92% et 96% nécessaires pour calculer le surcoût d'une telle architecture par rapport à la précédente. [28]

IV.7.2.3/Les onduleurs intégrés aux panneaux PV :

Chaque panneau dispose ici de son propre onduleur (Figure (4-17)-« c »), ce qui permet théoriquement d'éviter toutes pertes liées à la différence de puissance entre chaque module quelle que soit l'origine du défaut. Le rendement des onduleurs intégrés aux panneaux reste cependant en-deçà de celui de l'onduleur string à cause de la grande différence des tensions entre les GPV et la charge. De plus, les onduleurs intégrés aux panneaux induisent des coûts de câblage supplémentaires du côté AC, étant donné que chaque panneau de l'installation doit

être relié au réseau 230 V. Le nombre nettement supérieur d'onduleurs intégrés aux panneaux nécessaires dans cette architecture entraîne un travail de couplage nettement plus conséquent. Ce concept ne s'applique donc généralement qu'aux installations PV d'une puissance modeste allant de 50 W à 400 W.

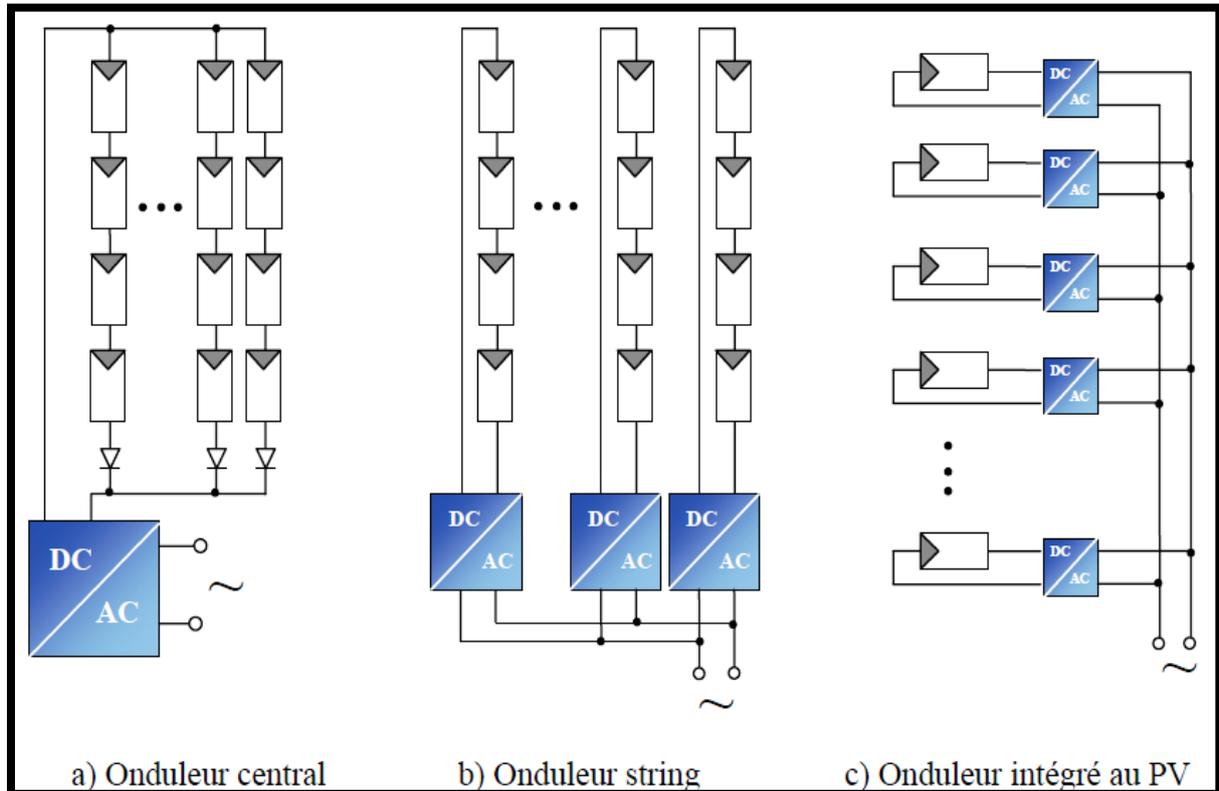


Figure (4-17) : Schémas de principe de différentes installations PV connectés à un réseau électrique.

IV.8/Techniques de poursuite du point de puissance maximale MPPT :

IV.8.1/Introduction :

Le branchement d'une charge à un générateur photovoltaïque est le mode de couplage le plus simple qui soit. Le point de fonctionnement dans ce cas se situe à l'intersection de la droite de charge et de la caractéristique I-V du générateur. Ce point ne peut pas coïncider avec le point de puissance maximale, il s'ensuit une perte de puissance maximale du système.

Ce problème peut être résolu soit par le changement de configuration du générateur photovoltaïque, soit par l'adjonction d'un dispositif de recherche de point de puissance maximale placé entre le générateur et la charge pour assurer l'adaptation d'impédance. L'exploitation optimale de l'énergie électrique disponible aux bornes du générateur photovoltaïque peut contribuer à la réduction du coût global du système. Il existe plusieurs techniques pour satisfaire ce but. [28]

IV.8.2/Principe de MPPT :

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et l'éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{mpp} , I_{mpp}).

L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC/DC comme représenté sur la (Figure (4-18)).

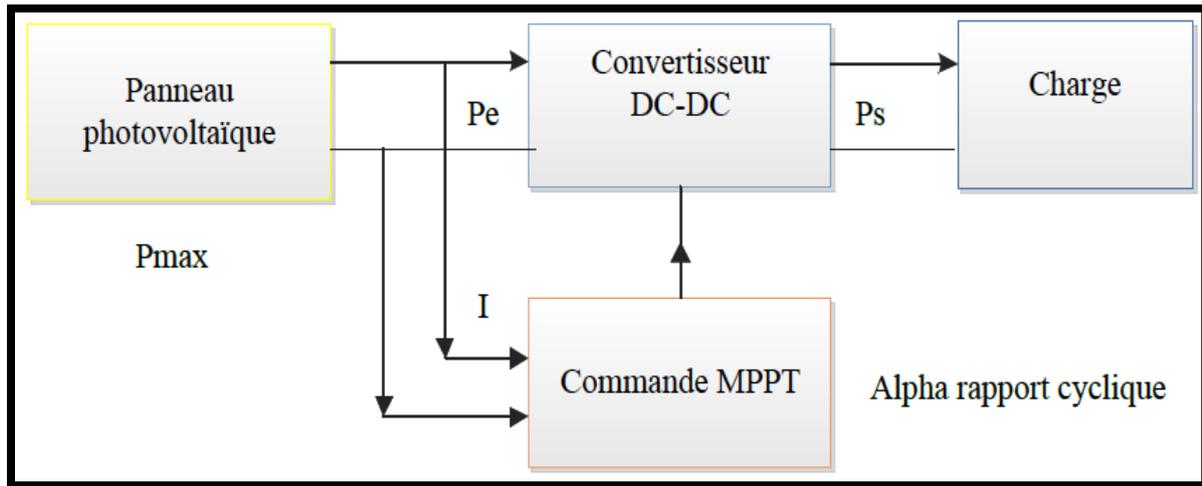


Figure (4-18) : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.

IV.9/Les systèmes photovoltaïques :

On ne peut pas considérer les modules photovoltaïques comme simples générateurs d'énergie électrique en remplacement d'un réseau, mais associer étroitement ces modules à un système complet pour une application bien spécifique correspondant à un besoin défini.

Les systèmes photovoltaïques les plus couramment utilisés sont de deux types :

IV.9.1/ Les systèmes photovoltaïques avec stockage électrique :

Batterie d'accumulateurs électrochimiques, ceux-ci alimentent des appareils d'utilisation :

- soit directement en courant continu.
- soit en courant alternatif par l'intermédiaire d'un convertisseur continu-alternatif (onduleur).

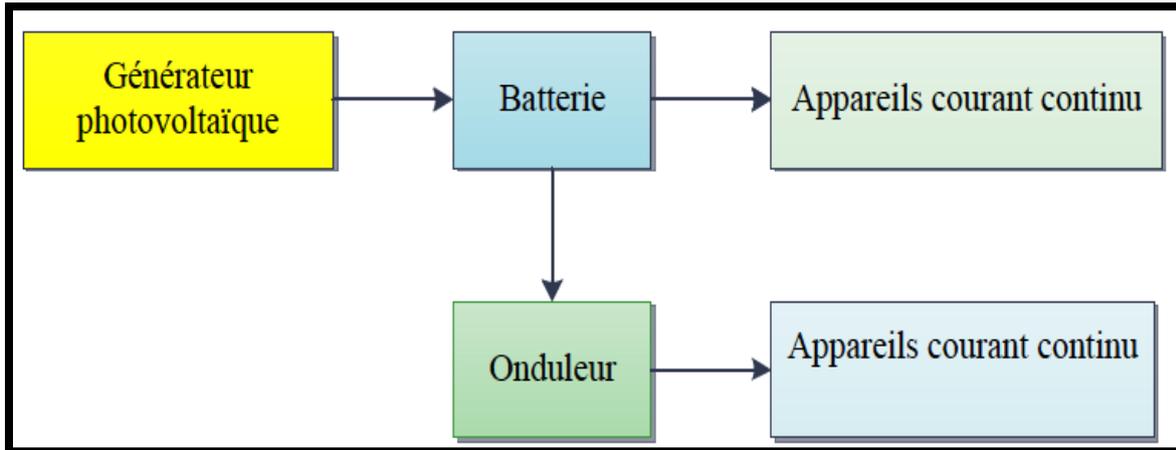


Figure (4-19) : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec stockage.

IV.9.2/ Les systèmes à couplage direct sans batterie :

(Fonctionnement dit aussi < au fil du soleil >).

Les appareils d'utilisation sont branchés soit directement sur le générateur solaire, soit, éventuellement, par l'intermédiaire d'un convertisseur continu-continu, adaptateur d'impédance.

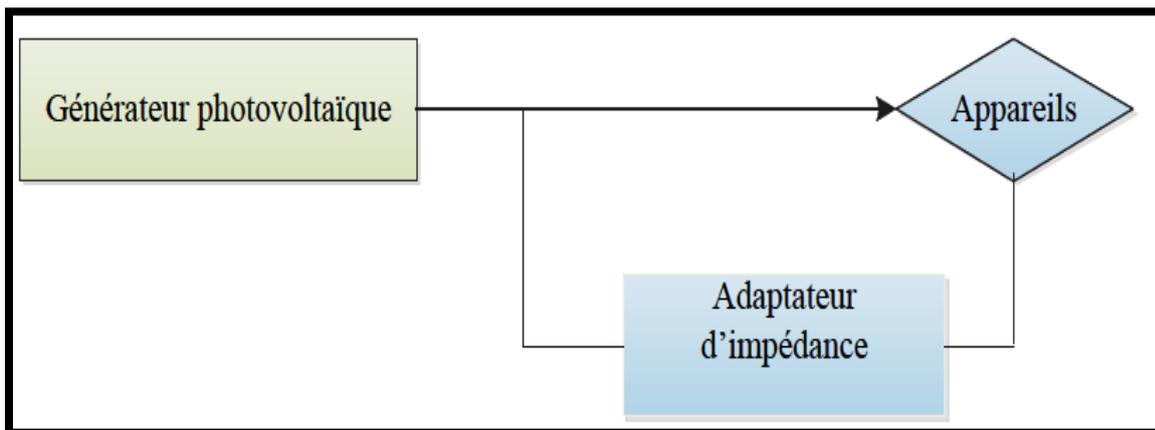


Figure (4-20) : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque à couplage direct.

Pour les systèmes sans batterie, il y a possibilité d'avoir recours à un stockage mais qui ne sera pas sous forme électrochimique.

Exemple :

- pompage \Leftrightarrow stockage par réservoir d'eau.
- Réfrigération \Leftrightarrow stockage de froid.

Le choix de tel ou tel système se fera en fonction de différents critères : simplicité, application, environnement, etc.

Toutefois l'étude de systèmes photovoltaïques se ramène à l'étude de l'adaptation de la charge constituée, soit d'une batterie, d'une charge quelconque par rapport à l'ensemble des modules solaires.

Comme il est vu précédemment, on recherchera à optimiser le système pour avoir le meilleur rendement d'adaptation du système (rapport de l'énergie électrique fournie à l'utilisation à l'énergie électrique qu'aurait pu fournir le générateur fonctionnant toujours à son point de puissance maximum).

Un système photovoltaïque est donc constitué du générateur, et des charges à alimenter. Ces charges sont de type courant continu ou courant alternatif.

Les diverses composantes d'un système photovoltaïque sont représentées symboliquement sur le schéma généralisé dans la (Figure (4-21)) ci-dessous.

Cette représentation synoptique recouvre à peu près tous les cas de (Figure (4-19)) mais il est bien certain qu'un système photovoltaïque ne comporte en général qu'un certain nombre des éléments représentés ici.

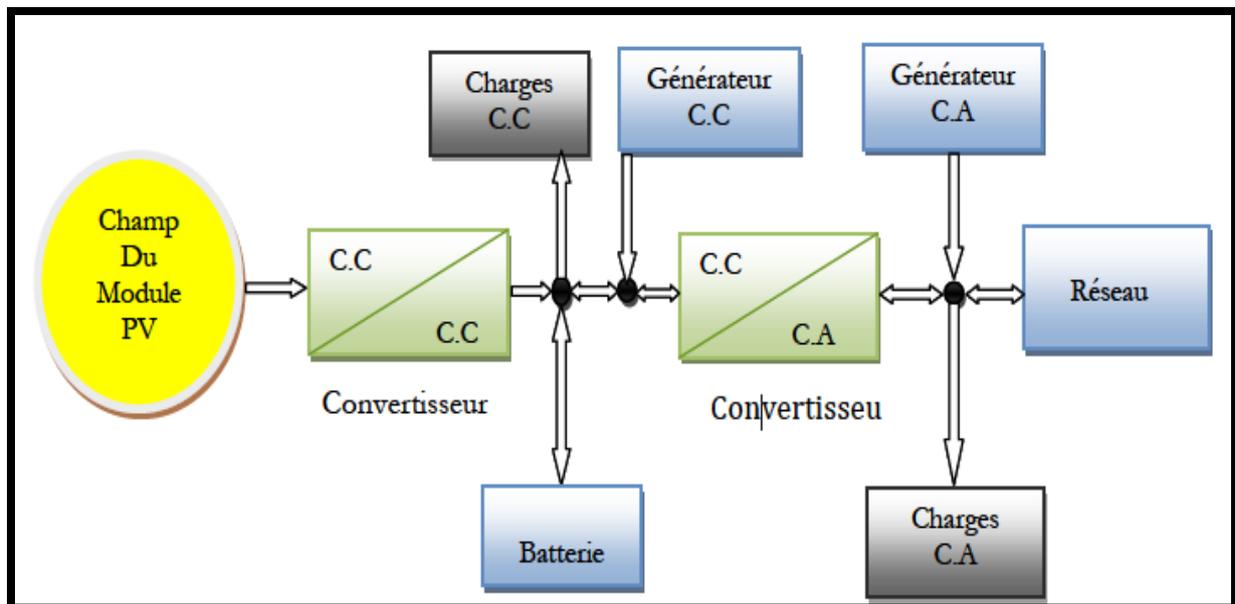


Figure (4-21) : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque.

IV.10/Secteurs d'application :

- ✓ **Domaine spatial :** c'est de loin le secteur le plus ancien puisque les premières utilisations de cellules solaires pour des engins spatiaux (satellites, navettes,...) remontent aux années soixante.
- ✓ **Télécommunications :** Téléphonie rurale, radiotéléphonie,...
- ✓ **Sites isolés :** Parcs nationaux, service des eaux et forêts, régions isolées, pays en voie de développement. Pompage de l'eau, irrigation, domiciles, villages ...
- ✓ **Acquisition de données :** L'énergie photovoltaïque joue un rôle très important pour les stations isolées d'acquisition de données, vu la haute fiabilité de fonctionnement, l'autonomie, la moindre sensibilité à la foudre, la résistance extrême aux conditions naturelles, la maintenance légère et la longévité des équipements (25 ans).

Domaine du transport : Lampadaires, panneaux à messages variables, éclairage de panneaux, signalisation lumineuse routière et ferroviaire. [1]

IV.11/Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté : les caractéristiques des panneaux photovoltaïques, ainsi que les différents éléments des systèmes photovoltaïques : les batteries, les régulateurs, les convertisseurs et le MPPT. Et enfin on à présenté les différentes systèmes photovoltaïques.

***Chapitre V :
Dimensionnement
d'une station
solaire.***

V.1/Introduction :

Le dimensionnement d'un générateur PV a pour but de déterminer l'optimum technico-économique entre la puissance crête du champ de panneaux solaires et la capacité de batterie associée à partir des besoins électriques de l'utilisateur d'une part, des données d'ensoleillement du site d'autre part et du prix et de la qualité des composants dont on peut disposer sur le marché.

La détermination de la taille des composants doit permettre de garantir une fourniture d'énergie tout au long de l'année ou éventuellement sur une période déterminée.

Le dimensionnement d'un système photovoltaïque suit une démarche par étapes que l'on peut résumer comme suit:

- ❖ **Etape1:** Détermination des besoins de l'utilisateur;
 - Puissance des appareils,
 - Durée d'utilisation,
 - Tension.

- ❖ **Etape2:** Energie solaire récupérable selon l'emplacement et la situation géographique;

- ❖ **Etape3:** Dimensionnement du générateur solaire;
 - Tension de fonctionnement,
 - Puissance crête à installer.

- ❖ **Etape4:** Définition de la capacité de la batterie;

- ❖ **Etape5:** Dimensionnement du régulateur.

- ❖ **Etape6:** Choix des câbles.

V.2/Détermination des besoins de l'utilisateur(Etape1):

Avant de calculer l'énergie nécessaire à une application, il faut bien rappeler la différence entre la puissance et l'énergie. La puissance est une donnée instantanée.

Exemple:

- Cette lampe consomme 20W en ce moment;
- cet ordinateur consomme 40W en ce moment;

Quant à l'énergie, c'est une donnée intégrée sur une période de temps.

Exemple:

- Mon compteur électrique indique que j'ai consommé 550kWh en un mois.

Ces deux grandeurs (énergie et puissance) sont donc reliées par le temps. L'énergie est le produit de la puissance par le temps $E \text{ (kWh)} = P \text{ (kW)} * t \text{ (h)}$.

Comme un système photovoltaïque fournit son énergie le jour, il est naturel de prendre la période de 24 heures comme unité de temps.

Pratiquement, on peut se servir du tableau suivant:

Appareils	nombre	Puissances	Durées d'utilisation par jours	Consommations journalières
Lampe	02	15 Watts	04 heures	120 Wh
Total			

Tableau (5-1) : Grille de calcul des consommations en énergie. [1]

V.3/Energie solaire récupérable (Etape2):

La position des modules photovoltaïques par rapport au soleil influe directement sur leur production énergétique. Il est très important de bien les placer pour capter le maximum d'irradiation solaire.

On appelle orientation le point cardinal vers lequel est tournée la face active du panneau (Sud, Nord, Sud-ouest...).

Quant à l'inclinaison, elle indique l'angle que fait le panneau avec le plan horizontal, elle se compte en degrés.

V.3.1/Données d'enseillement :

Les données d'enseillement pour une région déterminée sont généralement disponibles mois par mois dans les atlas solaires et correspondent à l'irradiation globale quotidienne moyenne sur un plan horizontal. Les unités sont exprimées soit en cal/cm^2 ou *Langleys*, soit en kWh/m^2 sachant que :

$$1 \text{ cal/cm}^2 = 11,62 \text{ Wh/m}^2$$

Les valeurs de l'enseillement sont évidemment fonction de la latitude mais aussi des conditions climatiques locales et des masques naturels ou artificiels.

Pour déterminer l'énergie incidente heure par heure et mois par mois sur le plan des panneaux, on effectue le calcul de « Gisement Solaire » à partir des données d'enseillement sur un plan horizontal et de l'inclinaison donnée aux panneaux solaires.

Si les panneaux doivent rester fixes, l'inclinaison et l'orientation optimales sont déterminées en fonction de la saisonnalité de la demande, de l'irradiation correspondante et de la capacité correspondante des batteries de stockage.

V.4/Dimensionnement du générateur solaire (Etape3) :

A déterminer: Puissance crête en Wc.

Données:

P: Puissance des équipements en watts;

t: Durée d'utilisation par jour en heures;

Ens: Ensoleillement du site d'installation (en $\text{kWh/m}^2.\text{j}$).

K : Facteur de conversion appliqué pour tenir compte de différentes pertes (modules, batteries, convertisseur).

Déterminé expérimentalement, ce facteur de conversion a pour valeur en général 0,6 (sans unité).

La formule de base pour la détermination de la puissance crête nécessaire pour un système photovoltaïque à courant continu est donnée comme suit:

$$P_c \text{ (en Wc)} = [E_j \text{ (en Wh/j)} \times (1\text{kW/m}^2)] / [E_{ns} \text{ (en kWh/m}^2\text{.j)} \times K]$$

N.B. Il faut tenir compte du rendement de l'onduleur pour les systèmes à courant alternatif:

$$P_c \text{ (courant alternatif)} = P_c \text{ (courant continu)} / \text{Rendement onduleur.}$$

V.5/ Définition de la capacité de la batterie(Etape4) :

A déterminer:

Capacité des batteries (Cs) en Ampère heure (Ah)

Données:

P: Puissance des équipements en watts;

t: Durée d'utilisation par jour en heures;

U_{batt} : Tension batterie en volts;

b: Profondeur de décharge ~ 0.6 à 0,7;

N: Autonomie désirée en jour.

Pour une charge donnée, la capacité de stockage s'obtient selon la formule suivante:

$$C_s = P(w) \times t(h) \times N / (U_{batt} \times b)$$

N.B. Il faut tenir compte du rendement de l'onduleur pour les systèmes à courant alternatif:

$$C_s \text{ (courant alternatif)} = C_s \text{ (courant continu)} / \text{Rendement onduleur.}$$

(Rendement onduleur ~ 0.8 à 0,9).

V.6/ Dimensionnement du régulateur (Etape5) :

Avant de dimensionner un régulateur, on devra décider quel type doit être installé et les options nécessaires.

Une fois la meilleure technologie identifiée, le régulateur sera dimensionné d'après les paramètres suivants (indispensables) : tension, courant d'entrée et courant de sortie.

V.7/Choix des câbles (Etape6):

Dans un système photovoltaïque, les câbles doivent être soigneusement choisis pour éviter des pertes de puissance trop importantes.

Les principaux critères de choix de câblage sont:

- ✓ Résistance aux rayons solaires forts (U.V) et aux intempéries.
- ✓ Section des câbles afin d'éviter une chute de tension importante (meilleur rendement du système).
- ✓ Le diamètre des câbles pour un système photovoltaïque à courant continu est plus important qu'un système à courant alternatif.

Dimensionnement de la section du câble:

A déterminer: Section du câble S_{min} en mm^2 .

Données:

L: Longueur d'un seul fil du câble en m;

K: Conductivité du cuivre = 58 Am/Vmm^2 ;

ΔU_{\max} : Chute de tension maximale tolérée en volts,

I_{\max} : Courant maximal en Ampères.

La formule de base pour la détermination de la section du câble pour un système photovoltaïque à courant continu est donnée comme suit:

$$S_{\min} = 2 \times L \times I_{\max} / K \times \Delta U_{\max}$$

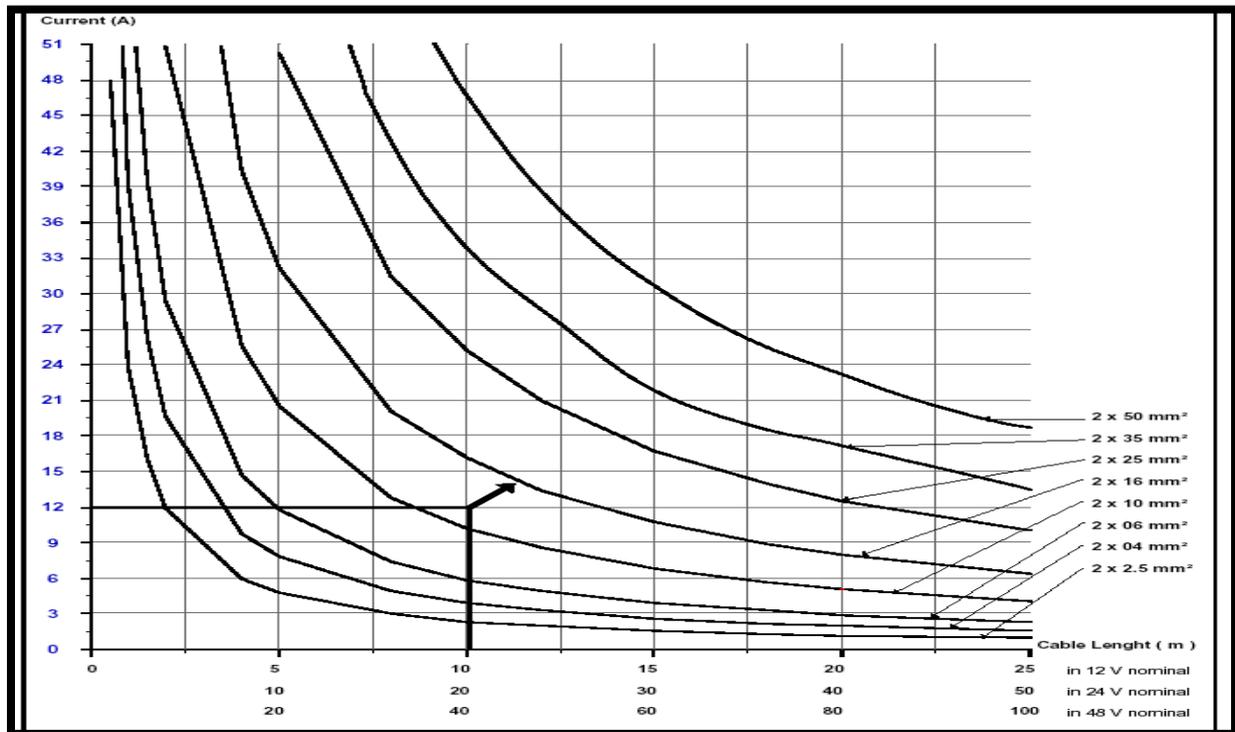


Figure (5-1) : Détermination des sections de câble en courant continu. [22]

V.8/Principe de calcul :

A partir des données fournies par l'utilisateur, on détermine l'énergie annuelle qui lui est nécessaire et l'énergie journalière moyenne (W_U) consommée.

On fait comme première hypothèse qu'en moyenne, sur une année, l'énergie journalière fournie par le champ de panneaux solaires (W_S) doit être au moins égale, à un coefficient correctif (K) près, à l'énergie journalière moyenne consommée par l'utilisation (W_U).

Pour déterminer l'énergie quotidienne moyenne incidente dans le plan des modules, on effectue le calcul dans «Gisement Solaire» à partir des données d'ensoleillement sur un plan horizontal et de l'inclinaison donnée aux modules à l'aide du programme de calcul de l'apport solaire passif tenant compte des masques.

Dans le cas d'un système avec stockage par batterie, la méthode proposée est de comparer les Ah/ jour consommés par l'utilisation avec les Ah/jour fournis par les panneaux solaires dans des conditions d'ensoleillement et de température bien définies. Cette méthode permet de s'affranchir de la tension qui dépend de l'état de charge de la batterie et de la température.

En été, l'énergie moyenne fournie par le panneau est supérieure à l'énergie consommée : la batterie se charge. En hiver, l'énergie moyenne fournie par le panneau est inférieure à l'énergie consommée: la batterie se décharge.

K : coefficient correctif de l'installation,

$$W_U \leq K W_S$$

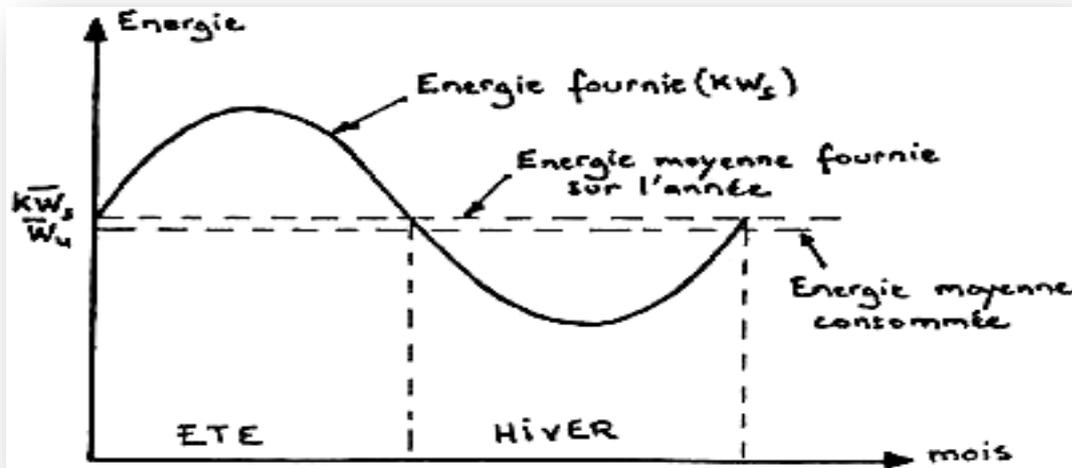


Figure (5-2) : Evaluation de la consommation journalière.

V.8.1/Coefficient correctif (K) :

Pour déterminer l'énergie nette disponible à la sortie de la batterie, il faut faire intervenir le coefficient correctif global (K) qui tient compte :

De l'incertitude météorologique (de l'ordre de $\pm 10\%$) ;

De l'encrassement des modules dans le temps (de l'ordre de 5%) ;

De l'intégrale de la traversée du vitrage du module sous tous les angles (de l'ordre de 5%) ;

Du vieillissement des modules (de l'ordre de 5%) ;

De la dispersion des caractéristiques des modules lorsqu'ils sont montés en série (de l'ordre de 5%) ;

Du rendement faradique de la batterie (perte de l'ordre de 10%).

La prise en compte de tous ces paramètres amène un coefficient correctif global (K) compris entre 0,65 et 0,75. Retenons pour l'instant la valeur de 0,70.

V.8.2/Calcul de la puissance module requise :

La détermination de la puissance crête du champ de panneaux revient à déterminer le nombre total de modules c'est-à-dire le nombre connecté en série multiplié par le nombre de branches en parallèle.

Le nombre de modules en série est connu dès lors que la tension de l'utilisation est spécifiée.

Le nombre de branches parallèles peut être rapidement déterminé par un calcul simple.

Si l'irradiante est donnée en *Langleys*, il est commode de multiplier l'irradiation en $\text{cal}/\text{cm}^2/\text{j}$ par le facteur 0,0116 pour convertir l'énergie incidente totale reçue sur une journée en un nombre d'heures d'ensoleillement équivalent à $1 \text{ kW}/\text{m}^2$. En effet, la puissance d'un module exprimée en W_c est donnée pour un ensoleillement de $1 \text{ kW}/\text{m}^2$ (Puissance STC). Ainsi, en première approximation, la production journalière d'énergie (en Ah/j) pour une branche est

obtenue en multipliant le courant de module I_{pmax} par le nombre d'heures (h) d'ensoleillement équivalent à 1 kW/m^2 . En fait, nous avons vu en TD que les conditions STC de mesure de la puissance crête d'un module (1 kW/m^2 à une température de cellules de 25°C) sont irréalistes; si elle sont données par le constructeur, il vaut mieux prendre les valeurs à la NOCT (TUC), et après avoir vérifié que la tension V_{pnoct} est toujours supérieure à la tension requise pour la fin de charge de batterie : $15,1 \text{ V}$, on peut prendre la valeur I_{pnoct} à condition de la multiplier par le nombre d'heures d'ensoleillement équivalent à 800 W/m^2 .

Si la consommation journalière de la charge (en Ah/j) doit être satisfaite tout au long de l'année, on somme sur l'année les productions journalières d'énergie obtenues. Le nombre de branches en parallèle est obtenu simplement, au coefficient K correctif près, en divisant la consommation annuelle de l'utilisation (en Ah/j) par la production annuelle (en Ah/j) délivrée par une branche.

L'inclinaison optimale du champ de module est d'abord fixée par la minimisation du nombre de branches parallèles nécessaires. Elle est en général proche de la latitude -10° .

V.8.3/Calcul de la capacité de batterie requise :

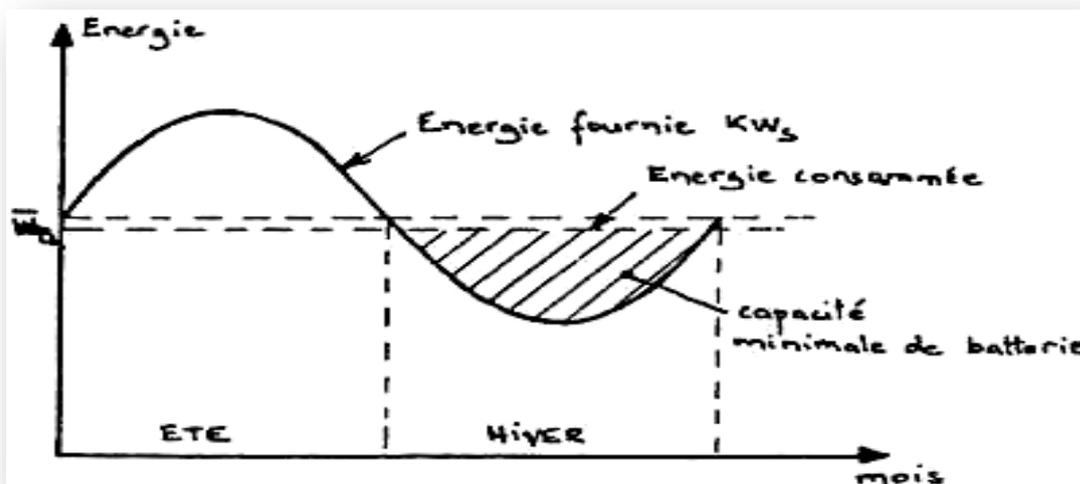


Figure (5-3) : Stockage saisonnier de la batterie.

Si le besoin est permanent sur l'année et qu'il y a un déficit hivernal, le programme de dimensionnement prendra directement en compte la capacité correspondante minimale des batteries de stockage.

V.8.4/Calcul économique :

On fait alors un premier calcul de coût prenant en compte : Coût modules, Coût installation modules, Coût batteries, Coût installation batteries, Coût régulateur de charge, puis on corrige l'orientation des modules jusqu'à minimiser le déficit.

Si le déficit reste tel qu'il nécessite encore un parc de batteries important et donc coûteux, on augmentera le nombre de modules, quitte à générer une forte surproduction en été, jusqu'à l'obtention d'un minimum pour le coût global de l'installation.

V.9/Etude d'un cas (avec le logiciel PVsyst):

PVSYST V5.31		11/06/15		Page 1/4	
Système isolé avec batteries: Paramètres de simulation					
Projet :	Maison				
Site géographique	Alger		Pays	Algeria	
Situation	Latitude	36.3°N	Longitude	2.6°E	
Temps défini comme	Temps légal	Fus. horaire TU+0	Altitude	5 m	
	Albédo	0.20			
Données météo :	Alger, Données horaires synthétiques				
Variante de simulation :Nouvelle variante de simulation					
	Date de la simulation	11/06/15 à 05h49			
Paramètres de simulation					
Orientation plan capteurs	Inclinaison	30°	Azimut	0°	
Caractéristiques du champ de capteurs					
Module PV	SI-mono	Modèle	D5-A1-100		
		Fabricant	Anji Dasol Solar		
Nombre de modules PV		En série	2 modules	En parallèle	4 chaînes
Nombre total de modules PV		Nbre modules	8	Puissance unitaire	100 Wc
Puissance globale du champ		Nominale (STC)	800 Wc	Aux cond. de fonct.	713 Wc (50°C)
Caractéristiques de fonct. du champ (50°C)		U mpp	30 V	I mpp	24 A
Surface totale		Surface modules	5.1 m²		
Facteurs de perte du champ PV					
Fact. de pertes thermiques	Uc (const)	20.0 W/m²K	Uv (vent)	0.0 W/m²K / m/s	
=> Tempér. de fonct. nominale (G=800 W/m², Tamb=20°C, VIL vent = 1m/s.)			NOCT	56 °C	
Perte ohmique de câblage	Rés. globale champ	22 mOhm	Frac. pertes	1.5 % aux STC	
Perte de qualité module			Frac. pertes	2.5 %	
Perte de "mismatch" modules			Frac. pertes	4.0 % (tension fixée)	
Effet d'incidence, paramétrisation ASHRAE	IAM =	1 - bo (1/cos I - 1)	Paramètre bo	0.05	
Paramètres du système					
	Type de système	Système isolé avec batteries			
Batterie	Modèle	Dural 5C			
	Fabricant	Electrona			
Caractéristiques du banc de batteries	Tension	24 V	Capacité nominale	450 Ah	
	Nombre d'unités	2 en série x 3 en parallèle			
	Température	Fixée (20°C)			
Régulateur	Modèle	General Purpose Default			
	Technologie	Undefined	Coeff. de temp.	-5.0 mV/°C/elem.	
Seuils de régulation batterie	Charge	27.4/26.2 V	Décharge	23.5/25.2 V	
	Commande génératrice d'appoint	23.6/25.8 V			
Besoins de l'utilisateur :	Consomm. domestique moyenne	Constants sur l'année 2.4 kWh/Jour			

PVSYST V5.31		11/08/15	Page 2/4
--------------	--	----------	----------

Système isolé avec batteries: Besoins de l'utilisateur

Projet : **Maison**

Variante de simulation : Nouvelle variante de simulation

Principaux paramètres système	Type de système	Isolé avec batteries		
Orientation plan capteurs	Inclinaison	30°	azimut	0°
Champ PV	Nombre de modules	8	Prom total	800 Wc
Batterie	Modèle	Dural SC	Technologie	ouverte, tubulaire
batteries	Nombre d'unités	6	Tension / Capacité	24 V / 450 Ah
Besoins de l'utilisateur	Consomm. domestique	Constants sur l'année	global	871 kWh/an

Consomm. domestique, Constants sur l'année, moyenne = 2.4 kWh/jr

Valeurs annuelles

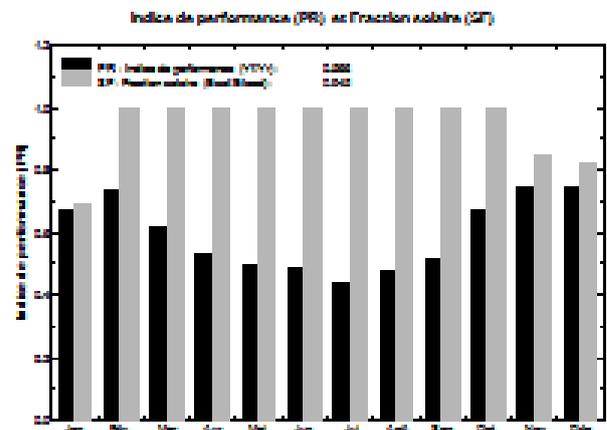
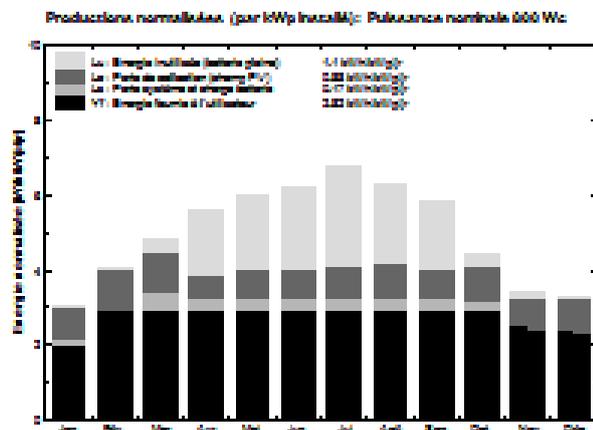
	Nombre	Puissance	Utilisation	Energie
Lampes fluorescentes	4	18 W/lampe	5 h/jour	360 Wh/jour
TV / Magnétoscope / PC	1	75 W/app	3 h/jour	225 Wh/jour
Frigido / Congélateur	1		600 Wh/jour	600 Wh/jour
Machines à laver / linge/vaisselle	1		1200 Wh/jour	1200 Wh/jour
Energie journalière totale				2385 Wh/jour

Système isolé avec batteries: Résultats principaux

Projet : Maison
Variante de simulation : Nouvelle variante de simulation

Principaux paramètres système	Type de système	Isolé avec batteries		
Orientation plan capteurs	Inclinaison	30°	azimut	0°
Champ PV	Nombre de modules	8	Pnom total	800 Wc
Batterie	Modèle	Dural SC	Technologie	ouverte, tubulaire
batteries	Nombre d'unités	6	Tension / Capacité	24 V / 450 Ah
Besoins de l'utilisateur	Consomm. domestique	Constants sur l'année global 871 kWh/an		

Principaux résultats de la simulation				
Production du système	Energie disponible	1195 kWh/an	Productible	1493 kWh/kWc/an
	Energie utilisée	823 kWh/an	En excès (Inutilisée)	322 kWh/an
	Indice de performance (PR)	56.6 %	Fraction solaire (SF)	94.5 %
Besoins non satisfaits	Fraction du temps	5.5 %	Energie manquante	47 kWh



Nouvelle variante de simulation
Bilans et résultats principaux

	GlobHor	GlobEff	E Avail	E Uséed	E Max	E User	E Load	SolFrac
	kWh/m²	kWh/m²	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	
Janvier	65.0	91.3	23.9	0.09	23.27	20.67	73.94	0.682
Février	65.0	109.7	65.9	0.04	0.00	66.76	66.76	1.000
Mars	127.0	145.5	91.5	7.61	0.00	73.94	73.94	1.000
Avril	161.0	169.4	119.4	41.70	0.00	71.52	71.52	1.000
Mai	199.0	190.4	129.2	48.27	0.00	73.94	73.94	1.000
Juin	204.0	190.4	130.9	22.77	0.00	71.52	71.52	1.000
Juillet	227.0	209.9	147.4	66.52	0.00	73.94	73.94	1.000
Août	199.0	199.9	139.1	22.41	0.00	73.94	73.94	1.000
Septembre	129.0	169.1	120.4	42.76	0.00	71.52	71.52	1.000
Octobre	107.0	139.4	95.1	6.60	0.00	73.94	73.94	1.000
Novembre	71.0	99.2	60.0	2.99	10.90	60.79	71.52	0.849
Décembre	65.0	99.9	29.0	0.04	19.40	60.23	73.94	0.819
Année	1624.0	1762.9	1194.7	202.00	-7.49	692.03	670.23	0.942

Légendes:

GlobHor	Irradiation globale horizontale	E Max	Energie manquante
GlobEff	Global "effectif", corr. pour kWh arborages	E User	Energie fournie à l'utilisateur
E Avail	Energie solaire disponible	E Load	Besoin d'énergie de l'utilisateur
E Uséed	Energie inutilisée (batterie chargée)	SolFrac	Fraction solaire (Celle / Besoin)

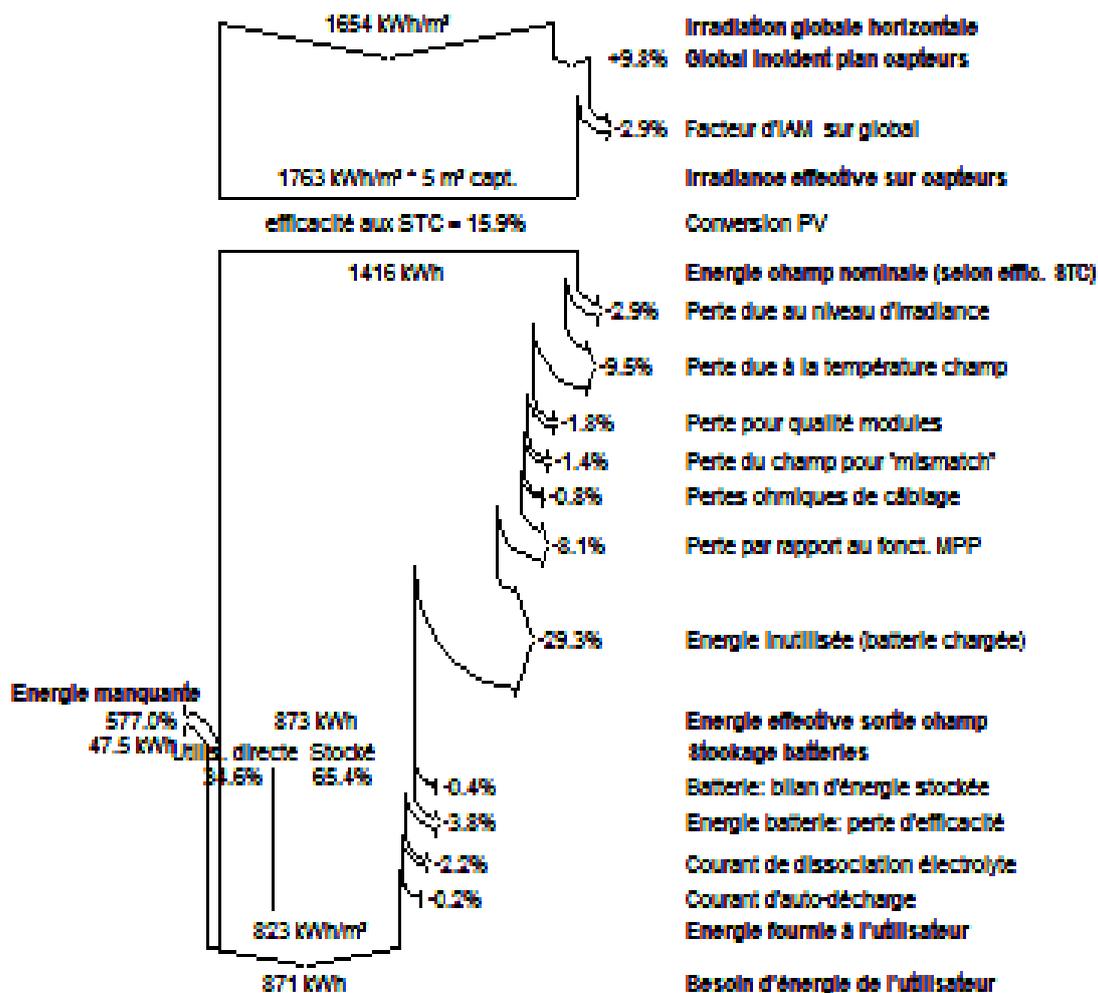
Système isolé avec batteries: Diagramme des pertes

Projet : **Maison**

Variante de simulation : **Nouvelle variante de simulation**

Principaux paramètres système	Type de système	Isolé avec batteries		
Orientation plan capteurs	Inclinaison	30°	azimut	0°
Champ PV	Nombre de modules	8	Prom total	800 Wc
Batterie	Modèle	Dural SC	Technologie	verte, tubulaire
batteries	Nombre d'unités	6	Tension / Capacité	24 V / 450 Ah
Besoins de l'utilisateur	Consomm. domestique	Constante sur l'année	global	871 kWh/an

Diagramme des pertes sur l'année entière



V.9/Avantages et inconvénients de l'énergie solaire :

Les systèmes photovoltaïques présentent un grand nombre d'avantages et d'inconvénients qui sont :

V.9.1/Avantages:

Les systèmes photovoltaïques ont plusieurs avantages:

- ils sont non polluants sans émissions ou odeurs discernables.
- ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sûrement, sans surveillance pendant de longues périodes.
- ils n'ont besoin d'aucun raccordement à une autre source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant.
- ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.
- ils peuvent résister à des conditions atmosphériques pénibles comme la neige et la glace.
- ils ne consomment aucun combustible fossile et leur carburant est abondant et libre.
- une haute fiabilité car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées, d'où son utilisation sur les engins spatiaux.
- le système modulaire de panneaux photovoltaïques permet un montage adaptable à des besoins énergétiques variés ; les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications allant du milliwatt au mégawatt.
- la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologiques car le produit est non polluant, silencieux, et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- ils ont une longue durée de vie.
- les frais et les risques de transport des énergies fossiles sont éliminés.

V.9.2/ Inconvénients :

- La fabrication des modules photovoltaïques relève de la haute technologie, ce qui rend le coût très élevé.
- Le rendement réel d'un module photovoltaïque est de l'ordre de 10 à 15 %, ils sont tributaires des conditions météorologiques.
- L'énergie issue du générateur photovoltaïque est continue et de faible voltage (< à 30 V), donc il doit être transformé par l'intermédiaire d'un onduleur.
- Beaucoup d'appareils vendus sur le marché fonctionnent avec du 230 V alternatif.

V.10/Conclusion :

Pour dimensionner une batterie :

1. Déterminez le nombre d'éléments actifs présents sur votre installation.
2. Déterminez leur consommation.
3. Définissez leur durée d'utilisation par jour.
4. Calculez l'énergie totale par jour.
5. Choisissez le type de batterie que vous souhaitez installer afin de définir votre facteur de majoration.
6. Définissez le nombre de jour où votre système doit être autonome.
7. Calculez l'énergie totale en prenant compte le limite de votre batterie et la durée d'autonomie désirée.
8. Et calculez la charge de votre batterie.

Pour dimensionner votre générateur solaire :

1. Déterminez le nombre d'éléments actifs présents sur votre installation.
2. Déterminez leur consommation.
3. Définissez leur durée d'utilisation par jour.
4. Calculez l'énergie totale par jour.
5. Majorez ce résultat.
6. Localiser votre installation.
7. Déterminer l'irradiation de votre site.
8. Calculez la puissance théorique de vos cellules photovoltaïques.
9. Et calculez le nombre de panneaux solaire nécessaire.

Pour dimensionner votre régulateur :

1. Dimensionnez vos panneaux solaires.
2. Calculez les courants d'entrée et de sortie de votre régulateur.

Conclusion générale :

Le photovoltaïque est en plein essor, elle permet beaucoup d'avantages pour les systèmes isolés. Le rendement a beaucoup augmenté depuis les débuts du photovoltaïque.

Mais aujourd'hui, les chercheurs se tournent davantage vers l'amélioration de la durée de vie des panneaux solaire.

La simulation a été largement utilisée dans le cadre de ce travail afin d'étudier les paramètres les plus importants pour le fonctionnement des cellules solaires à base de silicium et à base du composé InP, dans le but d'optimiser les paramètres physiques et géométriques de la cellule en vue d'obtenir un rendement maximum.

Du point de vu technologique, Les cellules solaires à base d'InP donnent une tension en circuit ouvert plus grande et un meilleur rendement que les cellules solaires à base de Si. Mais l'InP est plus cher et plus rare que le silicium

Le rendement des cellules solaires à base de silicium reste principalement limité par une faible valeur de FF et une faible valeur d'I_{cc}.

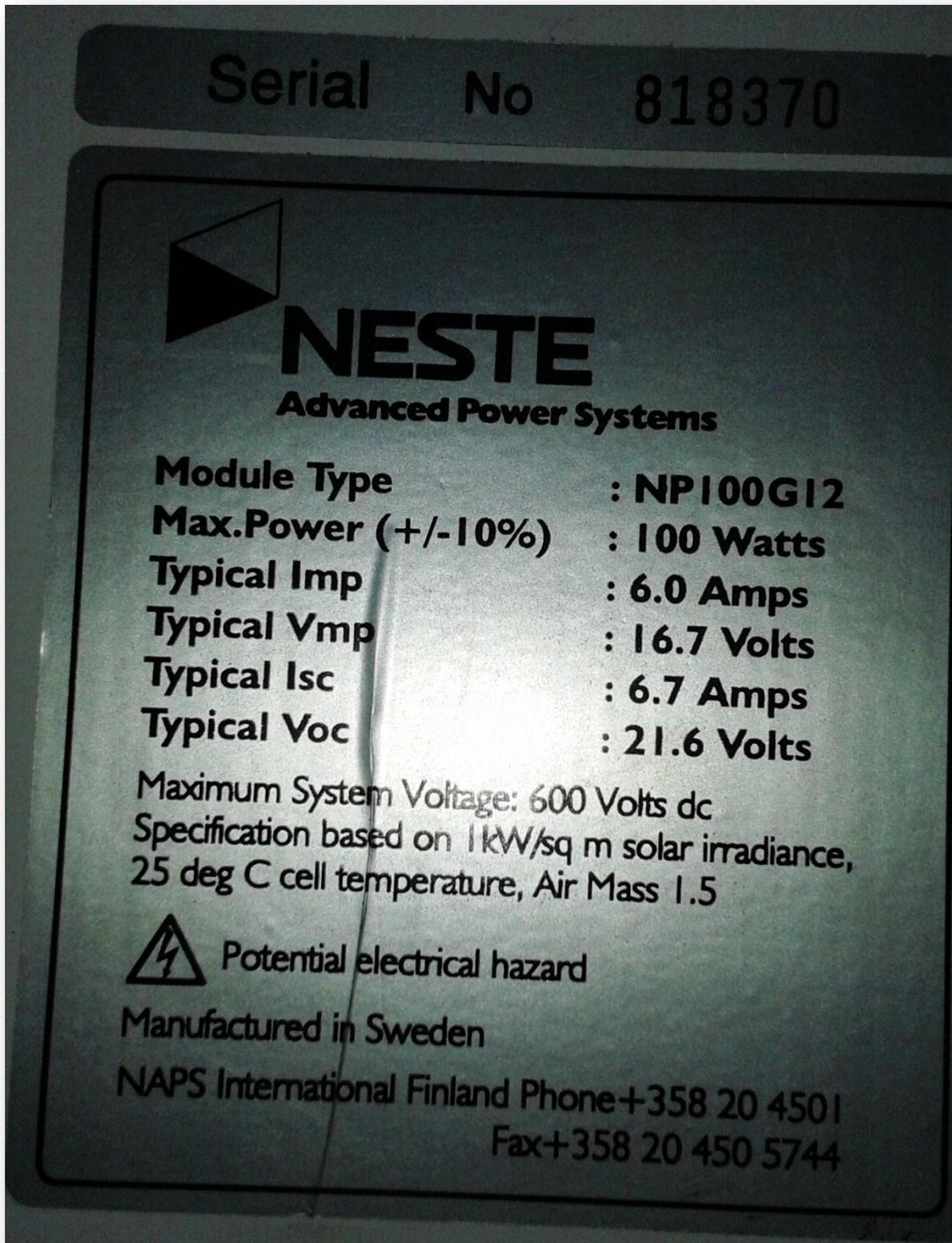
Dans ce travail, nous avons présenté dans le premier chapitre les bases indispensables à la compréhension du fonctionnement physique d'une cellule photovoltaïque. Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales, dans le deuxième chapitre nous avons étudié les différents matériaux utilisés dans les cellules PV, dans le troisième chapitre nous avons étudié l'influence du dopage du substrat et l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement électrique de la cellule photovoltaïque à base de Si et InP, à l'aide du simulateur PC1D dont la structure de cette cellule est n⁺-p-p⁺; Le but de cette étude a été d'optimiser les paramètres géométriques afin d'obtenir un rendement maximum. Nous avons trouvés que le rendement de la cellule étudiée varie de façon monotone avec ces paramètres.

Puis dans le quatrième chapitre nous avons présenté : les caractéristiques des panneaux photovoltaïques, ainsi que les différents éléments des systèmes photovoltaïques : les batteries, les régulateurs, les convertisseurs et le MPPT ; et on à présenté les différentes systèmes photovoltaïques.

Et en fin dans le cinquième chapitre nous avons étudié le dimensionnement d'une station solaire et on a étudié le dimensionnement d'un cas d'une maison isolé.

Annexe :

Etiquette des deux modules qui sont élaborés (en « URMER »):



Les étapes de logiciel « PVsyst » :Définition de projet :

Définitions du Projet et de la version de Simulation

Le projet inclut principalement la définition du SITE géographique et le fichier METEO horaire associé

Désignation du projet

Nom du projet : Maison Date : 11/06/2015

Client : KHEDIM&OULDTALEB Téléphone : 021552542

Adresse : TLEMCCEN Fax : 021552542

Ville : TLEMCCEN Email : karimhad_13@live.fr

Pays : ALGERIE

Veillez définir le lieu géographique et la météo !

Annuler Nouveau projet Charger un projet Site et Météo

Variante du Système

Une version du système comprend tous les paramètres requis pour la simulation, les résultats de la simulation, et éventuellement une évaluation économique. Pour un même projet, vous pouvez construire autant de versions du système que désiré.

N° de Variante : Nouvelle variante de simulation Nouvelle Version

Retour (Calcul)

Les données de la météo :

Projet : Situation et Météo

Lieu Géographique et Météo

Pays : Algeria Site : Alger Meteonorm '97 Ouvrir

Fichier Météo : alger_syn.met : Alger, Données horaires synthétiques Ouvrir ?

Actions spéciales:

Site météo => Site du projet Copier

Site du projet => Fichier météo synthétique Générer

Retour Annuler Suivant

Les paramètres d'entrée :

Paramètres du projet: Albédo pour le site du projet

Valeurs de l'albédo

Valeurs mensuelles

Jan.	0.20	Jui.	0.20
Fév.	0.20	Août	0.20
Mars	0.20	Sep.	0.20
Avr.	0.20	Oct.	0.20
Mai	0.20	Nov.	0.20
Juin	0.20	Déc.	0.20

Définir une valeur commune

Valeur commune: 0.20

Albédo par défaut = 0.2

Valeurs usuelles de l'albédo

Situation urbaine	0.14 - 0.22
Herbe	0.15 - 0.25
Herbe fraîche	0.26
Neige fraîche	0.82
Neige humide	0.55 - 0.75
Asphalte sec	0.09 - 0.15
Asphalte humide	0.18
Béton	0.25 - 0.35
Tuiles rouges	0.33
Aluminium	0.85
Acier galvanisé récent	0.35
Acier galvanisé oxydé	0.08

Site-dependent Design parameters

Reference temperatures for array design by respect to the inverter input voltages

Parameter	Value	Unit	Default
Lower temperature for VmaxAbs limit	-10	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
Winter operating temperature for VmppMax design	20	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
Usual operating temperature under 1000 W/m	50	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
Summer operating temperature for VmppMin design	60	°C	<input checked="" type="checkbox"/>

Default

°C

°C

°C

°C

Situation des modules :

Orientation, Variante "Nouvelle variante de simulation"

Type de champ: Plan incliné fixe

Paramètres du champ

Inclinaison plan: 30.0

Azimut: 0.0

Optimisation par rapport à:

Irradiation annuelle

Été (Avr-Sept)

Hiver (Oct-Mars)

Inclin. 30°

Azimut 0°

Année

FTranspos. = 1.09
Perte/Opt. = -0.1%

Orientation du plan

Besoins d'utilisateurs :

Daily use of Energy, Variant "Nouvelle variante de simulation"

Consumption definition by
 Year
 Seasons 
 Months

Week-end use
 Use only during 7 days in a week

Model

Daily consumptions

Number		Power	Mean Daily use	Daily energy
4	Fluorescent lamps	18 W/lamp	5.0 h/day	360 Wh
1	TV / Magnetoscope / PC	75 W/app.	3.0 h/day	225 Wh
1	Domestic appliances	15 W/app.	0.0 h/day	0 Wh
1	Fridge / Deep-freeze		0.60 kWh/day	600 Wh
1	Dish-washer, Cloth-washer		1.20 kWh/day	1200 Wh
	Other uses	0 W tot	0.0 h/day	0 Wh
	Stand-by consumers	0 W tot	24h/day	0 Wh

Appliances info  Hourly distribution 

Total daily energy 2385 Wh/day
Total monthly energy 71.5 kWh/month

Choix des batteries et des modules :

Stand-alone System definition, Variant "Nouvelle variante de simulation"

Presizing help

Av. daily needs : Enter accepted LOL 5.0 %  Battery (user) voltage 24 V 
 2.4 kWh/day Enter requested autonomy 4 day(s)  Suggested capacity 440 Ah
 Suggested PV power 826 Wp (nom.)

Select battery set

Sort Batteries by voltage capacity manufacturer

12V 150Ah Dural SC Electrona

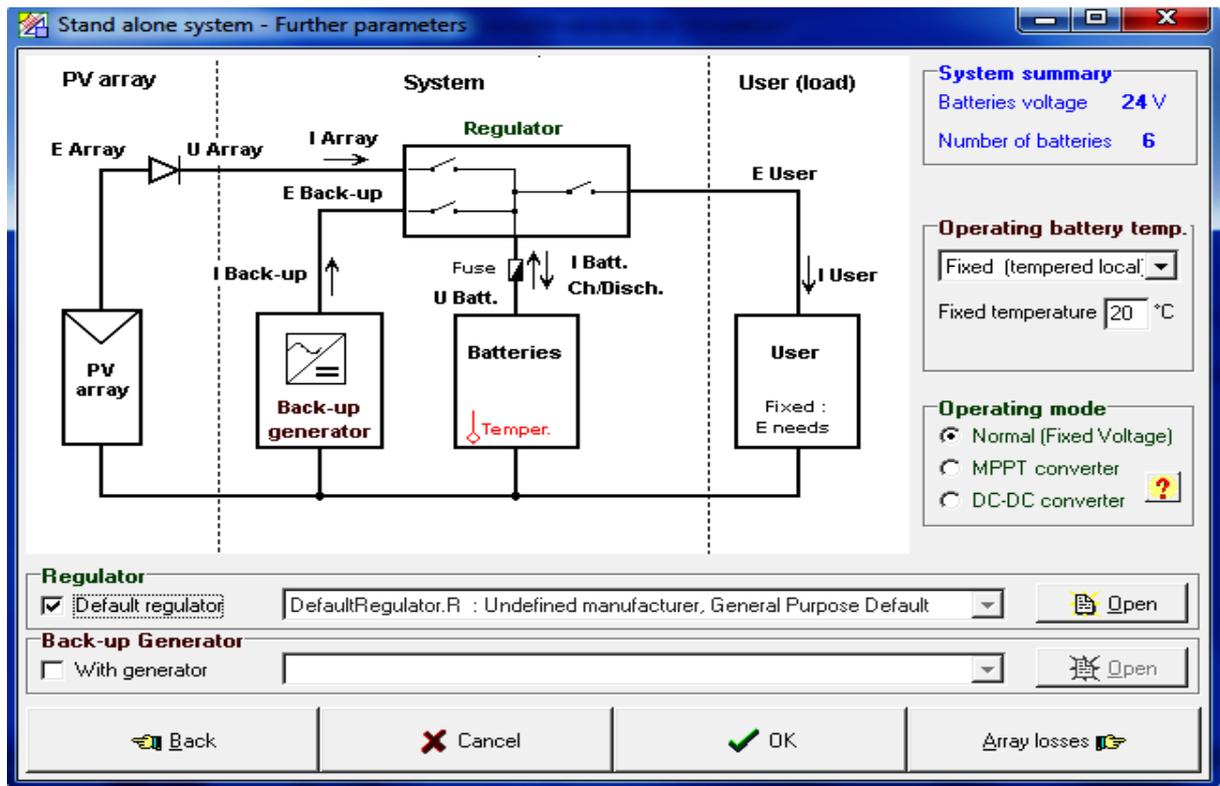
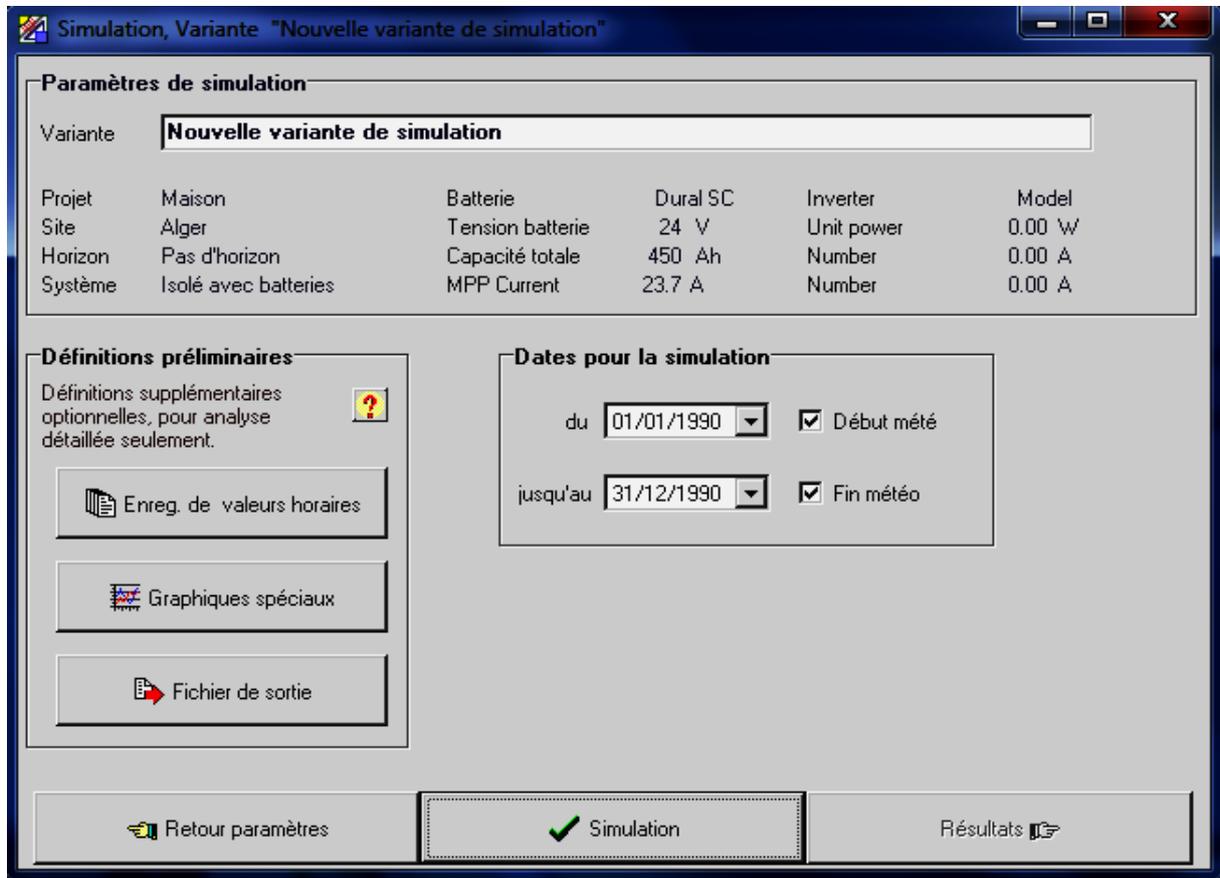
Batteries in serie  Number of batteries 6 Battery pack voltage 24 V
 Batteries in parallel  Global capacity 450 Ah
 Stored energy 10.8 kWh

Select module(s)

Sort modules by: power technology manufacturer Tous les modules

100 Wp 15V Si-mono DS-A1-100 Anji Dasol Solar Photon Maq. 20C

Modules in serie  Please define the regulator ("Next" button) Array voltage at 50°C 30.1 V
 Modules in parallel  Array current 23.6 A
 8 Modules Array nom. power (STC) 800 Wp

Choix de régulateur :**Dernière étape pour simulation :**

Bibliographie:

- [1] Anne Labouret-Michel Villos, Energie solaire photovoltaïque « 3^{ème} édition », DUNOD.
- [2] Alain RICAUD, L'électricité photovoltaïque, document de synthèse 2009.
- [3] P.H. Haumesser, Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, "Elaboration par croissance Czochralski, caractérisation spectroscopique et propriétés laser de monocristaux dopés par l'Ytterbium", 2000.
- [4] Rémi de BETTIGNIES, Thèse de doctorat de l'Université d'Angers, cellules photovoltaïques organiques dérivées de nouveaux systèmes conjugué, 2003.
- [5] Thibaut DESRUES, Thèse de doctorat en science des matériaux de l'INSA-Lyon, "Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière", 2009.
- [6] Zhenqiang Xi, Deren Yang et al, Investigation of texturization for monocrystalline silicon solar cells with different kinds of alkaline, Renewable Energy, 2004, Vol. 29, pp. 2101-2107.
- [7] Nichiporuk Oleksiy, Thèse de doctorat de L'INSA de Lyon, Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités, 2005.
- [8] D.Sera, R.Teodorescu .and P.Rodriguez, " PV panel model on datasheet value " ISIE 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2007, pp.2392-2396.
- [9] T. Eram, P. L. Chapman. "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques", IEEE Transactions On. Energy Conversion, Vol. 22, pp. 439- 449, Jun. 2007.
- [10] Pascal. Pernet « Développement de cellules solaires en Silicium amorphie de type 'n.i.p' sur substrats souples » Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Thèse n° :2303, 2000.
- [11] A.Mefti, H.Mimouni « Evaluation du potentiel énergétique solaire » Bulletin des énergies renouvelables No 2, Décembre 2002.
- [12] - Y. Bakelli « Étude et dimensionnement d'un convertisseur statique pour la connexion d'un générateur photovoltaïque » mémoire de magister, Université de Boumerdes 2005.
- [13] T. Eram, P. L. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques", IEEE Transactions On. Energy Conversion, Vol. 22, pp. 439- 449. Jun. 2007.

Bibliographie

- [14] Cédric CABAL. Thèse "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque". Préparée au Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS. UNIVERSITE TOULOUSE III, 2008.
- [15] Ernst & Young, Etude du développement de l'énergie solaire en Rhone-Alpes, Axenne, décembre 2010.
- [16] M. Anderson, B. Alvesten « 200 W low cost module integrated utility interface for modular photovoltaic energy systems », IECON Proceedings of the 1995 IEEE 21st International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1(1): 572-577, 1995.
- [17] B. Flèche - D. Delagnes, Energie solaire photovoltaïque.doc /juin 07.
- [18] http://www.Photovoltaïque_public_bulletin_electronique/archives/68/463.ml. Histoire des Photopiles nkreich.de/français/3.1.
- [19] [www.editions du moniteur.com](http://www.editions_du_moniteur.com) : Complément technique, Les principes de l'énergie solaire photovoltaïque, Mars/Avril 2008.
- [20] <http://www.photovoltaïque.com/> : solargie.
- [21] Institut national de l'énergie solaire (INES) : <http://www.institutsolaire.com>
- [22] Revues : Systèmes solaires, l'observateur des énergies renouvelables : [www.energies renouvelables.org](http://www.energies_renouvelables.org)
- [23] <http://www.inti.be/ecotopie/solvolt.html> : Extraits du guide des Energies Renouvelables.
- [24] <http://www.ademe.fr>.
- [25] www.BP.solar.fr.
- [26] <http://www.ciele.org/filieres/solairephotovoltaïque.htm> : Centre d'information sur l'énergie et l'environnement.
- [27] <http://www.hespul.org/pvtoitsol.html>.
- [28] <http://www.total-energie.fr>
- [29] <http://www.solarcomlyon.com>
- [30] Contact : l'URMER.

Résumé :

Dans ce mémoire, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension du fonctionnement physique d'une cellule photovoltaïque. Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs caractéristiques principales et les différents matériaux utilisés dans les cellules photovoltaïques.

Et à l'aide du simulateur PC1D dont la structure de cette cellule est n^+-p-p^+ , nous avons étudié l'influence du dopage du substrat et l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement électrique de la cellule photovoltaïque à base de Si et InP; Le but de cette étude a été d'optimiser les paramètres géométriques afin d'obtenir un rendement maximum. Nous avons trouvés que le rendement de la cellule étudiée varie de façon monotone avec ces paramètres.

Puis nous avons présenté : les caractéristiques des panneaux photovoltaïques, ainsi que les différents éléments des systèmes photovoltaïques : les batteries, les régulateurs, les convertisseurs et le MPPT ; et on a présenté les différents systèmes photovoltaïques.

Et en fin nous avons étudié le dimensionnement d'une station solaire et on a étudié le dimensionnement d'un cas d'une maison isolé.

Abstract :

In this brief, we presented the indispensable foundations for the understanding of the physical operation of a photovoltaic cell. We recalled a short primer on solar radiation and its application in the photovoltaic field. We then explained the principle of operation of photovoltaic cells, their main characteristics and the different materials used in photovoltaic cells.

And the simulator using PC1D including the structure of this cell is n^+-p-p^+ , we studied the influence of substrate doping and thickness of the transmitter on the electrical performance of the photovoltaic cell to database if and InP; The purpose of this study was to optimize the geometrical parameters to obtain maximum performance. We found that the performance of the studied cell varies monotonically with these settings. And then we presented: characteristics of photovoltaic panels, as well as the various elements of photovoltaic systems: batteries, regulators, converters and the MPPT; and we at presented different photovoltaic systems.

And in the end we studied the design of a solar station and investigated the sizing of an isolated case of a House.

Mots clés : Panneau, photovoltaïque, cellule, module, solaire.