

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GENIE
MECANIQUE

N° :...../2021.....



FILIERE : GENIE MECANIQUE

OPTION : CONSTRUCTION
MECANIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Réalisé Par:

MESSAOUDI Ismail

BEKHTI Fateh

Intitulé

Modélisation d'un système de production électrique
par la cellule photovoltaïque

Le jury composé de :

MENASRI Nourredine

MCA

Président

AMROUNE Saleh

MCA

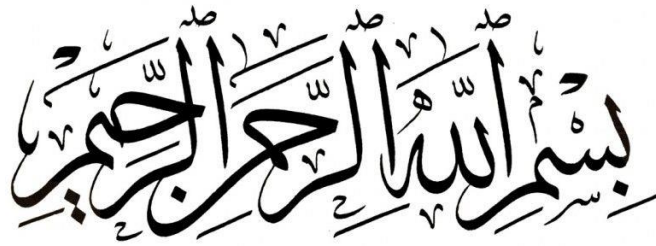
Examineur

AMIRAT Belkacem

MCB

Encadreur

Année universitaire : 2020 / 2021



Dédicaces

Je dédie ce travail :

- ✚ A mon cher père et ma chère mère.*
- ✚ A mes chers frères et sœurs.*
- ✚ A toute ma famille.*
- ✚ A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité.*

Remerciements

Premièrement nous remercies ALLAH pour tout-puissant de nos avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail. Mes remerciements vont en tout premier lieu à de thèse Dr. AMIRAT Belkacem. pour sa rigueur scientifique, sa disponibilité et pour m'avoir accordé sa confiance. J'ai beaucoup appris au cours de cette thèse et je vous en suis extrêmement reconnaissante. J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté à me rencontrer et répondre à mes questions durant mes recherches. Merci pour le temps qu'ils ont bien voulu me consacrer et les aiguillages qu'ils m'ont apportés. À tous ces camarades, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

LISTE DES FIGURES

Liste des figures

Chapitre I : Energies Renouvelables

Figure I.1: l'Energie solaire.....	(3)
Figure I.2 : Photo d'une centrale éolienne.....	(5)
Figure I.3: composition d'une éolienne.....	(6)
Figure I.4: L'énergie hydraulique.....	(8)
Figure I.5: Energie de la biomasse.....	(9)
Figure I.6: Les bicarbonates végétales.....	(12)
Figure I.7: le bioéthanol.....	(12)
Figure I.8: L'énergie géothermique.....	(13)

Chapitre II : Energie Solaire

Figure II.1 : La structure interne du soleil.....	(18)
Figure II.2. Position de la terre dans le système solaire.....	(19)
Figure II.3. Mouvement de la terre autour du soleil.....	(20)
Figure II.4 : Analyse spectrale du rayonnement solaire.....	(21)
Figure II.5 : Types de rayonnement solaire reçus au sol.....	(22)
Figure II.6 : Notion Air Masse.....	(23)
Figure II.7 : Carte l'ensoleillement moyen annuel dans le Monde.....	(23)
Figure II-8 : Différents types d'exploitation d'énergie solaire.....	(24)
Figure II.9 : Types de capteur thermique.....	(25)
Figure II.10 : Principe de fonctionnement de capteur solaire thermique.....	(25)
Figure II.11 : Exemple de concentrateur cylindro-paraboliques.....	(26)
Figure II.12 : Exemple de concentrateur parabolique.....	(27)
Figure II.13: Eléments d'un système photovoltaïque.....	(27)
Figure II.14 : Schéma du transfert de chaleur par conduction.....	(28)

LISTE DES FIGURES

Figure II.15 : Schéma du transfert de chaleur convectif.....	(29)
Figure II.16 : Schéma du transfert de chaleur radiatif.....	(30)

Chapitre III : Panneaux Photovoltaïques

Figure III-1 : La chaîne de fabrication des modules photovoltaïques.....	(35)
Figure III.2: Le principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule Photovoltaïque.....	(36)
Figure III.3 Structure d'un atome et extraction d'un électron par un photon.....	(37)
Figure III.4 Les différentes couches d'une cellule solaire.....	(38)
Figure III.5 Evolution de la production mondiale des différentes technologies de cellules PV.....	(39)
Figure III.6 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série.....	(40)
Figure III.7 Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle.....	(40)
Figure III.8 Caractéristique courant-tension et paramètres physique d'une cellule photovoltaïque.....	(41)
Figure III.9 Caractéristique I(V) et Les différentes zones de fonctionnement d'un module photovoltaïque.....	(42)
Figure III.10 Evolution du PPM d'un module photovoltaïque d'une puissance crête de 80W en fonction de l'éclairement (A) et de la température (B).....	(44)
Figure III.11 Influence de l'éclairement	(45)
Figure III.12 Influence simultanée de l'éclairement et la température.....	(46)
Figure III.13 Groupement des cellules PV en série.....	(47)
Figure III.14 Groupement des cellules en série.....	(47)
Figure III.15 Schématisation d'un GPV élémentaire avec diode by-pass et diode anti-retour.....	(48)
Figure III.16 sable(SiO_2).....	(49)
Figure III.17 Réacteur de réduction.....	(50)
Figure III.18 Lingots de silicium purifiés à 99.99 %	(50)

LISTE DES FIGURES

Figure III.19 Méthode de Czochralski.....	(51)
Figure III.20 Equeutage.....	(52)
Figure III.21 La coup du lingot par une scie à fil.....	(53)
Figure III.22 Schéma du principe de fonctionnement d'une photopile.....	(53)
Figure III.23 Silicium dopé N.....	(54)
Figure III.24 Silicium dopé P.....	(55)
Figure III.25 Jonction P-N dans une cellule photovoltaïque.....	(55)
Figure III.26 Les étapes de fabrication d'une cellule solaire.....	(56)
Figure III.27 Panneau en silicium monocristallin.....	(57)
Figure III.28 Panneau en silicium poly cristallin.....	(58)
Figure III.29 Modules à couche mince.....	(59)

Chapitre IV : Le Pompage Solaire

Figure IV.1 : Pompage photovoltaïque au fil du soleil.....	(70)
Figure IV.2 : Pompage photovoltaïque avec stockage d'énergie.....	(71)
Figure IV.3: Schéma synoptique simplifié de pompage PV.....	(72)
Figure IV.4 : Champ photovoltaïque.....	(73)
Figure IV.5 : Classification des pompes.....	(73)
Figure IV.6 : Schéma d'une pompe centrifuge.....	(74)
Figure IV.7 : Schéma d'une pompe volumétrique.....	(74)
Figure IV.8 : Pompes de surface.....	(75)
Figure IV.9 : Pompe immergée.....	(75)
Figure IV.10 : Moteur à courant continu avec balais.....	(76)
Figure IV.11 : Schéma synoptique simplifié du pompage PV par motopompe DC.....	(76)
Figure IV.12 : Schéma synoptique simplifié du pompage PV par motopompe à AC.....	(77)
Figure IV.13 : Conversion DC / DC.....	(77)
Figure IV.14 : Conversion DC / AC.....	(77)

LISTE DES FIGURES

Figure IV.15 : Différents types de batteries.....	(78)
Figure IV.16 : Hauteur manométrique totale.....	(79)

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux

Chapitre I

Tableaux I.1: Les matières premières.....(10)

Chapitre II

Tableau II.1: Les Compositions du soleil.....(17)

Tableau 2.2: Caractéristiques principales du soleil.....(17)

Chapitre IV

Tableau IV.1: Diagramme d'estimation des besoins en eau.....(80)

TABLES DES MATIERES

Introduction générale

Chapitre I : Energies Renouvelables

I.1 Introduction.....	(2)
I.2 Définition.....	(2)
I.3 Les différents types d'énergie renouvelable	(2)
I.3.1 L'énergie solaire.....	(2)
I.3.1.1 Les ressources solaires.....	(3)
I.3.1.2 Les techniques d'utilisation de l'énergie solaire.....	(3)
I.3.1.2.1 Le solaire passif.....	(3)
I.3.1.2.2 Le solaire thermique.....	(4)
I.3.1.2.3 Le solaire thermodynamique.....	(4)
I.3.1.2.4 Le solaire photovoltaïque.....	(4)
I.3.2 L'énergie éolienne.....	(5)
I.3.2.1 Les différentes utilisations	(6)
I.3.2.1.1 Rendement des éoliennes.....	(6)
I.3.2.1.2 Transformation et stockage de l'énergie éolienne.....	(6)
I.3.2.1.3 Stockage par hydrogène	(7)
I.3.2.1.4 Stockage par batteries.....	(7)
I.3.3 L'énergie hydraulique.....	(7)
I.3.3.1 Origine	(8)
I.3.3.2 Les différentes utilisations	(8)
I.3.4 Energie de la biomasse	(9)
I.3.4.1 Énergie du biogaz	(10)
I.3.4.1.1 Composition.....	(10)
I.3.4.1.2 Rôle dans la transition énergétique	(11)
I.3.4.2 Les bio carburant	(11)
I.3.4.3 Bioéthanol	(12)
I.3.5 L'énergie géothermique	(13)
I.3.5.1 Principes	(13)
I.3.5.2 Les différents types de géothermie	(14)
I.4. Conclusion.....	(14)

TABLES DES MATIERES

Chapitre II : Energie Solaire

II.1. Introduction	(16)
II.2. Gisement solaire	(16)
II.2.1 Le soleil	(16)
II.2.2 La terre	(18)
II.2.3 Le mouvement de la terre autour du soleil	(19)
II.2.4 Le spectre solaire	(20)
II.2.5 Le Rayonnement solaire	(21)
II.2.5.1. La constante solaire	(21)
II.2.5.2. Le rayonnement global	(21)
II.2.5.3. La convention Air Mass	(22)
II.3. Niveau d'enselement dans le monde	(23)
II.4. Les différentes technologies de conversion de l'énergie solaire	(23)
II-4-1 : l'énergie solaire thermique	(24)
II.4.2. Énergie Solaire à concentration thermodynamique	(25)
II-4-3 : L'énergie solaire photovoltaïque	(27)
II.5. : Les différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire.....	(28)
II.5.1 : La conduction	(28)
II.5.2 : La convection	(29)
II.5.3 : Le rayonnement	(30)
II.6 : L'énergie solaire et environnement	(31)
II.6.1 : Impacts sur la planète	(31)
II.6.2 : Impact sur l'homme.....	(32)
II.7. Conclusion	(32)

TABLES DES MATIERES

Chapitre III : Panneaux Photovoltaïques

III.1. Introduction.....	(34)
III.2. Solaire photovoltaïque.....	(34)
III.3. Les étapes pour la fabrication des cellules solaires	(34)
III.4. Cellules et panneaux photovoltaïques.....	(35)
III.4.1. Historique.....	(35)
III.4.2 Principe du photovoltaïque.....	(36)
III.4.3. Définition des cellules solaires.....	(36)
III.4.4. Structure physique de la cellule photovoltaïque.....	(37)
III.5. Les couches formant la cellule solaire.....	(37)
III.5.1. Couche semi-conductrice de type p (collecteur).....	(37)
III.5.2. Couche semi-conductrice de type n (émetteur).....	(37)
III.5.3. Doigts de contact et contact métallique de la face arrière.....	(38)
III.5.4. Couche anti-réflexion (CAR).....	(38)
III.6. Les différentes technologies photovoltaïques.....	(38)
III.7. Association des modules Photovoltaïques.....	(39)
III.7.1. Mise en série.....	(39)
III.7.2. Mise en parallèle.....	(40)
III.8 Caractéristiques électriques et paramètres de la cellule photovoltaïque.....	(41)
III.8.1. Zones de fonctionnement d'un module photovoltaïque.....	(41)
III.8.2 les paramètres de la cellule photovoltaïque.....	(42)
III.8.3. Fonctionnement à puissance maximale.....	(44)
III.8.4 Influence de l'éclairement et de la température.....	(45)
III.8.5 Constitution d'un module photovoltaïque.....	(46)
III.9. La fabrication des cellules photovoltaïques.....	(48)

TABLES DES MATIERES

III.9.1 La silice : matière première d'une cellule photovoltaïque.....	(48)
III.9.2. Extraction et purification du silicium.....	(49)
III.9.3 Obtention des lingots de silicium.....	(50)
III.9.4 Obtention des wafers photovoltaïques.....	(52)
III.10. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	(53)
III.11. Le dopage.....	(54)
III.11.1. Dopage de type N.....	(54)
III.11.2. Dopage de type P.....	(54)
III.11.3. La jonction (P-N).....	(55)
III.11.4. Les 3 méthodes de dopages.....	(55)
III.12. Types de cellules et panneaux photovoltaïques.....	(56)
III.12.1. Panneaux en silicium cristallin.....	(57)
III.12.2 Panneaux à couche mince.....	(58)
III.13. Principaux composants d'une centrale PV.....	(60)
III.13.1. Générateur photovoltaïque.....	(61)
III.13.2. Les convertisseurs.....	(61)
III.13.3. Les batteries.....	(62)
III.14. Analyse des performances journalières.....	(62)
III.14.1. Energie générée et énergie cumulée.....	(63)
III.14.2. Rendement de référence (Y_r).....	(64)
III.14.3. Rendement du champ PV (Y_a).....	(65)
III.14.4. Rendement final du système PV (Y_f).....	(65)
III.14.5. Indice de performance normalisé (PR).....	(65)
III.14.6. Les pertes du système par conversion (L_s).....	(66)

TABLES DES MATIERES

III.14.7. Les pertes diverses (L_C).....	(66)
III.14.8. L'efficacité du champ PV (η_{PV}).....	(66)
III.14.9. L'efficacité du système PV (η_{SYS}).....	(67)
III.14.10. L'efficacité de l'onduleur PV (η_{inv}).....	(68)
III.15 conclusion.....	(68)

Chapitre IV : Le Pompage Solaire

IV.1. Introduction	(70)
IV.2. Le pompage solaire.....	(70)
IV.2.1 Pompage « au fil du soleil ».....	(70)
IV.2.2. Pompage avec stockage d'énergie.....	(71)
IV.3. Composants d'un système de pompage PV.....	(71)
IV.3.1- Le générateur photovoltaïque.....	(72)
IV.3.2- Le groupe de motopompe.....	(73)
IV.3.2.1- Classification selon la conception de la pompe.....	(73)
IV.3.2.2- Classification selon la position de pompe.....	(75)
IV.3.2.3 Classification selon le moteur utilisé.....	(76)
IV.3.3- Electronique de commande.....	(77)
IV.3.4- Le stockage.....	(77)
IV.4. Notions hydrauliques.....	(78)
IV.5 Dimensionnement complet de l'installation.....	(79)
IV.5.1 Estimations des besoins en eau.....	(80)
IV.5.2 Calcul de l'énergie hydraulique quotidienne requise.....	(80)
IV.5.3. Calcul de l'énergie électrique quotidienne requise.....	(81)
IV.5.4. Détermination de l'énergie solaire disponible.....	(81)
IV.6 Taille du générateur photovoltaïque.....	(81)

TABLES DES MATIERES

IV.6.1 Méthode analytique.....	(81)
IV.6.2 Méthode graphique.....	(82)
IV.7 Dimensionnement de la pompe.....	(83)
IV.8 Dimensionnement des stations de pompage solaire.....	(83)
IV.9. Exemple.....	(84)
IV.9.1. Hypothèses.....	(84)
IV.9.2. Résultats du dimensionnement.....	(84)
IV.9.3. Choix du matériel.....	(85)
IV.10. Conclusion.....	(86)
Conclusion générale	

Résumé

Résumé

Nous avons traité dans ce travail un sujet très intéressant et très touchant, nouveau dans le domaine électrotechnique. C'est l'énergie verte ou renouvelable, d'après notre recherche et notre découverte des différents types de production de l'énergie électrique par des ressources terrestres comme : le pétrole, Gaz, Uranium, etc...., nous avons trouvé que ces ressources sont de plus en plus éphémères et épuisables et il n'y a pas de remplacement sauf par l'énergie renouvelable. L'énergie renouvelable consiste l'énergie éolienne et l'énergie hydraulique et enfin l'énergie solaire. En utilisant les panneaux solaires qui sont considérés dans l'avenir comme meilleur solution pour le consommateur de l'électricité et pour sécuriser la planète des produits toxique qui résulte d'avoir la pollution. Le silicium ou le Quartz est considéré comme la source essentielle dans cette construction (panneaux solaires). Après plusieurs étapes dans la fabrication on obtient un panneau solaire à utiliser, dans notre travail on a expliqué ces étapes

L'utilisation de ce type d'énergie propre et décentralisée contribue au développement de l'économie de la zone. Les possibilités de production de l'énergie et du pompage de l'eau sur tout le territoire encourage la population à rester dans leurs zones d'origines.

Introduction Générale

Introduction générale

En raison du développement de l'industrie, du transport et des moyens de communication, une croissance de la consommation mondiale d'électricité a été observée pendant les dernières décennies. Cependant, la plupart de l'énergie électrique est produite par combustion de ressources non renouvelables (carbone, pétrole, gaz, nucléaire) dont le délai d'épuisement est estimé à quelques décennies. De plus, ce type de production d'énergie est très polluant. Le développement des sources d'énergies renouvelables et non polluantes est donc d'actualité.

Parmi les sources d'énergies renouvelables, on compte le vent, les flux marins et océaniques, la géothermie, le solaire (cellules photovoltaïques), etc.... Ce dernier est une source d'énergie très puissante. En effet, la puissance du rayonnement solaire au niveau du sol est d'environ 950 Watt/m². La quantité totale d'énergie solaire reçue au niveau du sol pendant une semaine dépasse l'énergie produite par les réserves mondiales de pétrole, de carbone, de gaz et d'uranium. Mais dans la plupart des cas, une conversion (transformation) de l'énergie du rayonnement solaire en électricité est nécessaire.

L'électricité photovoltaïque est obtenue par la transformation directe de la lumière du soleil en électricité, au moyen de cellules photovoltaïques. La production d'électricité photovoltaïque connaît une croissance importante depuis les années 1990-95, pour dépasser les 25,900 Mégawatts en 2013

Dans nos jours, il nous semble que personne ne peut s'en douter sur l'importance de l'eau et de l'énergie pour les besoins humains. Avec les avancées technologiques, le besoin en énergie ne cesse d'augmenter. Ce problème d'énergie est encore plus sensible dans les sites isolés où l'utilisation des ressources classiques s'avère souvent très coûteuse. En effet, plusieurs contraintes, comme le transport du combustible et les entretiens périodiques des moteurs diesels, rendent la recherche d'une source d'énergie alternative indispensable pour ce type de sites. Comme nous le savons, la plus grande partie de l'énergie consommée actuellement provient de l'utilisation des combustibles fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou encore l'énergie nucléaire. Les études et les prévisions récentes nous alertent que l'utilisation massive de ces ressources conduira certainement à l'épuisement total de ces réserves. En plus, tout le monde est mondialement convaincu par le danger de ce processus sur l'environnement. A partir de ce constat, il été nécessaire de chercher d'autres ressources d'énergie de remplacement. Les énergies renouvelables, comme l'énergie photovoltaïque, éolienne ou

Introduction Générale

hydraulique, représentent une solution de remplacement par excellence et elles sont de plus en plus utilisées dans nos jours. Ce type d'énergie n'est pas seulement gratuit et inépuisable, mais aussi très propre pour l'environnement. D'ailleurs, on parle souvent d'une énergie « verte », puisqu'elle permet d'éviter totalement la pollution produite par les sources traditionnelles.

Dans ce travail de recherche, nous nous sommes intéressés plus particulièrement par l'énergie solaire photovoltaïque avec comme application, le pompage d'eau dans des sites isolés. Nous verrons que cette solution est particulièrement intéressante pour ce type de site. D'autant plus que le territoire national dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation peut atteindre les 3900 heures par an sur le Sahara. L'énergie acquise quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 KWh, soit près de 2263 kWh/m² /an au sud du pays. L'utilisation de l'énergie photovoltaïque pour le pompage de l'eau est bien adaptée pour la plupart des régions arides et semi-arides en raison de l'existence dans ces régions d'un potentiel hydraulique souterrain peu profond. Une autre coïncidence très importante favorise l'utilisation de ce type d'énergie pour le pompage d'eau est que la demande d'eau, surtout dans l'agriculture, atteint son maximum par temps chaud et sec où c'est justement le moment où l'on a accès au maximum d'énergie solaire.

-Le premier chapitre présente les différentes sources d'énergies renouvelables existantes, les bases indispensables à la compréhension des énergies renouvelable et l'énergie solaire en particulier, les différentes technologies solaires, quelques notions sur le rayonnement solaire. Ainsi que les types de stockage utilisés dans ce domaine

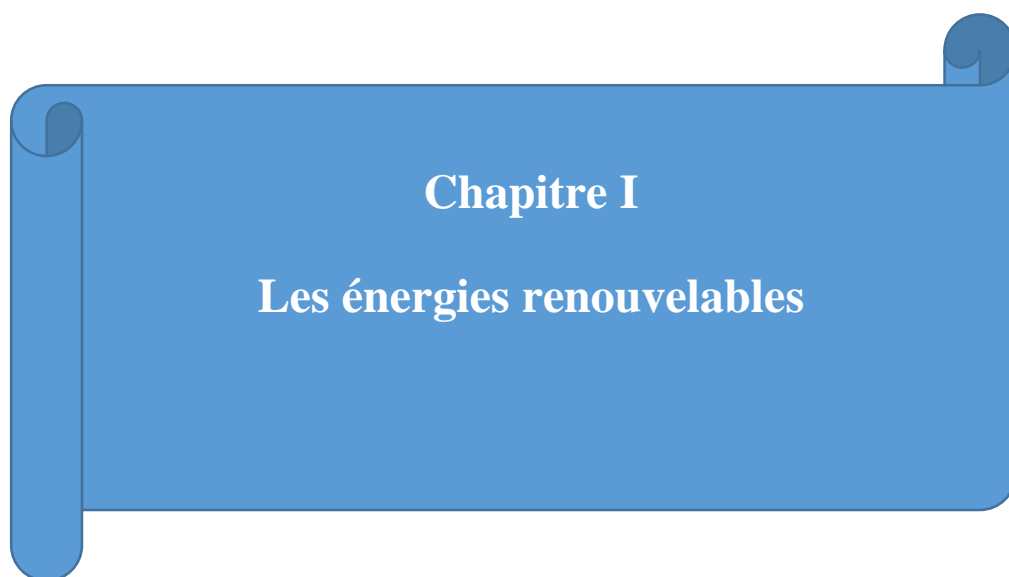
-L'énergie solaire photovoltaïque (PV), qui est la conversion directe de la lumière en électricité grâce à des cellules solaires, représente une alternative intéressante et bien adaptée à des besoins limités. Malgré sa facilité de mise en œuvre, son faible impact environnemental et le peu d'entretien qu'il nécessite, un système photovoltaïque n'est plus concurrentiel lorsque la demande augmente. Ainsi une étude assez rigoureuse est nécessaire pour faire le meilleur choix et le plus performant avec le moindre coût possible Dans le deuxième chapitre.

-Dans le troisième chapitre une étude sur Le silicium en tant que matière première dans l'industrie photovoltaïque représente plus de 90% dans ses trois formes qui sont les couches minces, silicium monocristallin et silicium poly cristallin, ce dernier étant le plus largement utilisé en raison de son faible coût par rapport aux autres types. Pour améliorer le rendement du silicium poly cristallin il faut améliorer ses propriétés optoélectriques qui permettent aux

Introduction Générale

cellules de capter une plus grande quantité d'énergie et de la convertir en électricité. Pour ce but, les chercheurs ont mis au point un procédé de production de silicium par induction électromagnétique et sans contact pour obtenir de grandes quantités de silicium et minimiser les défauts cristallins. Le silicium dans ce procédé passe par plusieurs phénomènes physiques, le phénomène électromagnétique et hydrodynamique sans négliger le phénomène de la croissance cristalline pendant la solidification. Le silicium est soumis à de forts gradients thermiques et étant donné la complexité de ce procédé, la méthode expérimentale reste coûteuse et la méthode théorique est presque impossible vu la complexité des phénomènes physiques couplés. La simulation numérique à l'avantage d'être le meilleur moyen pour résoudre ce type de problèmes complexes

-La composition générale d'un système de pompage photovoltaïque, ainsi que les éléments théoriques permettant de dimensionner les stations de pompage courantes sont présentés dans le quatrième chapitre.



Chapitre I
Les énergies renouvelables

I.1 Introduction

L'énergie renouvelable est une énergie qui peut s'auto-renouveler rapidement, de sorte qu'elle est considérée comme inépuisable à l'échelle d'une vie humaine. Elle provient de phénomènes naturels réguliers ou constants produits par les étoiles, principalement le soleil (photovoltaïque), le vent (vent), la lune (marée) et la terre (géothermie).

I.2 Définition

Les énergies renouvelables utilisent une énergie naturelle inépuisable (soleil, vent, eau, croissance des plantes, etc.). Leur principal avantage est qu'elles ne consomment pas d'énergie et que leurs émissions de gaz à effet de serre limitant la durée de vie sont très limitées, comme en témoigne l'analyse du cycle de vie des énergies renouvelables. Évaluer les émissions de gaz à effet de serre des principales catégories de technologies de production d'électricité tout au long du cycle de vie principal en :

- Énergie solaire (énergie thermique et photovoltaïque)
- Générateur d'énergie éolienne (vent).
- Système hydraulique (eau : turbine).
- Biomasse (dioxyde de carbone du bois provenant de la combustion = dioxyde de carbone provenant de la croissance des arbres : photosynthèse).
- L'énergie géothermique.

I.3 Les différents types d'énergie renouvelable

I.3.1 L'énergie solaire

L'énergie solaire fait partie de l'énergie électromagnétique du soleil, qui traverse l'atmosphère, en absorbe une partie et atteint la surface de la terre. Sur terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse réalisée par le règne végétal, et le règne animal en dépend tout au long de la chaîne alimentaire. [1]

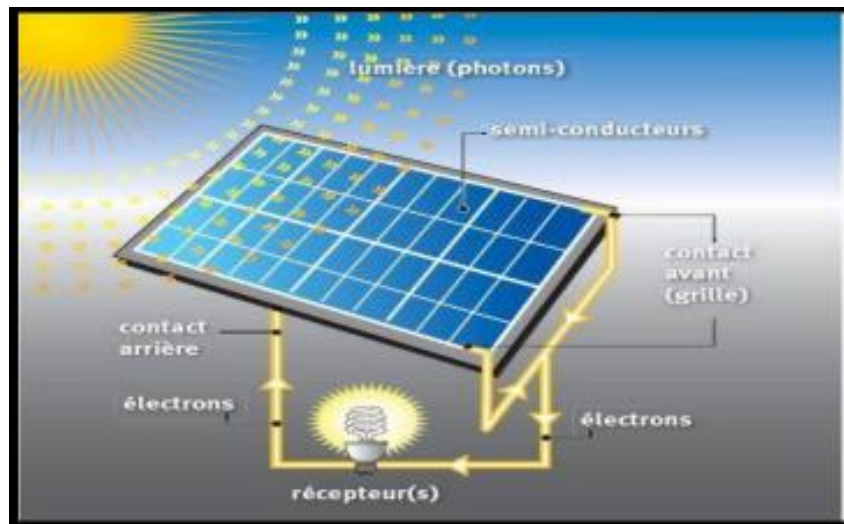


Figure I.1: l'Énergie solaire

I.3.1.1 Les ressources solaires

L'énergie solaire vient de la fusion nucléaire qui se produit au centre du Soleil. Elle se propage dans le système solaire et dans l'univers essentiellement sous la forme d'un rayonnement électromagnétique dont la lumière n'est que la partie visible.

L'énergie solaire reçue en un point du globe dépend de :

- L'énergie électromagnétique (lumière visible, infrarouge, ultraviolet et autres rayonnements) émise par le Soleil et arrivant sur Terre (avec des fluctuations décennales, saisonnières et ponctuelles).
- La nébulosité (nuages, brouillards, etc.), qui varie considérablement d'un endroit du globe à un autre. Celle-ci est forte à très forte dans les régions océaniques tempérées et subpolaires ainsi que dans les régions équatoriales, alors qu'elle est faible à très faible en période anticyclonique et dans les régions arides subtropicales ou polaires.
- La latitude, la saison et l'heure, qui influent sur la hauteur du Soleil et donc l'énergie reçue au sol par unité de surface, ainsi que sur la nébulosité en fonction du climat local.

I.3.1.2 Les techniques d'utilisation de l'énergie solaire

Les techniques pour capter directement une partie de cette énergie peuvent être classées entre solaire passif, solaire photovoltaïque et solaire thermique.

I.3.1.2.1 Le solaire passif

La plus ancienne et certainement la plus importante, quoique discrète, utilisation de l'énergie solaire consiste à bénéficier de l'apport direct du rayonnement solaire, c'est-à-dire l'énergie solaire passive. Pour qu'un bâtiment bénéficie au mieux des rayons du Soleil, on doit tenir compte de l'énergie solaire lors de la conception architecturale (façades doubles, surface vitrée orientée vers le Sud, isolation thermique, etc.).

L'apport solaire passif représente alors une part importante du chauffage et de l'éclairage du bâtiment et les économies d'énergies peuvent être importantes

I.3.1.2.2 Le solaire thermique

L'énergie solaire thermique consiste à utiliser la chaleur issue du rayonnement solaire. Ce rayonnement se décline de différentes façons :

- En usage direct de la chaleur : chauffe-eau, chauffage solaire dont fours solaires, cuisinières et sécheuses solaires.

- En usage indirect, la chaleur servant pour un autre usage : rafraîchissement solaire, centrales solaires thermodynamiques, etc.

I.3.1.2.3 Le solaire thermodynamique

Le solaire thermodynamique est une technique solaire qui consiste à concentrer l'énergie solaire (via des héliostats, miroirs, etc.) pour produire :

- De l'électricité, sur le même principe qu'une centrale électrique classique (production de vapeur à haute pression qui est ensuite turbinée).

- Un travail mécanique, en transformant un liquide en gaz [1] ou en chauffant directement une partie du moteur, comme dans le moteur Stirling.

I.3.1.2.4 Le solaire photovoltaïque

Le terme photovoltaïque peut désigner le phénomène physique d'effet photovoltaïque ou la technique associée. L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire par une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles dans un module photovoltaïque, puis les modules sont regroupés pour former des panneaux solaires, installés chez un particulier ou dans une centrale solaire photovoltaïque. Après transformation en courant alternatif grâce à un onduleur, l'installation

solaire peut satisfaire un besoin local (en association avec un moyen de stockage) ou être injectée dans un réseau de distribution électrique (le stockage n'étant alors pas nécessaire).

I.3.2 L'énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie du vent, dont la force motrice (énergie cinétique) est utilisée dans le déplacement de voiliers et autres véhicules ou transformée au moyen d'un dispositif aérogénérateur, comme une éolienne ou un moulin à vent, en une énergie diversement utilisable.

L'énergie éolienne est une source d'énergie intermittente qui n'est pas produite à la demande, mais selon les conditions météorologiques ; elle nécessite donc des installations de stockage ou de production de remplacement pendant ses périodes d'indisponibilité.



Figure I.2 : Photo d'une centrale éolienne

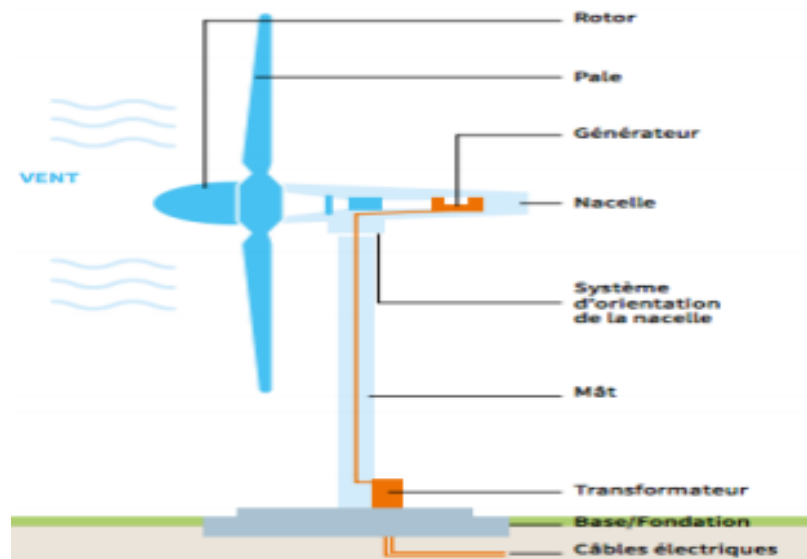


Figure I.3: composition d'une éolienne

I.3.2.1 Les différentes utilisations

L'énergie éolienne est utilisée de trois manières

- Avec conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile) ou pour faire tourner la meule d'un moulin ;
- Transformation en force motrice (pompage de liquides, compression de fluides...) : pompage de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ;
- Production d'énergie électrique : l'éolienne est couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage de l'énergie.

I.3.2.1.1 Rendement des éoliennes

Les éoliennes sont caractérisées par leur rendement en fonction de la vitesse du vent. Les éoliennes actuelles présentent une courbe plafonnée et limitée à des vents de moins de 90 km/h.

I.3.2.1.2 Transformation et stockage de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est par essence une énergie intermittente. Elle n'est prévisible que dans la limite des prévisions météorologiques et ne peut être stockée sous sa forme primaire.

Les partisans des énergies renouvelables voient dans le mix énergétique, combinant éolien, solaire et géothermie, dans le stockage de l'énergie et les économies d'énergie, des solutions pour pallier les problèmes d'intermittence de l'éolien.

L'université de Kassel a créé une centrale virtuelle d'électricité 100 % renouvelable. Elle combine les deux énergies intermittentes éolienne et solaire, ainsi que deux énergies non-intermittentes, l'énergie hydroélectrique et le biogaz, permettant de stocker de l'énergie en cas de surplus, de prendre le relais en l'absence de vent ou de soleil et de réaliser l'appoint. [2]

Combiner plusieurs sources renouvelables d'électricité (éolien, photovoltaïque, marémotrice, et hydroélectricité) via un « réseau intelligent » (smart grid) pourrait atténuer les problèmes posés par l'intermittence de chaque source prise individuellement

I.3.2.1.3 Stockage par hydrogène

L'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique est une des pistes les plus sérieusement envisagées. L'électrolyse est un procédé connu et maîtrisé qui permet d'utiliser le surplus d'énergie pour produire de l'hydrogène. La pile à combustible est une des pistes de recherche, comme l'atteste le projet Myrte, plateforme de recherche et développement qui a pour objectif de stocker l'énergie solaire sous forme d'hydrogène.

I.3.2.1.4 Stockage par batteries

La solution du stockage de l'énergie électrique dans des batteries n'est envisagée que pour des sites isolés et des productions de faible importance. Ce type de stockage est limité par l'investissement représenté par des batteries de grande capacité et par la pollution engendrée par leur recyclage.

I.3.2.1.4 Stockage par batteries

Une méthode utilisée pour exploiter et stocker les productions excédentaires des éoliennes consiste à les coupler avec des techniques de pompage-turbinage au sein de centrales hydro-éoliennes. Cette technique est à la fois la plus simple et la plus prometteuse après le simple couplage à un potentiel hydraulique supérieur ou égal au potentiel éolien.

I.3.3 L'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est l'énergie fournie par le mouvement de l'eau, sous toutes ses formes : chutes d'eau, cours d'eau, courants marins, marées, vagues [3]. Ce mouvement peut

être utilisé directement, par exemple avec un moulin à eau, ou plus couramment être converti, par exemple en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique.

L'énergie hydraulique est en fait une énergie cinétique liée au déplacement de l'eau comme dans les courants marins, les cours d'eau, les marées, les vagues ou l'utilisation d'une énergie potentielle comme dans le cas des chutes d'eau et des barrages.



Figure I.4: L'énergie hydraulique

I.3.3.1 Origine

L'énergie hydraulique est une manifestation indirecte de l'énergie du Soleil et de la force de gravité de la lune, comme beaucoup de sources d'énergies renouvelables sur terre (énergie éolienne, énergie des vagues, la biomasse, etc.) [4]. Sous l'action du Soleil et du vent, l'eau s'évapore des océans et forme les nuages qui se déplacent au gré des vents. Des abaissements de température au-dessus des continents [4] provoquent la condensation de la vapeur d'eau. La pluie et la neige (les précipitations) alimentent ainsi les couches poreuses de la Terre, les glaciers, les lacs et l'eau des rivières qui s'écoulent petit à petit dans les océans, c'est le cycle de l'eau. La gravité de la Lune et celle du Soleil produisent les marées dont on peut exploiter l'énergie.

I.3.3.2 Les différentes utilisations

➤ Utilisation directe

L'énergie hydraulique peut être convertie directement en énergie mécanique, par exemple en utilisant la force de l'eau d'un ruisseau pour faire tourner la roue d'un moulin à eau ou d'une noria mais aussi pour fabriquer de la pâte à papier.

➤ Utilisation indirecte

L'énergie hydraulique peut aussi être convertie en une autre énergie (historiquement mécanique mais depuis le début du XX siècle plutôt électrique) :

- Une centrale hydroélectrique utilise l'énergie de la hauteur de chute.
- Une centrale au fil de l'eau utilise l'énergie d'un cours d'eau.
- Une centrale marémotrice utilise l'énergie des marées ;
- Une hydrolienne utilise celle des courants marins ;
- L'énergie des vagues peut aussi être exploitée.

I.3.4 Energie de la biomasse

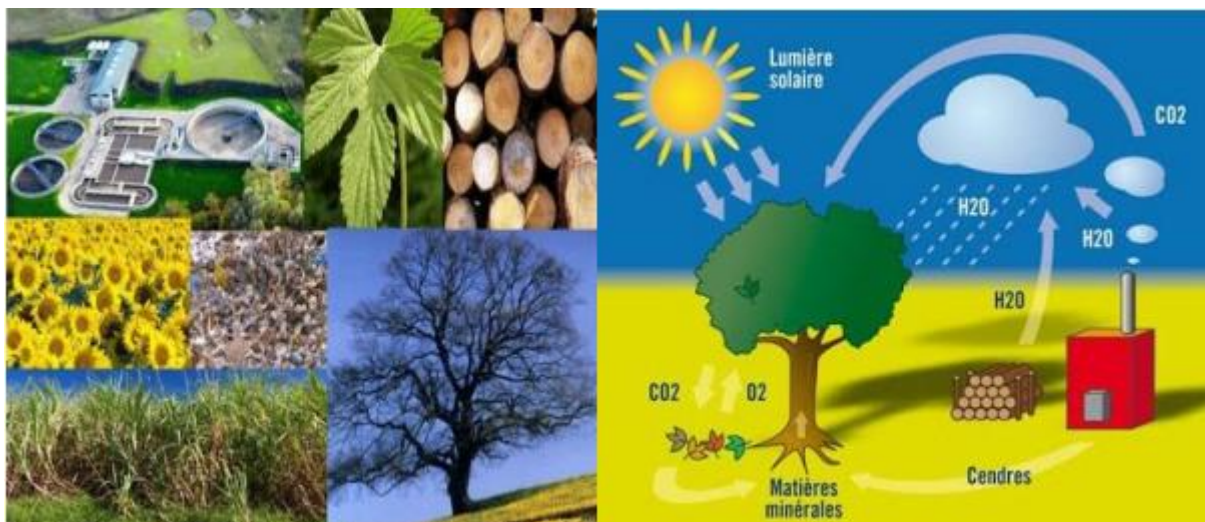


Figure I.5: Energie de la biomasse

Dans le domaine de l'énergie, le terme de biomasse regroupe l'ensemble des matières organiques pouvant devenir des sources d'énergie, on peut citer trois familles principales :

- Le bio gaz ou la méthanisation.
- Les bios énergies ou biomasse solide.
- Les granules de bois le combustible au rendement le plus élevé de la gamme (Viessmann).

Le bois peut être considéré comme une énergie renouvelable tant que le volume prélevé ne dépasse pas l'accroissement naturel de la forêt 1 mètre cube, pour un contenu énergétique de 1500 à 2000kWh

1.3.4.1 Énergie du biogaz

Le biogaz est le gaz produit par la fermentation de matières organiques en l'absence d'oxygène. C'est un gaz combustible composé essentiellement de méthane et de dioxyde de carbone.

Il peut être brûlé sur son lieu de production pour obtenir chaleur et électricité ou purifié. Pour obtenir du bio méthane utilisable comme gaz naturel pour véhicules ou injectable sur le réseau de distribution de gaz naturel.

La méthanisation se produit spontanément dans les marais (gaz des marais), les rizières, les grands réservoirs ou barrages hydroélectriques tropicaux, les décharges contenant des déchets ou matières organiques (animales, végétales, fongiques ou bactériennes). On peut la provoquer artificiellement dans des digesteurs (en particulier pour traiter des boues d'épuration et des déchets organiques industriels ou agricoles).

Tableaux I.1: Les matières premières

Taille digesteur	Production biogaz	Production en Kw/h	Production en Kw/an	Economies EUR/jour	Economies EUR/an
Homebiogas	0.5-1 m ³ /j	11.2 kwh/j	4088 kwh/an	1.108	404.3
MethaPro	2 m ³ /j	22.4 kwh/j	8176 kwh/an	2.215	808.475
MethaAgro 8	8 m ³ /j	89.6 kwh/j	32704 kwh/an	8.86	3234.43
MethaAgro 15	15 m ³ /j	168 kwh/j	61320 kwh/an	16.615	6064.55

1.3.4.1.1 Composition

Le biogaz est principalement composé de méthane (50 à 70 %), mais aussi de dioxyde de carbone (CO₂) et de quantités variables de vapeur d'eau et de sulfure d'hydrogène (H₂S), voire d'autres composés ("contaminants"), notamment dans les biogaz de décharges. Parmi les impuretés figurent :

- Des siloxanes
- Des organochlorés (dont chlorure de vinyle, dichlorométhane, trichlorométhane et tétrachlorométhane qui sont des substances cancérigènes)
- Des composés soufrés (mercaptans)
- Des composés azotés (NH₃ et NH₂)

- De l'hydrogène
- Divers produits intermédiaires de fermentation (alcools, acides, esters...)
- Des métaux et métalloïdes
- Et même quelques microbes anaérobies (éventuellement méthanotrophe). Sa teneur en ces différents éléments, et donc sa valeur énergétique, dépend de la durée et qualité du processus de fermentation, du type d'installation et beaucoup de la nature de la matière fermentescible utilisée (et en particulier de ses proportions en carbone, hydrogène, oxygène et azote ou contaminants indésirables). Par exemple une matière fermentescible riche en carbone et hydrogène produit un biogaz contenant jusqu'à 90 % de méthane, alors que de la cellulose plus pauvre produira un biogaz à seulement 55 % de méthane (et 45 % de gaz carbonique).

1.3.4.1.2 Rôle dans la transition énergétique

➤ Effet de serre

Le biogaz est constitué essentiellement de méthane (CH_4) dont l'effet de serre est très important. Sa combustion produit du dioxyde de carbone, qui est aussi un gaz à effet de serre, mais dont l'impact est moindre. En effet, un kilogramme de méthane (CH_4) a un Potentiel de Préchauffèrent Global (PRG) sur 100 ans, 23 fois supérieur à un kilogramme de dioxyde de carbone.

Utiliser du biogaz n'accroît pas l'effet de serre si le carbone produit (méthane et dioxyde de carbone) a lui-même été absorbé préalablement par les végétaux dont ce biogaz est issu, lors de leur croissance et si cette utilisation s'inscrit dans un cycle court de carbone et si elle ne contribue pas à surexploiter de la biomasse (elle ne fait alors que restituer du carbone qui avait été ôté récemment de l'atmosphère, contrairement au gaz naturel).

1.3.4.2 Les bio carburant

Un biocarburant est un carburant produit à partir de matériaux organiques. Les trois principales catégories sont : huile- végétale -carburant.



Figure I.6: Les bicarbonates végétales

1.3.4.3 Bioéthanol :

Le bioéthanol est un alcool éthylique ou éthanol, fabriqué à partir de céréales (maïs, blé...) ou de betteraves. Il est obtenu par la fermentation des sucres contenus dans ces matières végétales. Distillé puis déshydraté (l'eau ne s'incorporant pas à l'essence), cet alcool brut devient un composant de l'essence à différents pourcentages selon les carburants. Le bioéthanol est considéré comme une énergie renouvelable, les matières premières végétales (ou biomasse) se renouvelant chaque année. Il permet également de diminuer les émissions de gaz à effet de serre, par rapport aux carburants fossiles. En effet, les matières agricoles utilisées pour sa fabrication absorbent le CO₂ en quantité importante, à un niveau bien plus conséquent que les rejets dans l'atmosphère du Superéthanol-E10, carburant qui contient un fort taux de bioéthanol. Son impact écologique est donc important. Il faut bien différencier le bioéthanol du biodiesel, l'un étant incorporé à l'essence tandis que le second est destiné au gazole.



Figure I.7: le bioéthanol

I.3.5 L'énergie géothermique

La géothermie, du grec géo (« la Terre ») et thermos (« la chaleur »), désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, et la technologie qui vise à l'exploiter. Par extension, la géothermie désigne aussi parfois l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur.

Pour capter l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la Terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe d'eau chaude captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide se réchauffe et remonte chargé de calories (énergie thermique). Ces calories sont utilisées directement ou converties partiellement en électricité.



Figure I.8: L'énergie géothermique

I.3.5.1 Principes

Le manteau terrestre étant chaud, la croûte terrestre laisse filtrer un peu de cette chaleur, cependant la plus grande partie de la puissance géothermique obtenue en surface (87 %) est produite par la radioactivité des roches qui constituent la croûte terrestre (désintégration naturelle de l'uranium, du thorium et du potassium). [5]

Il existe dans la croûte terrestre, épaisse en moyenne de 30 km, un gradient de température appelé gradient géothermique qui définit que plus on creuse et plus la température augmente ; en moyenne de 3 K par 100 mètres de profondeur.

La géothermie vise à étudier et exploiter ce phénomène d'augmentation de la température en fonction de la profondeur (même si le flux de puissance obtenu diminue avec la

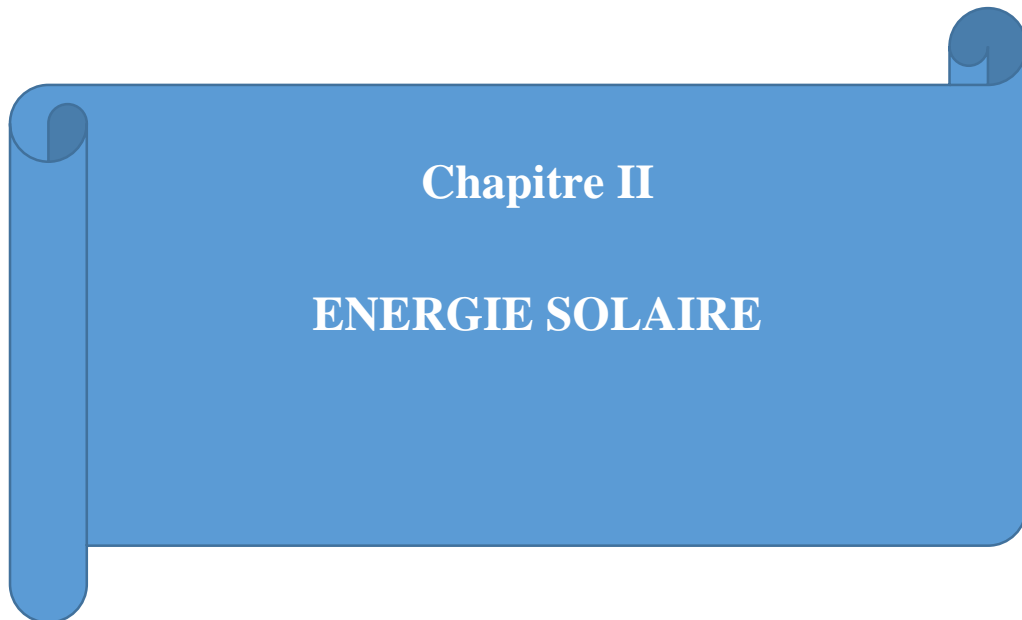
profondeur, puisque l'essentiel de ce flux provient de la radioactivité des roches de la croûte terrestre)¹³

I.3.5.2 Les différents types de géothermie

- On distingue habituellement trois types de géothermie :
 - La géothermie peu profonde (moins de 1 500 m¹) à basse température.
 - La géothermie profonde à haute température (plus de 150 °C), avec plusieurs approches développées et explorées depuis les années 1970.
 - Géothermie des roches chaudes sèches (Hot Dry Rock ou HDR pour les anglophones), basée sur la fracturation hydraulique et la création d'un « échangeur thermique profond » qu'il faut périodiquement décolmater.
 - Géothermie des roches naturellement fracturées ou Hot Fracture Rock (HFR).
 - Géothermie stimulée EGS (Enhanced Geothermal System), imaginée aux États-Unis en 1970¹ et mise en œuvre à Soultz-Sous-Forêts en France dans le cadre d'un projet-pilote européen et franco-allemand Géothermie Soultz.
 - La géothermie très profonde à très haute température. Ces trois types ont en commun de prélever la chaleur contenue dans le sol, issue de la pression, et, dans certains cas, d'une plus ou moins grande proximité du magma.

I.4. Conclusion

Le rôle des énergies renouvelables pour relever ce défi est crucial. C'est pourquoi il est très important de susciter l'intérêt des gens pour cette énergie durable en développant les technologies nécessaires pour garantir l'utilisation correcte de l'énergie durable pour atteindre des performances efficaces. De plus, l'apport des énergies renouvelables d'une part nous permet de maintenir un environnement propre et sain, d'autre part, il peut assurer la protection de la biodiversité.



II.1. Introduction

Le soleil est une source d'énergie quasi infinie, il est à l'origine d'effets biologiques qui participent directement ou indirectement à la vie terrestre (chaleur et lumière).

II.2. Gisement solaire

II.2.1 Le soleil

Le soleil est l'origine principale de toute forme d'énergie sur terre. Ceci est vrai autant pour les énergies d'origine fossile, comme les hydrocarbures que pour les énergies renouvelables, comme l'énergie solaire, l'énergie éolienne, la biomasse, et l'énergie géothermique.

L'astre soleil est de constitution gazeuse, de forme sphérique de 14×14^5 km de diamètre, sa masse est de l'ordre de 2×10^{30} kg. Il est constitué principalement de 80% d'hydrogène, de 19% d'hélium, le 1% restant est un mélange de plus de 100 éléments. [6-7]

Il est situé à une distance de la terre égale à environ 150 millions de kilomètres. Sa luminosité totale, c'est-à-dire la puissance qu'il émet sous forme de photons, est à peu près égale à 4×10^{26} w. Seule une partie est interceptée par la terre, elle est de l'ordre de $1,7 \times 10^{17}$ w. Elle nous parvient essentiellement sous forme d'ondes électromagnétiques ; 30% de cette puissance est réfléchiée vers l'espace, 47% est absorbée et 23% est utilisée comme source d'énergie pour le cycle d'évaporation-précipitation de l'atmosphère. [6-7]

Les composants du soleil sont regroupés dans le tableau (II-1) et ses caractéristiques principales sont regroupées dans le tableau (II-2). [8]

Le soleil n'est pas une sphère homogène, on peut y distinguer trois régions principales (Figure II.1) [6-7-8] :

A/ L'intérieur, contient 40% de la masse du soleil, c'est là où se crée l'énergie par réaction thermonucléaire, cette région s'étend sur une épaisseur de 25×10^4 km. Cette couche est divisée en trois zones, le noyau, la zone radiative et la zone convective. Le rayonnement émis dans cette partie est totalement absorbé par les couches supérieures. La température atteint plusieurs millions de degrés, et la pression un milliard d'atmosphères.

Tableau II.1. Les Compositions du soleil.

Composition du soleil	
Hydrogène	73,46 %
Hélium	24,85 %
Oxygène	0,77 %
Carbone	0,29 %
Fer	0,16 %
Néon	0,12 %
Azote	0,09 %
Silicium	0,07 %
Magnésium	0,05 %

Tableau 2.2. Caractéristiques principales du soleil. [8]

Diamètre (km)	14×10^5
Masse (kg)	2×10^{30}
Surface (Km^2)	6.09×10^{12}
Volume (Km^3)	1.41×10^{18}
Masse volumique moyenne (kg/m^3)	1408
Vitesse (km/s)	217
Distance du centre de la voie lactée (km)	2.5×10^{17}

B/ La photosphère est une couche opaque, très mince, son épaisseur est d'environ 300 km, elle est responsable de la presque totalité du rayonnement qui nous parvient, c'est la partie visible du soleil. L'ordre de grandeur de la température n'y est plus que de quelques millions de degrés, décroissant très rapidement dans l'épaisseur de la couche jusqu'à une température dite de surface de l'ordre de 4500° .

C/ La chromosphère et la couronne solaire, sont des régions à faible densité ou la matière est très diluée, elles constituent l'atmosphère du soleil. Cette couche est caractérisée par un rayonnement émis très faible, bien que la température y très élevée (un million de degrés).

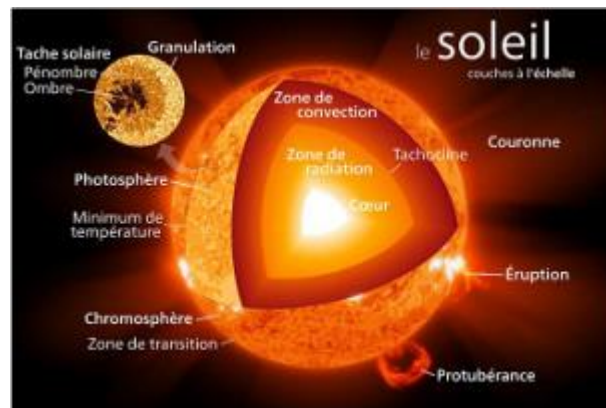


Figure II.1 : La structure interne du soleil.

II.2.2 La terre

La terre a la forme d'un ellipsoïde de révolution aplati. Sa superficie est de $510101 \times 10^3 \text{ Km}^2$, son volume est égale à $1083320 \times 10^6 \text{ Km}^3$, sa masse est 6×10^{21} tonnes et sa densité moyenne est de 5.52.

La terre décrit autour du soleil une ellipse presque circulaire. Ces est située dans un plan appelé écliptique. L'axe de rotation terrestre fait un angle de $23,27^\circ$ ce qu'on appelle déclinaison. L'intersection du plan de l'équateur avec le plan l'écliptique définit la ligne des équinoxes. L'intersection de cette ligne avec l'orbite terrestre, lors de l'équinoxe de printemps définit le point vernal celui-ci est pris comme origine pour le celui des angles définissant la position relative du soleil par rapport à la terre.

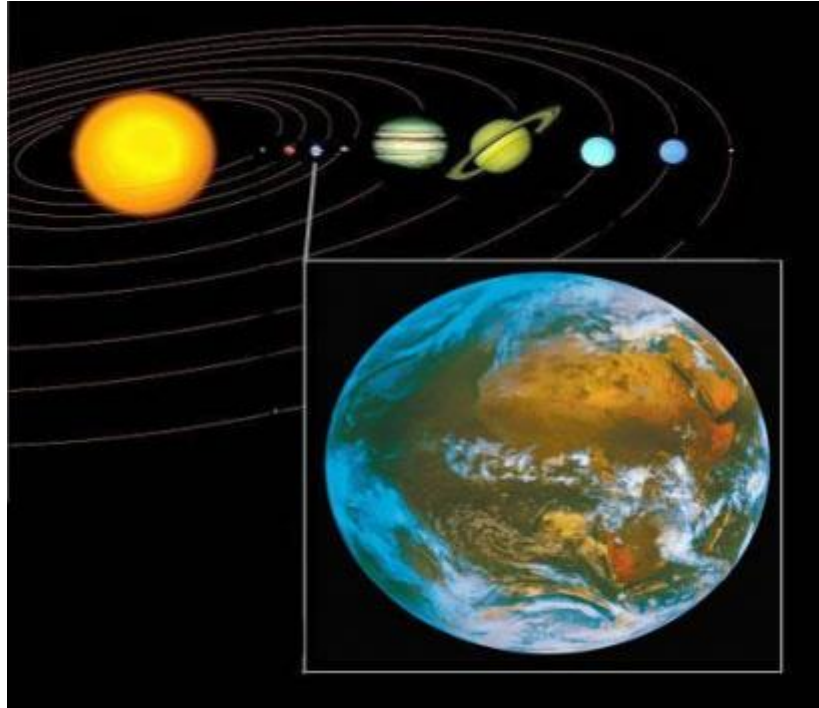


Figure II.2. Position de la terre dans le système solaire

II.2.3 Le mouvement de la terre autour du soleil

Dans son mouvement autour du soleil, la terre décrit une ellipse dont le soleil est l'un de ses foyers, la révolution complète s'effectue en une période de 365,25 jours. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique. [6]

C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est la plus proche du soleil : 147 millions de km. Au 22 juin la distance terre-soleil vaut 152 millions de km, c'est le jour ou la terre est la plus éloignée, c'est le solstice d'été. Le 21 mars et le 21 septembre sont appelés respectivement équinoxes de printemps et équinoxe d'automne. Aux équinoxes le jour et la nuit sont égaux. [6]

En plus de sa rotation autour du soleil, la terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Cette rotation s'effectue en une journée. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre est appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique, ils font entre eux un angle appelé inclinaison égale à $23,27^\circ$. [6]

Mouvement de la Terre autour du soleil

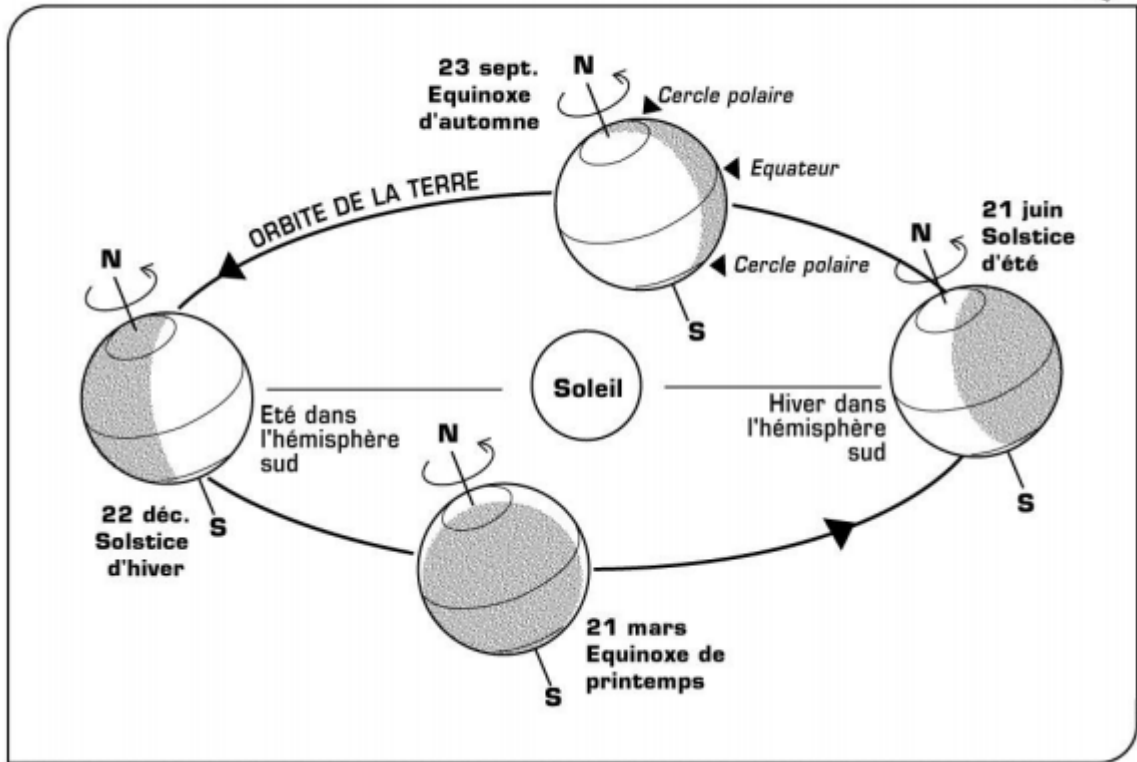


Figure II.3. Mouvement de la terre autour du soleil

II.2.4 Le spectre solaire

La répartition spectrale du rayonnement solaire est déterminée par la température de sa surface, à savoir 5900 K. La figure (II.4) donne l'allure de la répartition spectrale du rayonnement solaire réel hors atmosphère (l'éclairement spectral est définie comme une puissance reçue par unité de surface pour une longueur d'onde donnée et s'exprimée en $(W/m^2.nm)$). Le soleil se comporte approximativement comme un corps noir de 5900 K. Ces spectres montrent que le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur variant de 200 nm à 1000 nm comme suite :

Ultraviolet UV $200 < \lambda < 380$ nm 6.4%.

Visible $380 < \lambda < 780$ nm 48.0%.

Infrarouge IR $780 < \lambda < 1000$ nm 45.6%

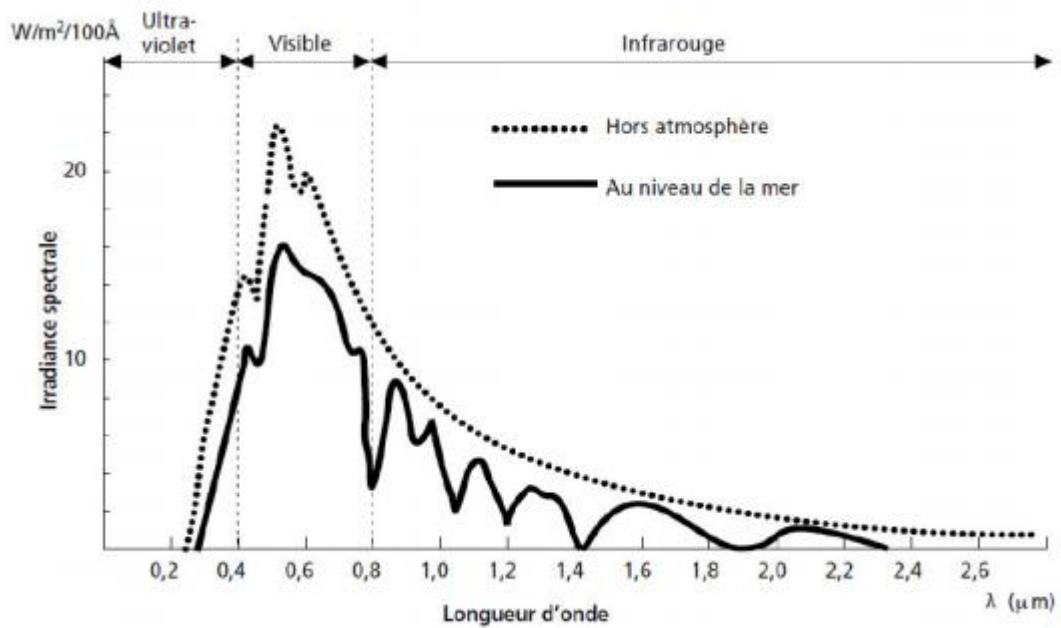


Figure II.4 : Analyse spectrale du rayonnement solaire [9]

II.2.5 Le Rayonnement solaire

II.2.5.1. La constante solaire

L'énergie solaire reçue sur la surface de l'atmosphère est estimée à $1360 W/m^2$ cependant elle s'atténue et perd son intensité en traversant l'atmosphère ne dépassant pas les $1000 W/m^2$ à la surface de la terre en raison de l'absorption dans ce dernier. La constante solaire varie en fonction de la localisation géographique du site (latitude), la saison, l'heure, les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité...), et l'altitude du lieu. [10]

II.2.5.2. Le rayonnement global

Le rayonnement global est la somme de trois différents types de rayonnements :

- **Rayonnement direct**

Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant de disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère il peut être mesuré par un pyréliomètre.

- **Rayonnement diffus**

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère.

• Rayonnement réfléchi

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (Eau, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lieu appelé Albédo.

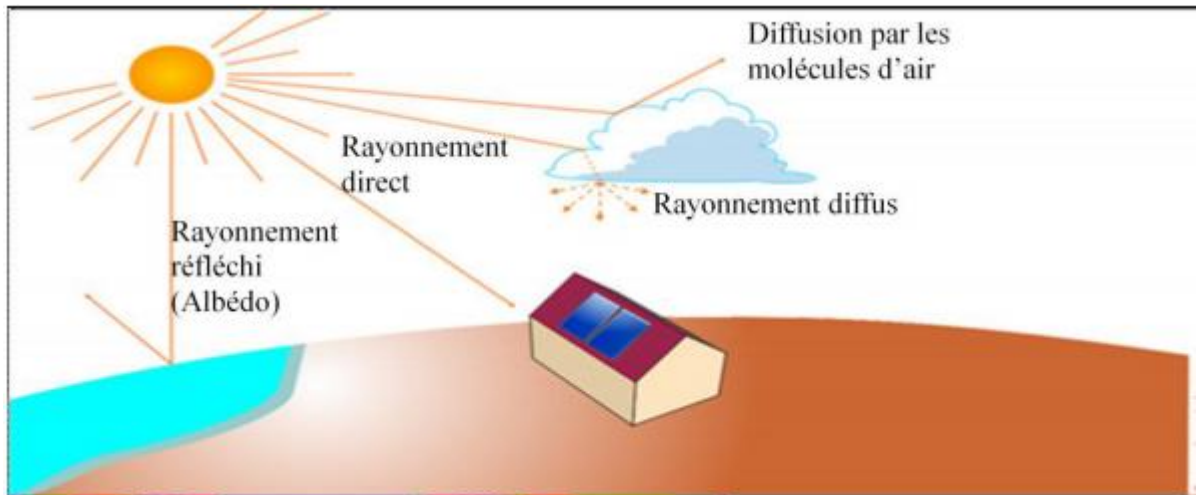


Figure II.5 : Types de rayonnement solaire reçus au sol. [11]

II.2.5.3. La convention Air Mass

La notion d'air mass (AM) sert à évaluer la masse atmosphérique traversée par le rayonnement solaire et dépend de l'épaisseur de l'atmosphère traversée, celle-ci définit le spectre de référence pour unifier les performances des cellules photovoltaïques. AM0 représente le spectre à la limite de l'atmosphère, AM1 représente le spectre arrivant à la surface de la terre quand le soleil est au zénith, AM1.5 représente le spectre standard arrivant avec un angle de 48.2° à la surface de la terre à une atmosphère et demi et en dernier AM2 qui représente le spectre arrivant avec 60.1° à la surface de la terre. [10]

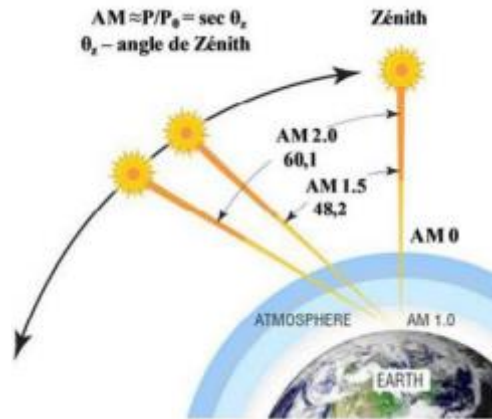


Figure II.6 : Notion Air Masse. [12]

II.3. Niveau d'enseillement dans le monde

Les valeurs maximales de durée d'enseillement sont enregistrées dans ce que l'on désigne généralement - dans le jargon de l'énergie solaire - sous le terme de « ceintures solaires » de la Terre. Ces ceintures solaires sont des régions essentiellement désertiques. Les moyennes annuelles de la durée d'enseillement dans ces régions sont généralement entre 3 600 et 4 000 h, soit une moyenne journalière extraordinaire de 10 à 11 heures. D'après (World Sunshine Chart) réalisée par le service météorologique des États-Unis.

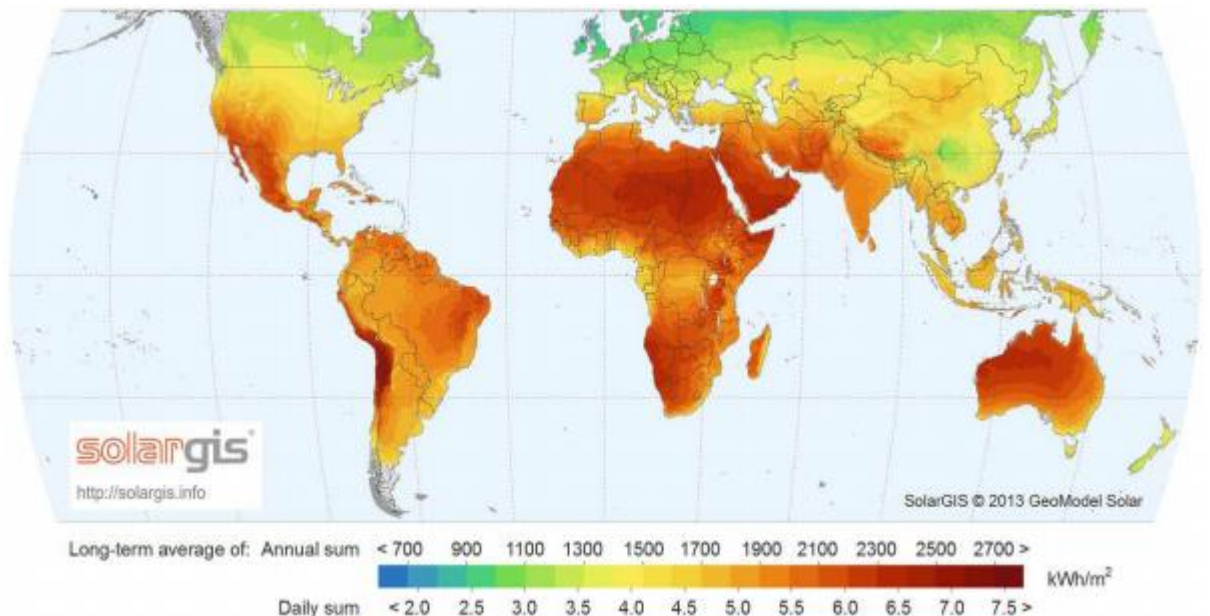


Figure II.7 : Carte l'enseillement moyen annuel dans le Monde. [13]

II.4. Les différentes technologies de conversion de l'énergie solaire

La conversion de L'énergie solaire en électricité peut être réalisée par trois technologies principales illustrées par le schéma ci-dessous :

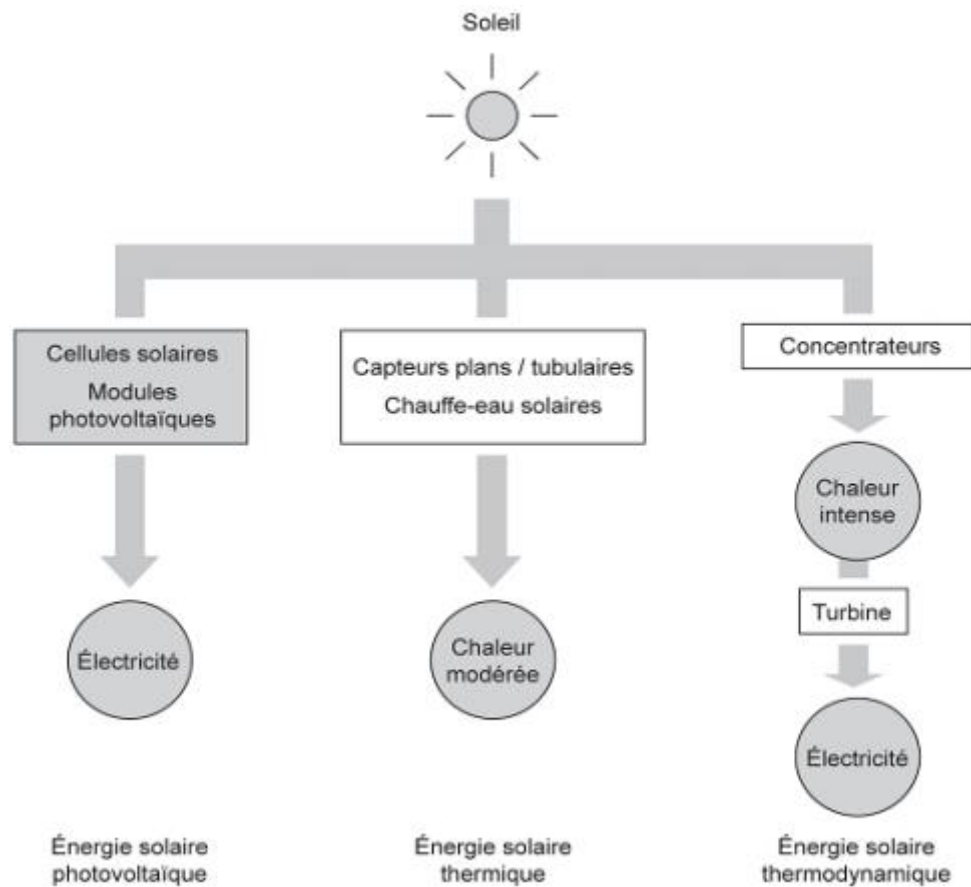


Figure II-8 : Différents types d'exploitation d'énergie solaire.

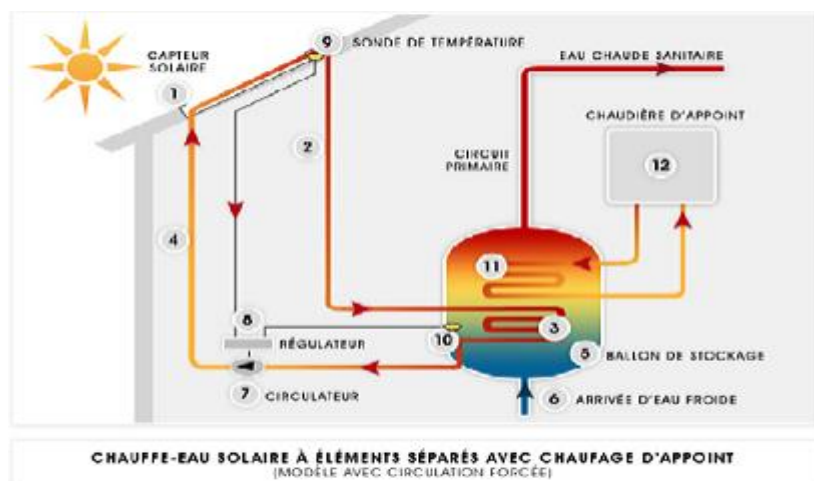
II-4-1 : l'énergie solaire thermique

Le principe de l'énergie thermique consiste à transformer le rayonnement solaire en énergie thermique grâce à un fluide qui circule dans des panneaux exposés au soleil, figure (II.9). Cette forme de conversion d'énergie peut être directe si on veut uniquement chauffer de l'eau sanitaire. Par contre, si on veut générer de l'électricité, il faudra utiliser des générateurs qui convertissent l'énergie thermique générée en électricité (par exemple, moteurs à air chaud).



Figure II.9 : Types de capteur thermique.

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



. Figure II.10 : Principe de fonctionnement de capteur solaire thermique

L'énergie thermique utilise la chaleur du rayonnement solaire pour le chauffage de bâtiments ou de l'eau sanitaire. Pour cette dernière il est intéressant de savoir que dans certains pays le chauffage d'eau sanitaire représente environ 20% des dépenses énergétique d'un foyer et que l'énergie solaire thermique peut subvenir à environ 80% de cette dépense énergétique.

II.4.2. Énergie Solaire à concentration thermodynamique

Le solaire à concentration thermodynamique est une technologie qui utilise des miroirs qui concentrent l'énergie solaire vers un tube contenant un fluide caloporteur qui chauffe jusqu'à une température pouvant atteindre 500°C. La chaleur obtenue est transférée à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne une turbine couplée à un alternateur qui produit de l'électricité. L'un des grands avantages de cette technologie provient du fait que la chaleur peut être stockée, permettant ainsi aux centrales solaires de produire de l'électricité pendant la nuit. Les miroirs qui collectent l'énergie solaire (placés à 3 ou 4 mètres du sol) forment une zone d'ombre sur le sol, cependant il arrive suffisamment de lumière pour cultiver des fruits ou des légumes. Une partie de l'eau douce formée sur place par condensation en sortie de la turbine peut être utilisée pour l'arrosage. [14]



Figure II.11 : Exemple de concentrateur cylindro-paraboliques



Figure II.12 : Exemple de concentrateur parabolique

II-4-3 : L'énergie solaire photovoltaïque

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

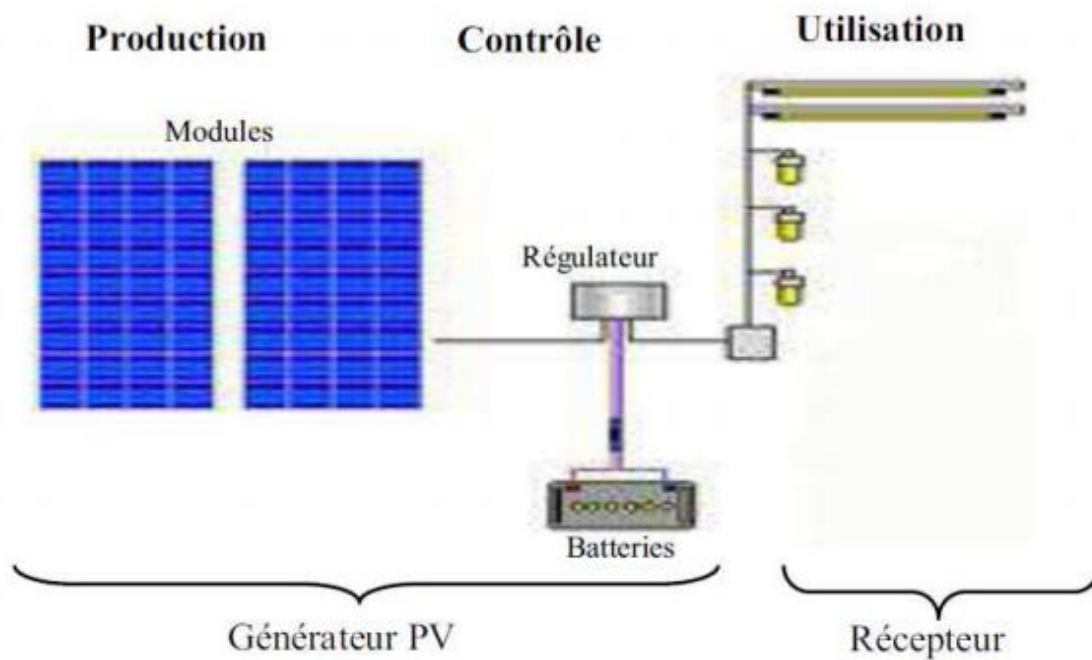


Figure II.13: Eléments d'un système photovoltaïque

II.5. : Les différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire

Un capteur solaire met en jeu simultanément les trois modes de transfert thermique : convection, conduction, et rayonnement. [15]

II.5.1 : La conduction

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres. [15]

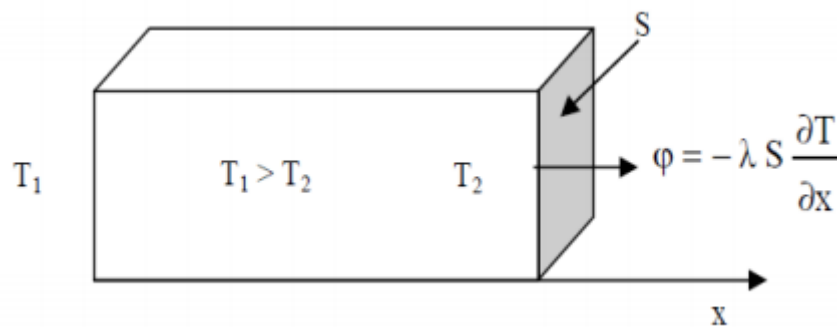


Figure II.14 : Schéma du transfert de chaleur par conduction.

La loi correspondant à ce processus de diffusion thermique est la loi de Fourier donnée par la relation :

q = - λ. A. grad T.....(II.1)

q : Flux de chaleur (W)

λ: Conductivité thermique du milieu (W m⁻¹K⁻¹)

A : Surface d'échange (m²)

Dans le capteur plan les échanges par conduction existent principalement entre :

- Les faces supérieures et inférieure de la vitre.
- Les faces supérieures et inférieure de l'isolant.
- L'absorbeur et l'isolant.

II.5.2 : La convection

La convection est un transport d'énergie dû à des mouvements macroscopiques.

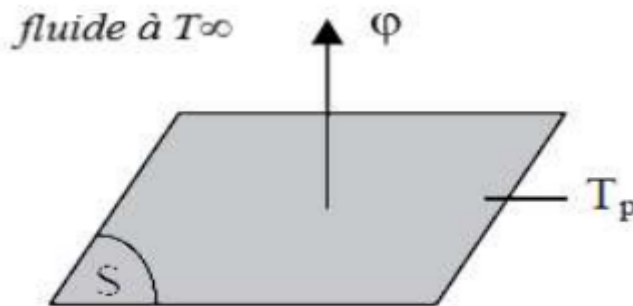


Figure II.15 : Schéma du transfert de chaleur convectif.

On distingue deux types de convection [16] :

- **La convection forcée** : le mouvement du milieu est engendré par un dispositif externe (le vent, une pompe, un ventilateur, ...etc.). [15]
- **La convection naturelle** : le mouvement du fluide est engendré par les variations de densité causées par des variations de température au sein du fluide, tel est le cas de la thermo circulation. [15]
- **La Convection mixte** : La convection mixte correspond au couplage des deux phénomènes précédents (convection naturelle et forcée) quand les vitesses d'écoulement, fictives, dues aux deux types de convection sont considérées séparément, du même ordre de grandeur. [17-18]

Le transfert thermique convectif est régi par la loi de Newton :

$$q = h \cdot S \cdot (T_p - T_f) \dots \dots \dots (II.2)$$

q : Le flux échangé par convection (W)

h : Coefficient de convection ($W m^{-1}K^{-1}$)

S : Surface de la paroi solide en contact avec le fluide (m^2)

T_p : Température de la paroi solide (K)

T_f : Température du fluide (K)

Dans un capteur plan l'échange par convection s'effectue entre :

- La vitre et l'ambiance, par convection libre ou forcée par le vent.
- La vitre et la plaque de l'absorbeur par convection libre.
- Le tube et le fluide par convection libre.
- Entre le fluide et l'isolant par convection libre.
- Entre l'isolant et l'ambiance par convection libre ou forcée par le vent.

II.5.3 : Le rayonnement

C'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans le vide). Dans les problèmes de conduction, on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant.

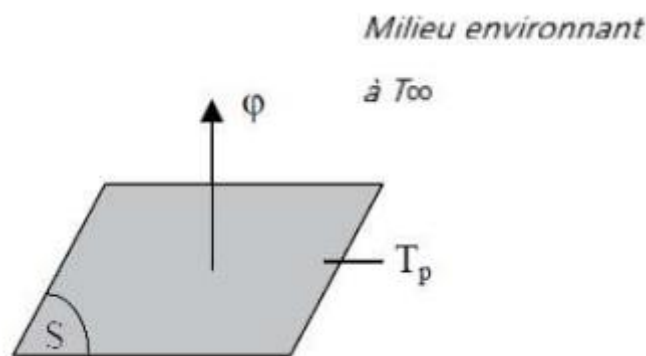


Figure II.16 : Schéma du transfert de chaleur radiatif.

La loi fondamentale du rayonnement est celle de Stefan-Boltzmann :

$$q = \sigma \cdot \epsilon_p \cdot S (T_p^4 - T_\infty^4) \dots \dots \dots (II.3)$$

q : Flux de chaleur transmis par rayonnement (W)

σ : Constante de Stefan ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$)

ϵ_p : Facteur d'émission de la surface

T_p : Température de la surface (K)

T_∞ : Température du milieu environnant la surface (K)

S : Aire de la surface

Dans un capteur solaire plan le transfert par rayonnement s'effectue entre :

- La vitre et le ciel.
- La vitre et la plaque chauffante.
- L'isolant et le sol.

II.6 : L'énergie solaire et environnement

En tant que source d'énergie renouvelable, l'énergie solaire est considérée comme une source d'énergie propre et durable. Par conséquent, l'utilisation de cette énergie est sans aucun doute une amélioration en termes de son impact sur l'homme et la terre.

II.6.1 : Impacts sur la planète

- L'énergie du soleil est la source d'énergie la plus renouvelable,
- Le silicium est l'un des matériaux les plus abondants dans la croûte terrestre, et c'est aussi le matériau le plus utilisé aujourd'hui, de sorte que l'énergie solaire peut préserver les ressources naturelles,
- L'utilisation de cellules photovoltaïques permet de réduire l'énergie consommée pour produire de l'électricité, l'énergie dite intrinsèque,
- La fabrication de panneaux solaires utilise principalement des matériaux recyclables ou valorisables. Le silicium provient généralement de déchets de produits électroniques, le verre de support et l'aluminium proviennent du cadre et les fixations mécaniques sont des matériaux qui ont bénéficié de filières de recyclage complètes.
- L'électricité produite par les générateurs photovoltaïques n'émet pas de gaz à effet de serre, ni ne produit une pollution équivalente aux méthodes de production traditionnelles.

-Énergie fiable et durable ; les générateurs photovoltaïques sont modulaires, faciles à installer et à entretenir.

II.6.2 : Impact sur l'homme

-Cette industrie minimise les déchets toxiques. La pollution générée lors de la fabrication des cellules solaires est relativement faible, et il n'y a absolument aucune émission de substances toxiques lors de la production d'électricité à travers des panneaux solaires.

-C'est une technologie qui favorise la santé publique. Surtout dans les pays où la densité de population est faible et l'électrification est généralement faible,

-C'est une technologie qui favorise le développement humain, elle améliore le niveau de vie des habitants,

-Par conséquent, cette technologie peut empêcher les exode rural et l'urbanisation à grande échelle qui sont difficiles à gérer dans certains pays qui ne peuvent pas fournir des emplois et un logement décent à tous ces immigrés,

-De manière générale, il existe un lien direct entre l'amélioration du niveau de vie et la baisse de la natalité : la production d'énergie photovoltaïque favorise indirectement l'ajustement de la surpopulation mondiale.

-Dans les pays où des panneaux solaires sont produits, et partout où des panneaux solaires sont vendus, installés et entretenus, la technologie photovoltaïque apportera de l'activité économique et de l'emploi.

II.7. Conclusion

L'énergie solaire est de plus en plus utilisée. Cependant, devons-nous vraiment développer cette énergie ? Son point fort est qu'elle ne pollue pas mais n'oublions pas son le principal problème : elle est disponible uniquement le jour. Même si certains systèmes permettent de produire quelques heures après le coucher du soleil, le stockage électrique est entre trop peu efficace pour que le soleil puisse être utilisé comme unique source d'électricité. De plus, l'énergie solaire ne pourra jamais réellement servir aux transports (du moins dans un futur proche), qui sont la principale cause de pollution atmosphérique. Notons que les systèmes passifs n'engagent que peu d'intérêt car en plus d'avoir toujours existé, ils ne nécessitent pas d'investissements massifs : seul un petit surcoût est nécessaire à la construction. Cependant, leur efficacité est moins importante que celle des systèmes actifs.



CHAPITRE III
panneaux photovoltaïques

III.1. Introduction

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

III.2. Solaire photovoltaïque

Contrairement à l'énergie solaire thermique qui utilise le soleil comme source de chaleur, l'énergie solaire photovoltaïque utilise le soleil comme source de lumière en transformant en électricité l'énergie des photons arrivant à la surface de la terre. La lumière solaire (photons) transmet son énergie aux électrons continue dans un semi-conducteur (qui constitue une cellule photovoltaïque). Cette transformation (effet photovoltaïque) est sans action mécanique, sans bruit, sans pollution et sans combustible. Le mot(photovoltaïque) vient du mot(photo) ((du grec(phos) qui signifie(lumière))) et du mot (volt) ((patronyme du physicien Alessandron Volta qui a contribué de manière très importante à la recherche en électricité)).

[20.21]

III.3. Les étapes pour la fabrication des cellules solaires

Pour fabriquer un système photovoltaïque il faut passer par plusieurs étapes qui sont vraiment nécessaires en commençant par l'élaboration du silicium et en arrivant finalement à l'assemblage et le montage des systèmes photovoltaïques.

- Etape 1 : Elaboration du silicium de grade solaire à partir du silicium métallurgique, lui-même obtenu à partir de quartz.
- Etape 2 : Cristallisation de ce silicium solaire pour former des cellules.
- Etape 3 : Transformation de ces cellules en silicium cristallisé en composant actif pour devenir une cellule photovoltaïque.
- Etape 4 : Assemblage des cellules photovoltaïques en module photovoltaïque.
- Etape 5 : Groupement de plusieurs modules pour réaliser un système photovoltaïque.



Figure III-1 : La chaîne de fabrication des modules photovoltaïques [22]

III.4. Cellules et panneaux photovoltaïques

III.4.1. Historique

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

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.

1954 : Trois chercheurs américains Chapin, Peason et Prince fabriquent une cellule Photovoltaïque.

1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % ; les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

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

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

III.4.2 Principe du photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule. La Figure III.2 illustre une cellule PV typique. Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au Bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore), créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par les semi-conducteurs, ils transmettent leurs énergies aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons (charges N) et des trous (charges P) créent alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positive et négative de la cellule. La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul, cette tension est nommée tension de circuit ouvert V_{OC} . Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées ; il est appelé courant de court-circuit I_{SC} et dépend fortement du niveau d'éclairement.

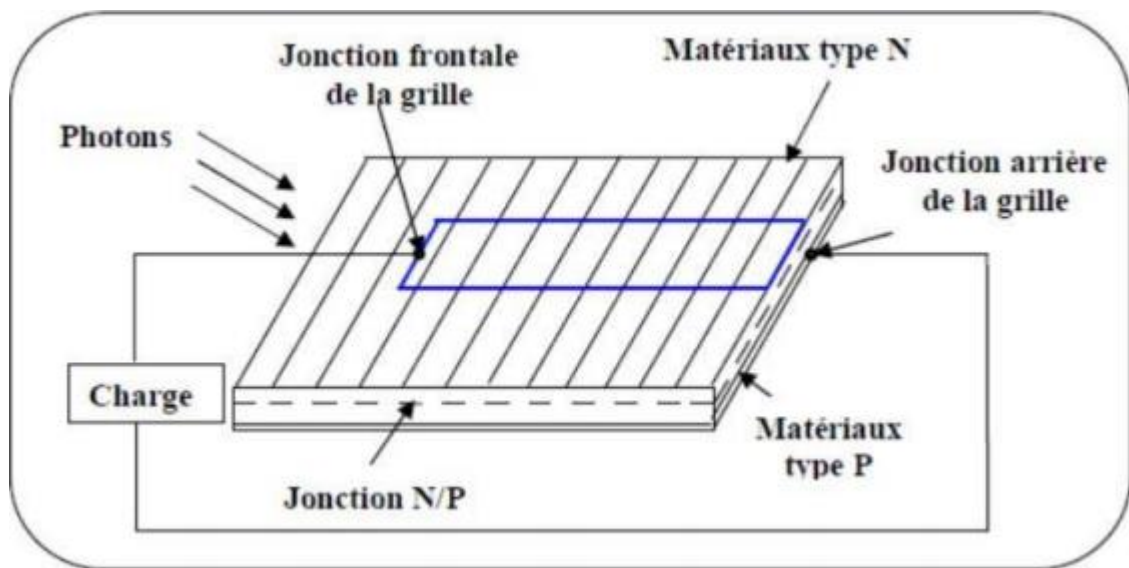


Figure III.2: Le principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule Photovoltaïque

III.4.3. Définition des cellules solaires :

Les cellules solaires sont des dispositifs qui convertissent l'énergie solaire directement en électricité, soit directement par l'effet photovoltaïque, ou indirectement par converti la première énergie solaire en énergie thermique ou chimique. [23]

La forme la plus commune des cellules solaires sont basés sur le photovoltaïque en vigueur en ce qui la lumière tombant sur un dispositif à deux couches semi-conducteur produit une différence photo-voltage ou potentiel entre les couches. Cette tension est capable de conduire un courant à travers un circuit externe et ainsi produire une œuvre utile. [24]

III.4.4. Structure physique de la cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est réalisée à partir d'une jonction PN d'un matériau semi-conducteur (silicium) dopé en volume avec un élément tel que le bore qui le rend positif (zone p) et contre dopé dans une zone superficielle avec du phosphore qui le rend négatif (zone n). Le champ électrique qui règne à la jonction de ces deux zones dopées différemment sépare les charges électriques photo-générées par la lumière solaire (paires électron-trou) et assure leur évacuation du cristal (les électrons par la cathode et les trous par l'anode) sous une tension de l'ordre de 0,5 volt et un courant continu de l'ordre de 30 mA pour chaque cm^2 de capteur sous un ensoleillement maximum de 1 kW/m^2 . [25]

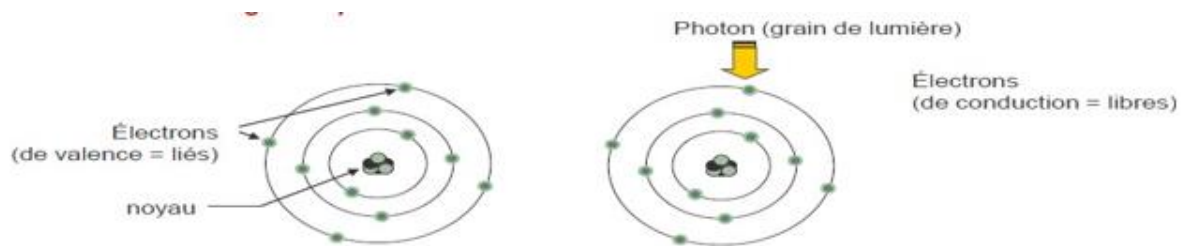


Figure III.3 Structure d'un atome et extraction d'un électron par un photon.

III.5. Les couches formant la cellule solaire

III.5.1. Couche semi-conductrice de type p (collecteur)

Le matériau semi-conducteur contient des atomes externes qui possèdent une quantité inférieure d'électrons libres. On obtient ainsi un excédent positif de porteurs de charge (trous d'électrons) dans le matériau semi-conducteur. Ces couches sont appelées des couches semi-conductrices à conduction de type p (base), sont pour rôle de motiver les piègeages de porteurs minoritaire.

III.5.2. Couche semi-conductrice de type n (émetteur)

Le semi-conducteur contient des atomes externes qui possèdent une quantité supérieure d'électrons libres. On obtient ainsi un excédent négatif de porteurs de charge (électrons) dans le

matériau semi-conducteur. Ces couches sont appelées des couches semi-conductrices à conduction de type n (émetteur) sont plus mince que la base et fortement dopé.

III.5.3. Doigts de contact et contact métallique de la face arrière

Avec le contact métallique arrière, les doigts de contact constituent les connexions permettant de brancher par exemple un consommateur.

III.5.4. Couche anti-réflexion (CAR)

La couche anti-réflexion a pour but de protéger la cellule PV et de réduire les pertes de réflexion à la surface de la cellule, Différentes CAR sont utilisées en photovoltaïque : TiO_2 , SiO_2 , ZnS , MgF_2 , SiN_x , etc. [26]

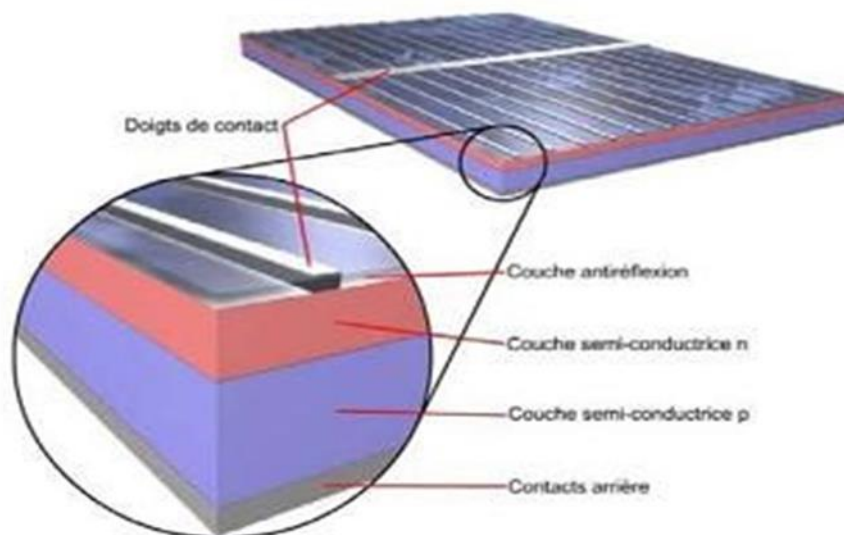


Figure III.4 Les différentes couches d'une cellule solaire.

III.6. Les différentes technologies photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque peut être réalisée avec de nombreux semi-conducteurs. En réalité, il existe aujourd'hui trois principales technologies : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques. Ces filières se partagent inégalement le marché comme le montre la Figure III.5.

Ces technologies coexistent sur le marché dans des proportions équivalentes depuis de nombreuses années malgré des prix et des rendements très différents. L'augmentation des rendements focalise particulièrement l'intérêt des chercheurs. [27]

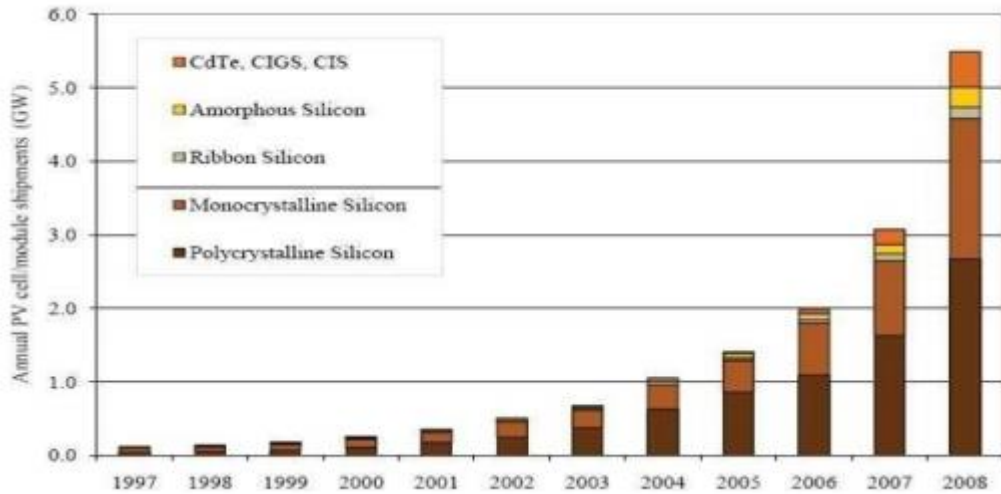


Figure III.5 Evolution de la production mondiale des différentes technologies de cellules PV [27]

III.7. Association des modules Photovoltaïques

III.7.1. Mise en série

Une association de N_s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, dans La Figure III.6. L'équation (III-1) résume les caractéristiques électriques d'une association série de ns cellules.

$$V_{co} = N_s \cdot V_{co} \dots\dots\dots(III-1)$$

Avec :

V_{co} : la tension du circuit ouvert

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce. Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible.

L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble. Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellules en série ($V_{cons}=0.6V \cdot 36=21.6V$) afin d'obtenir une tension optimale du panneau V_{op} proche de celle d'une tension de batterie de 12V. [28]

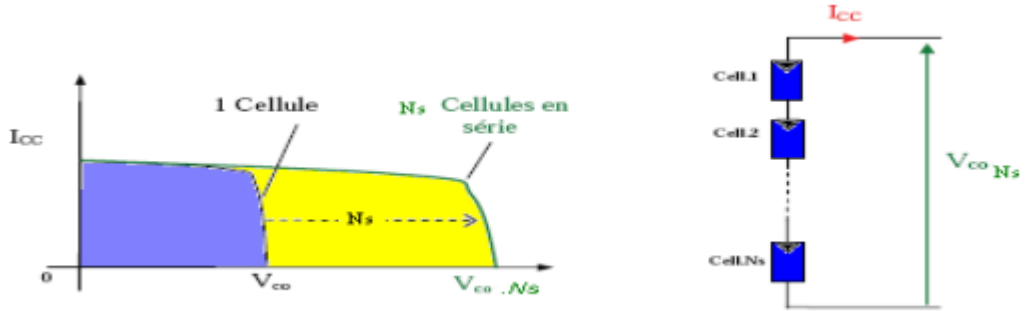


Figure III.6 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série

III.7.2. Mise en parallèle

D'autre part, une association parallèle de N_p cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants, Figure I-9. L'équation (III.2) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de N_p cellules.

$$I_{CC} = N_p \cdot I_{CC} \dots\dots\dots(III-2)$$

Avec

I_{CC} : le courant de court-circuit ;

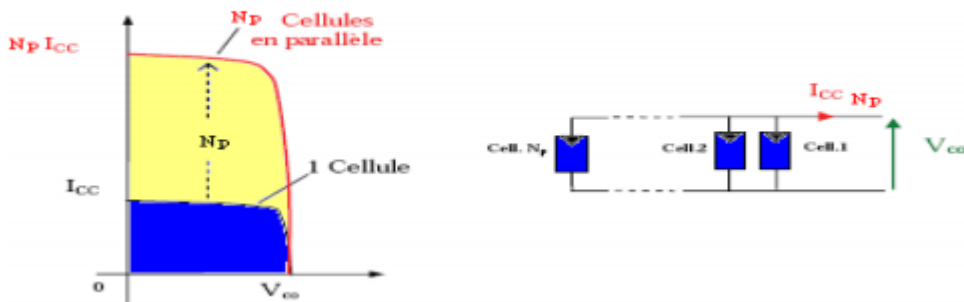


Figure III.7 Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle

III.8 Caractéristiques électriques et paramètres de la cellule photovoltaïque

La courbe de la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est montrée dans la Figure III.8 Dans des conditions de court-circuit, le courant généré est à son maximum (I_{sc}), tandis que lorsque le circuit est ouvert, la tension (V_{oc} =tension du circuit ouvert) est à son maximum. Dans les deux conditions susmentionnées, l'énergie électrique produite dans la cellule est nulle, alors que dans toutes les autres conditions, lorsque la tension augmente, l'énergie produite augmente également : elle atteint tout d'abord le Maximum Power Point (Pm) puis elle chute soudainement jusqu'à approcher la valeur de tension à vide.

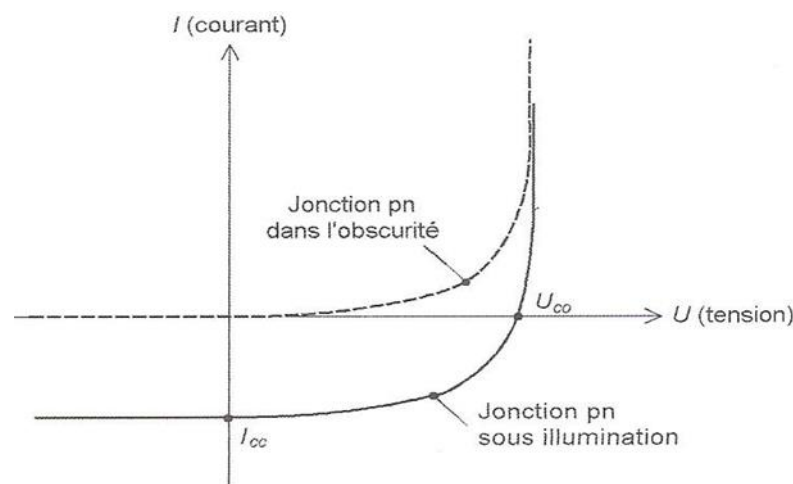


Figure III.8 Caractéristique courant-tension et paramètres physique d'une cellule photovoltaïque

III.8.1. Zones de fonctionnement d'un module photovoltaïque

Les différentes zones de fonctionnement sont les suivantes :

- Zone 1 – 2 : fonctionnement en générateur de tension.
- Zone 2 – 3 : zone préférée pour le fonctionnement du module, le point de fonctionnement optimal défini par le courant I_{mp} et la tension V_{mp} est celui où le module délivre sa puissance maximale.
- zone 3- 4 : fonctionnement en générateur de courant constant proportionnel à l'éclairement.

Pour confronter un peu plus notre modèle à la réalité, il est nécessaire d'étudier comment certains paramètres, tels que le rayonnement reçu, ou la température de jonction vont influencer la caractéristique courant-tension. [29]

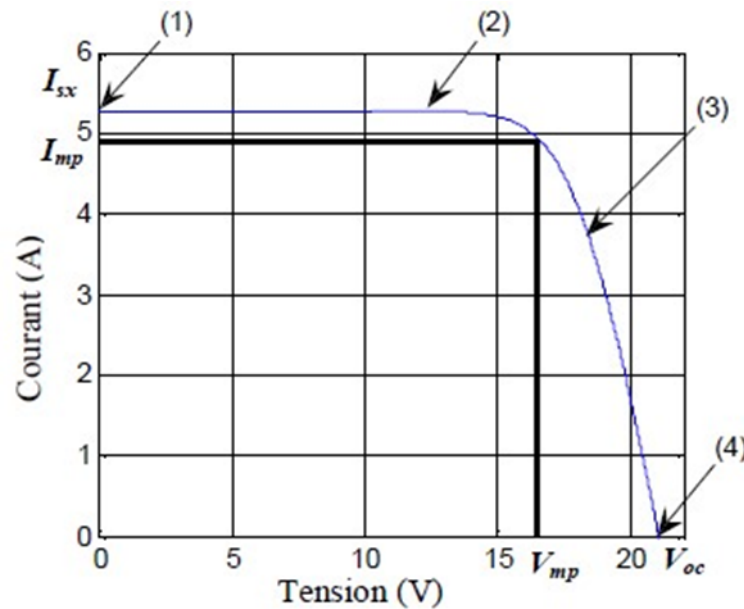


Figure III.9 Caractéristique I(V) et Les différentes zones de fonctionnement d'un module photovoltaïque

III.8.2 les paramètres de la cellule photovoltaïque

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelées paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique I(V).

A-Courant de court-circuit (I_{cc}) :

Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface active de la cellule, de la mobilité des porteurs. Ce courant est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue.

B-Tension de circuit ouvert (V_{oc}) :

Comme son nom l'indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle

dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle dépend de plus de l'éclairement de la cellule. [30]

$$V_{oc} = \frac{KTC}{q} \log\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \dots \dots \dots (III-3)$$

$\frac{kt}{q}$: représente le potentiel

thermodynamique

q : charge de l'électron
($1.9 \cdot 10^{19}$ Coulombs).

k : la constante de Boltzmann. $1.38 \cdot 10^{23}$ J/K

I_{ph} le courant photonique

I_s : courant de saturation.

T_c : température absolue (en kelvin).

C- facteur de forme (FF) :

Un paramètre important est souvent utilisé a partir de la caractéristique I(V) pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou fill factor (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle ($I_{cc} \cdot V_{oc}$) plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales. [31]

il est défini la relation suivante:

$$FF = \frac{V_{mlm}}{V_{colcc}} \dots \dots \dots (III-4)$$

D-Rendement de conversion d'énergie η

Le rendement, des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente, P_{in} . [32]

$$\eta = \frac{V_{mlm}}{P_0} = FF \frac{V_{colcc}}{P_0} \dots \dots \dots (III-5)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule.

III.8.3. Fonctionnement à puissance maximale

La caractéristique électrique P(V) de ce type de GPV s'avère proche de celle d'une cellule PV aux rapports de proportionnalités près. Ces rapports dépendent du nombre des cellules connectées en série et de nombre de branche des cellules associées en parallèle. Cette caractéristique est également non linéaire et présente un point de puissance maximale (PPM) caractérisé par un courant et une tension nommés respectivement, comme pour la cellule, I_{max} et V_{max} sur la figure III.10 nous pouvons observer l'évolution du PPM d'un module commercial typique de 80W crêtes constitué de 36 cellules monocristallines en série, en fonction de la température et de l'éclairement.

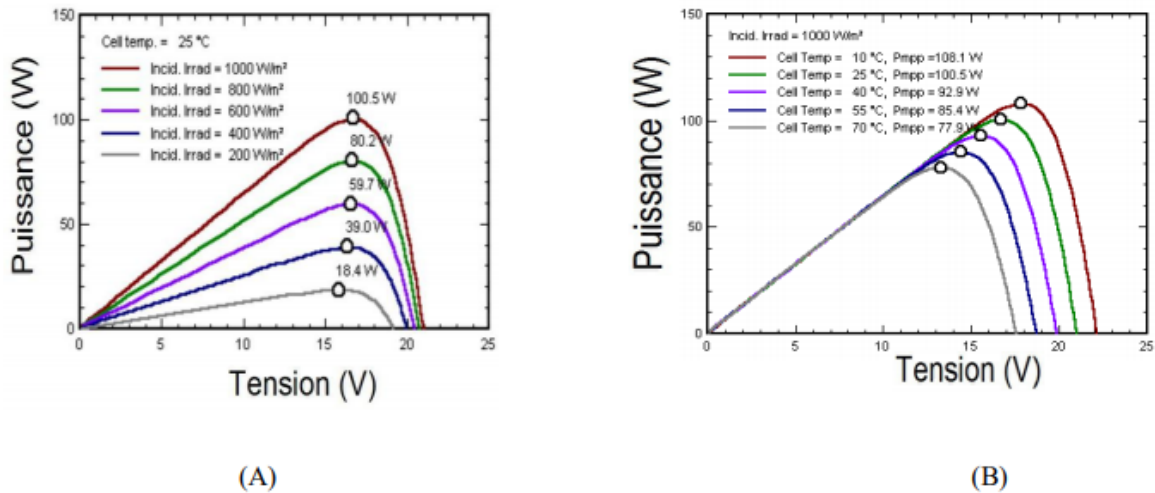


Figure III.10 Evolution du PPM d'un module photovoltaïque d'une puissance crête de 80W en fonction de l'éclairement (A) et de la température (B)

Dans un système électrique comprenant une source et une charge, la recherche du point de fonctionnement optimal par des techniques d'optimisation représente ce qui est le plus important. Dans le cas du photovoltaïque, cette démarche est plus complexe du fait que la caractéristique des cellules dépend fortement de l'ensoleillement et de la température ambiante, entre autres. Il faut trouver un dispositif permettant de fonctionner à tout moment suivant le

point de fonctionnement optimal. Différentes méthodes de maximisation de puissance classées en deux catégories : les méthodes indirectes, utilisent des bases de données regroupant les caractéristiques des panneaux photovoltaïque(PV) dans différentes conditions climatique (température, ensoleillement...) mais aussi des équations mathématiques empiriques permettant de déterminer le point de puissance maximum et les méthodes directes, sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est base sur la variation de ces mesures .L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturb & Observe (PetO), l'incrément de conductance.

III.8.4 Influence de l'éclairement et de la température

La caractéristique d'une cellule PV (ou d'un générateur PV) est directement dépendante de l'éclairement et de la température.

Les variations du courant et de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairements a température maintenue constante 25°C figure III.11 montrent clairement l'existence de maxima sur les courbes de correspondant aux point de puissance maximale Pmax lorsque l'irradiation varie pour une température donnée, le courant de court-circuit Icc varie proportionnellement a l'irradiation, dans un même temps, la tension de circuit ouvert Vco (a vide) varie très peu.

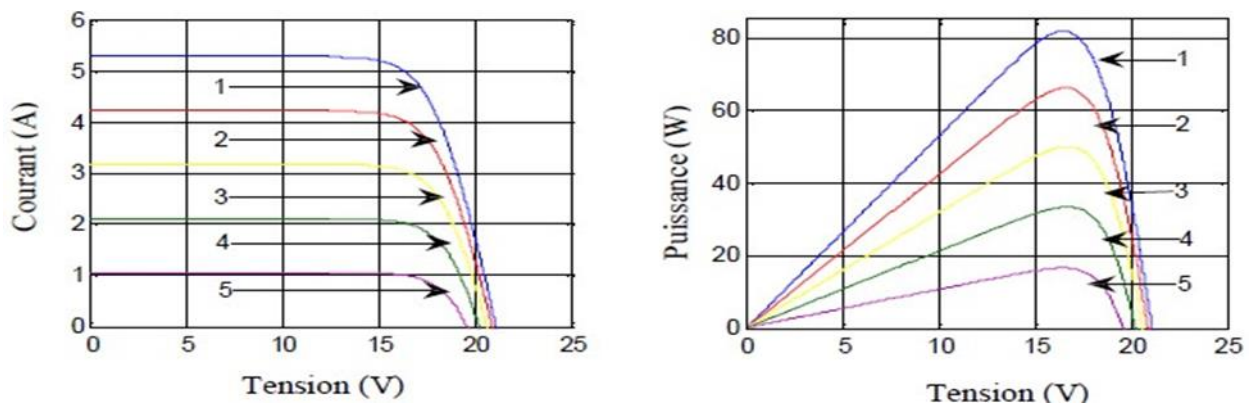


Figure III.11 Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V) et P(V) à T=25°C

(1) :1000W/m² ; (2) : 800W/m² ; (3) : 600W/m² ; (4) :400W/m² ; (5) :200W/m².

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaire. la température a également une influence sur la caractéristique d'un générateur PV, la figure III.12 présente la variation des caractéristiques d'un cellule PV en fonction de la température a un éclairement donnée, l'éclairement est ici fixé a 1000w/m^2 .

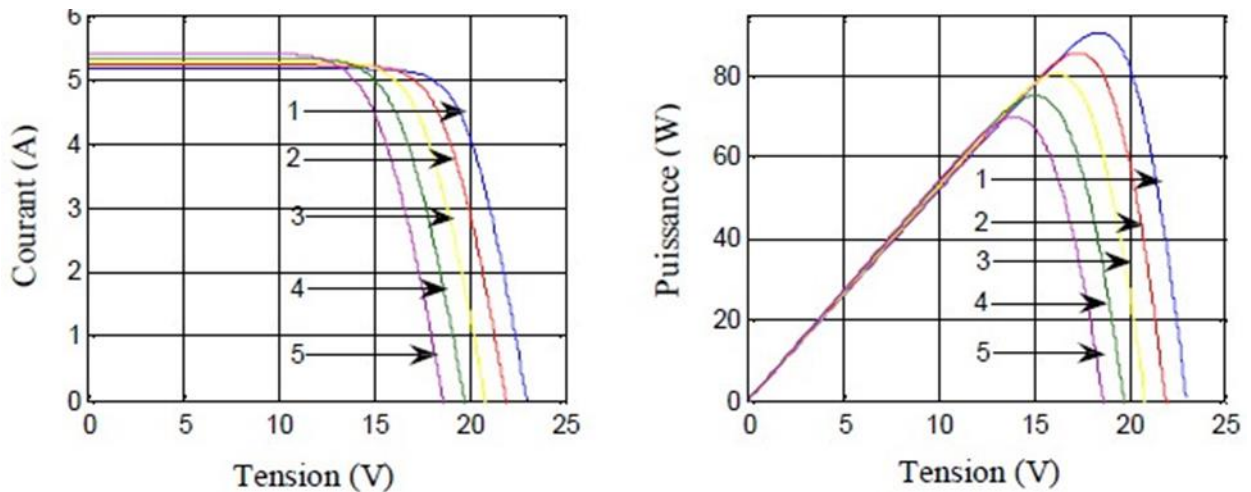


Figure III.12 Influence simultanée de l'éclairement et la température sur la caractéristique $I(V)$ (1) : 1000W/m^2 , 55°C ; (2) : 800W/m^2 , 44°C ; (3) : 600W/m^2 , 40°C ; (4) : 400W/m^2 , 32°C ; (5) : 200W/m^2 , 25°C .

Par contre, si la température croit a irradiation constante, la tension a vide V_{co} décroît avec la température. Plus la température est élevée plus V_{co} est faible et le courant de court-circuit I_{cc} augmente avec la température. Cette hausse est nettement moins important que la baisse de tension. L'influence de la température sur I_{cc} peut être négligée dans la majorité des cas.

La température et l'éclairement sont donc les deux principaux qui vont modifier la caractéristique d'un générateur PV. Ces paramètres devant donc être étudiés avec soin lors de la mise en place d'une installation PV.

III.8.5 Constitution d'un module photovoltaïque

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).

Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant. [32]

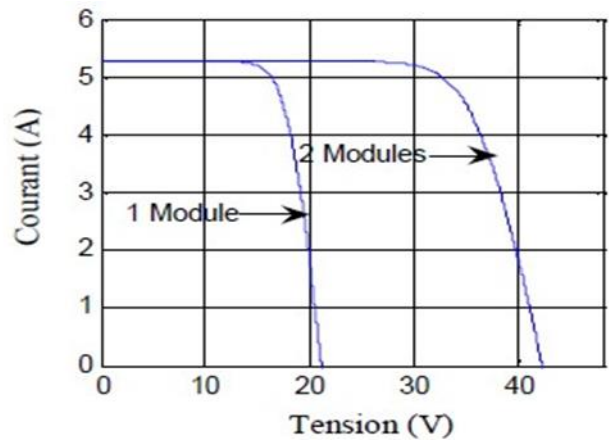
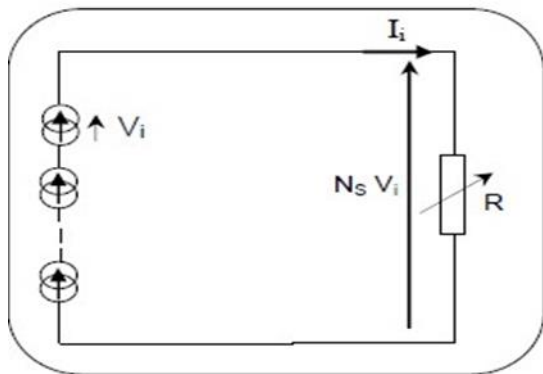


Figure III.13 Groupement des cellules PV en série

Tandis que les connexions en parallèle de plusieurs cellules augmentent le courant pour la même tension Figure III.14.

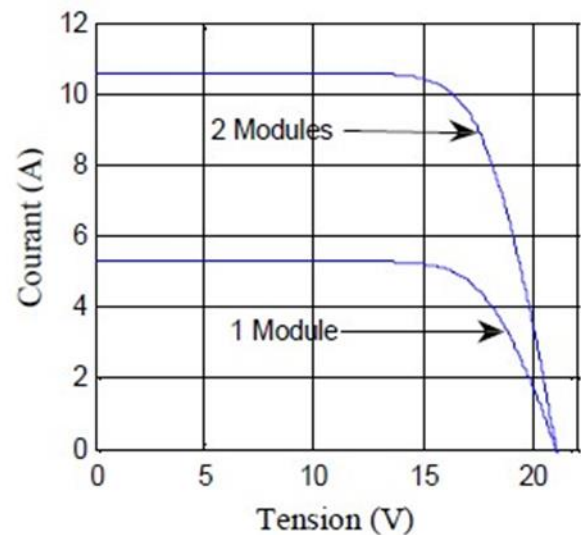
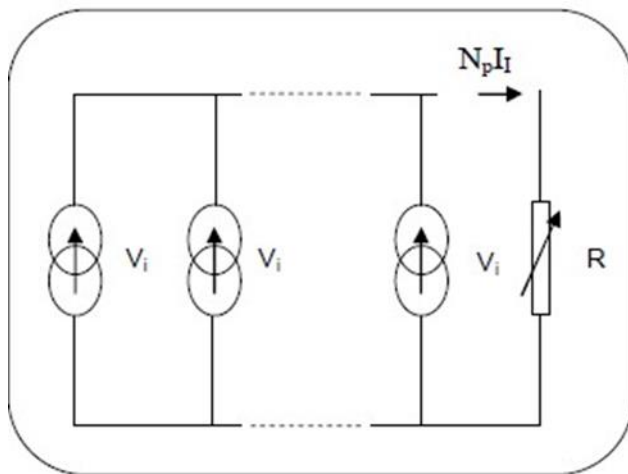


Figure III.14 Groupement des cellules en série

La plupart des panneaux PV commercialisés sont constitués par des sous réseaux de cellules connectées en série. Chacun de ses sous réseaux est lui-même constitué d'un groupe de cellules PV connectées en série. Le nombre de cellules par sous réseaux est un compromis économique entre protection et pertes d'une partie importante du GPV en cas de défaut partiel. La figure III.15 montre le schématique classique adopté pour un GPV élémentaire, le fonctionnement traditionnel comprend la connexion d'une diode by-pass et une diode anti-retour.

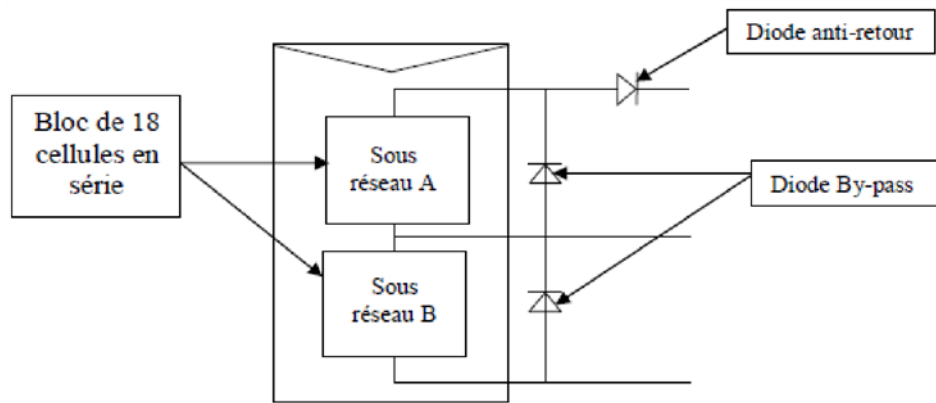


Figure III.15 Schématisation d'un GPV élémentaire avec diode by-pass et diode anti-retour

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.

L'ensemble des cellules doit être encapsulé sous verre ou sous composé plastique. L'ensemble est appelé module photovoltaïque. Un module est souvent constitué de 36 ou 72 Cellules, et l'ensemble des modules photovoltaïques est appelé champ photovoltaïque. [33]

III.9. La fabrication des cellules photovoltaïques

Le constituant essentiel d'une cellule photovoltaïque responsable de l'effet photovoltaïque est un semi-conducteur. Le semi-conducteur le plus utilisé aujourd'hui est le silicium. Nous évoquerons donc uniquement le silicium dans cette présentation, mais d'autres semi-conducteurs existent tel que le sélénium, le tellure de cadmium, etc. [34.35]

III.9.1 La silice : matière première d'une cellule photovoltaïque

La silice est un composé chimique nommé aussi dioxyde de silicium, de formule chimique SiO_2 . La silice est l'élément le plus répandu dans la croûte terrestre après l'oxygène. Il représente 25 % de la masse de la croûte terrestre.

La silice se présente sous la forme d'un minéral dur. Dans la nature, on la trouve en grande quantité dans :



Figure III.16 sable(SiO_2).

Les roches sédimentaires détritiques (sables, grès),

* Les roches métamorphiques, (schistes, gneiss, quartzites) (Les roches métamorphiques sont formées par la recristallisation (et généralement la déformation) de roches sédimentaires ou de roches magmatiques sous l'action de la température et de la pression qui croissent avec la profondeur dans la croûte terrestre ou au contact d'autres roches.

- Les roches magmatiques.

- L'extraction de la silice s'effectue dans des carrières de silice.

Deux technologies de cellules photovoltaïques sont présentes aujourd'hui :

- Les cellules dites cristallines

- Les cellules dites couches minces

III.9.2. Extraction et purification du silicium

A- Extraction du silicium à partir de la silice

Le silicium est un élément chimique de symbole Si. Il n'existe pas à l'état pur dans la nature. Le silicium (Si) est donc extrait de la silice (SiO_2) grâce à la réaction chimique simplifiée suivante : $SiO_2 + 2 C \rightarrow Si + CO$

Cette réaction se réalise dans un four à arc car elle nécessite de faire fondre la silice. La température du four peut atteindre 3 000 °C. La puissance du four peut aller jusqu'à 30 MW, afin d'enclencher les réactions chimiques.

Après cette opération, le silicium est obtenu sous forme liquide. Sa pureté est de 98 %. Il faut le purifier encore de plusieurs ordres de grandeur afin d'obtenir un matériau adéquate pour les applications photovoltaïques.

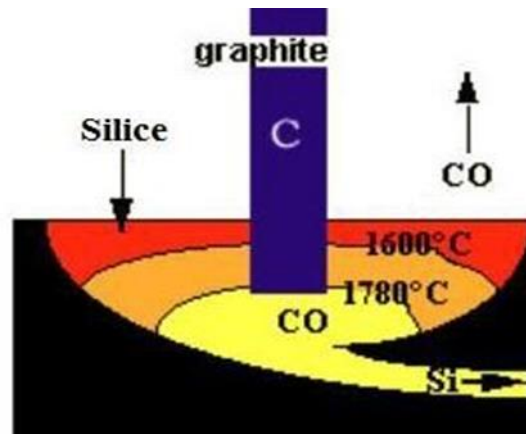


Figure III.17 Réacteur de réduction

B-Purification du silicium

Il s'agit, en partant du silicium métallurgique, de faire une purification chimique. De nombreux procédés ont été développés par les différents producteurs mondiaux de silicium. Au final, le procédé de purification aboutit à l'obtention de lingots de silicium purifiés à 99.99 % :

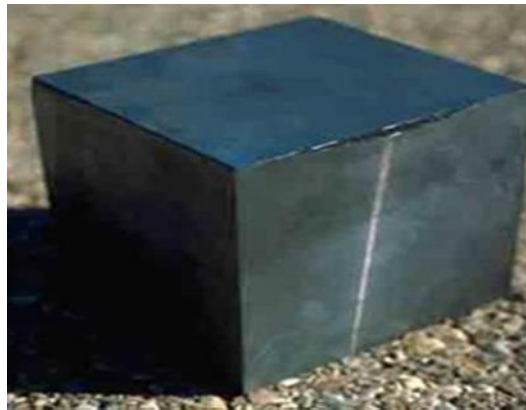


Figure III.18 Lingots de silicium purifiés à 99.99 %

III.9.3 Obtention des lingots de silicium

Une fois l'étape de purification terminée, vient l'étape de cristallisation du silicium liquide. Le produit issu de cette étape est un lingot de silicium à l'état solide. Il existe deux grandes méthodes de cristallisation. La première permet d'obtenir du silicium poly cristallin (composé de plusieurs cristaux). La deuxième permet d'obtenir du silicium monocristallin (composé d'un seul cristal).

A- Le silicium poly cristallin

Le silicium liquide est mis dans un creuset en graphite. La technique est simple et peu énergivore.

Le silicium poly cristallin est obtenu par coulage en lingotière dans laquelle s'opère un refroidissement lent, de l'ordre de quelques dizaines d'heures.

On obtient au final des lingots cubiques. Cette forme est recherchée afin d'optimiser l'espace lorsque les plaquettes (obtenues par découpage en lamelles des lingots de silicium) seront placées en série sur un module photovoltaïque.

Le silicium poly cristallin présente une couleur grise. Il est constitué d'une mosaïque de cristaux monocristallins de silicium, d'orientation et de tailles différentes.

B- Le silicium monocristallin

Une des méthodes pour fabriquer du silicium monocristallin est la méthode dite de Czochralski. Le silicium est placé dans un creuset de quartz et maintenu liquide à l'aide d'éléments chauffants. Lorsque la surface est à la température limite de solidification, on y plonge un germe monocristallin. Le silicium se solidifie sur ce germe selon la même orientation cristallographique. On tire lentement le germe vers le haut, avec un mouvement de rotation, tout en contrôlant minutieusement la température et la vitesse.

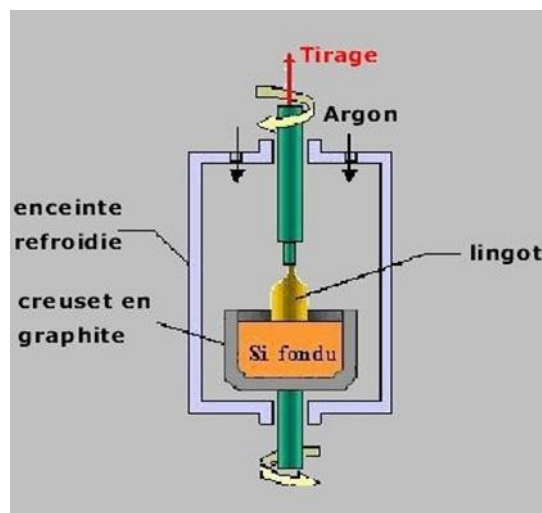


Figure III.19 Méthode de Czochralski

Le silicium monocristallin ainsi obtenu, sous forme de lingots circulaires, est constitué d'un seul type de cristal et présente une couleur uniforme grise.

Le silicium monocristallin, plus élaboré que le silicium poly cristallin, présente un rendement (conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique) supérieure. Sa production demande cependant une plus grande dépense énergétique.

L'équeutage consiste à éliminer les extrémités du lingot soit mal cristallisées soit riches en impuretés. Les extrémités sont ensuite refondues pour le départ d'un nouveau cycle de production.

Lors du tirage, le diamètre du lingot varie légèrement ce qui constitue des ondulations à sa surface. Pour obtenir des plaquettes de même diamètre un polissage cylindrique est nécessaire.

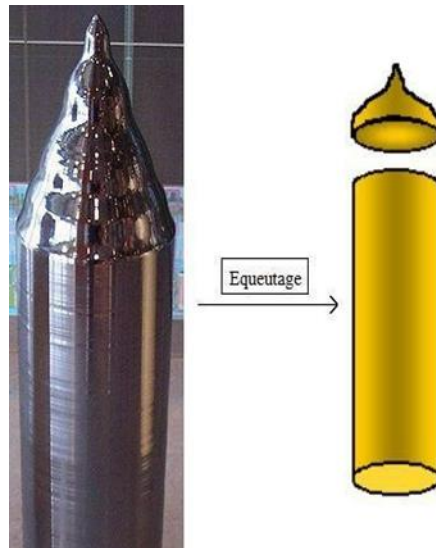


Figure III.20 Equeutage

III.9.4 Obtention des wafers photovoltaïques

Les lingots cylindriques (silicium monocristallin) ou parallélépipédiques (silicium poly cristallin) de silicium obtenus à l'issue de l'étape de solidification sont ensuite sciés en fines plaques de 200 micromètres d'épaisseur qui sont appelées « wafers » (en anglais, "wafer" signifie "galette"). La coupe des lingots est effectuée par une scie à fil.

Compte-tenu de la faible épaisseur des tranches à découpées (300 μm), le principal problème du sciage est la perte de découpe. Afin de minimiser ces pertes, la solution technique retenue est la scie à fil. En effet, la perte de découpe (kerf) typique des scies à fil est de 200 μm à 240 μm , ce qui représente 55% de perte en moins par rapport aux scies à diamètre intérieur (perte de découpe de 310 μm à 350 μm).

Avec une scie à fil, il faut donc 570 μm de silicium pour produire une tranche de 350 μm . L'étape du sciage représente un élément déterminant dans le coût de la production des cellules photovoltaïques.

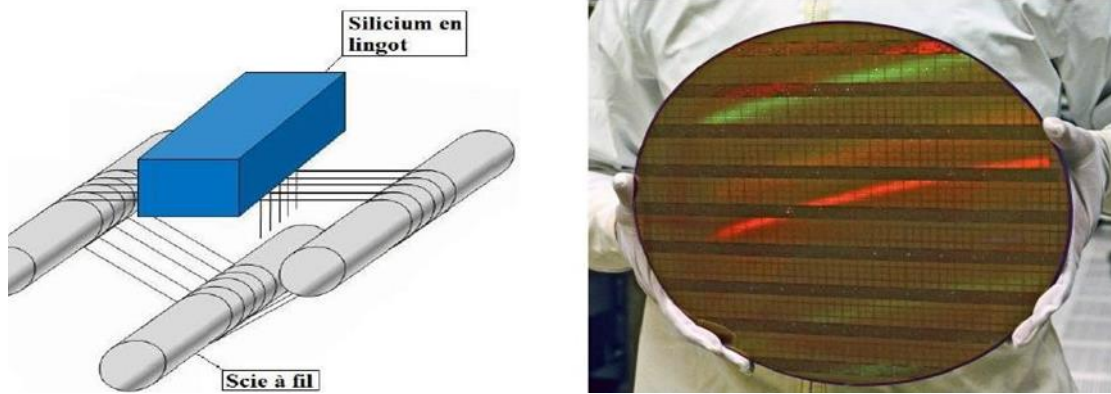


Figure III.21 La coup du lingot par une scie à fil

III.10. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité. La cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de deux couches de Silicium :

- Une couche possédant un excès d'électrons (zone N).
- Une couche possédant un déficit en électrons (zone P).

Lorsqu'un photon arrive, son énergie crée une rupture entre un atome de silicium et un électron, modifiant les charges électriques. C'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque, les atomes, chargés positivement, vont alors dans la zone P et les électrons, chargés négativement, dans la zone N, une tension électrique est ainsi créée.

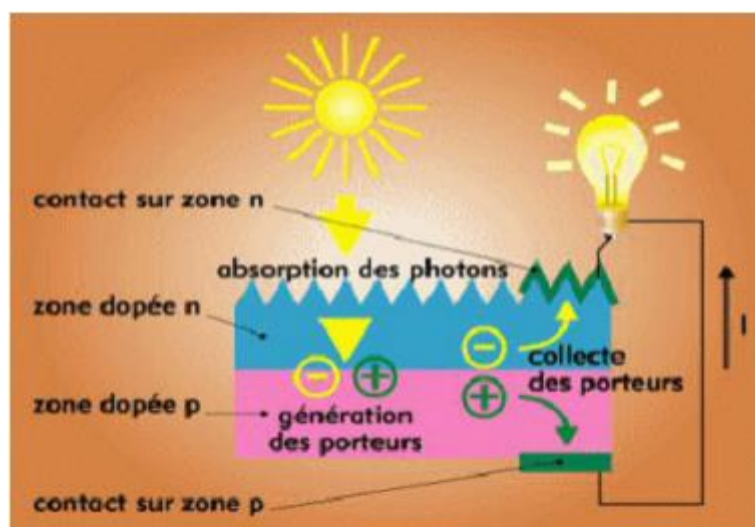


Figure III.22 Schéma du principe de fonctionnement d'une photopile. [36]

III.11. Le dopage

Le dopage est une méthode qui permet de modifier la conductivité du silicium. Cela consiste à introduire des impuretés dans un cristal intrinsèque dans le but de modifier ces propriétés électriques. Le Semi-conducteur dopé et appelé « semi-conducteur extrinsèque ». Il existe deux types de dopage : [37]

III.11.1. Dopage de type N

Le dopage de type N consiste à augmenter la densité en électrons dans le semi-conducteur. Pour ce faire, on inclut un certain nombre d'atomes riches en électrons dans le semi-conducteur. Par exemple, dans le cas du silicium (Si) on inclut un atome ayant cinq électrons de valence, comme ceux de la colonne V de la table périodique comme le phosphore (P) par exemple.

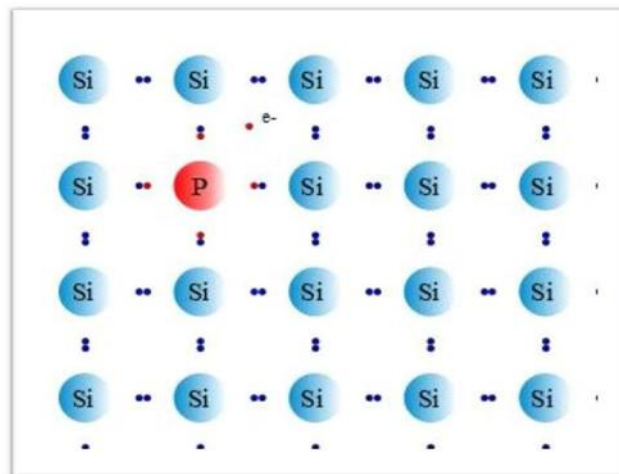


Figure III.23 Silicium dopé N

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 reste 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)

III.11.2. Dopage de type P

Le dopage de type P consiste à augmenter la densité en trous dans le semi-conducteur en incluant un certain nombre d'atomes pauvres en électrons dans le semi-conducteur afin de créer un excès de trous. Dans l'exemple du silicium, on inclura un atome trivalent (colonne III du tableau périodique), généralement un atome de Bore.

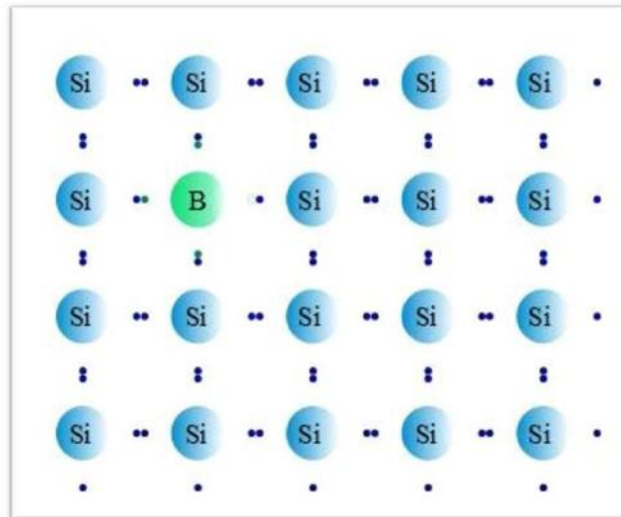


Figure III.24 Silicium dopé P

III.11.3. La jonction (P-N)

Les paires électron-trou qui sont créées dans la zone de charge dans de la jonction sont immédiatement séparées par le champ électrique qui règne dans cette région, et entraîné dans les zones neutres de chaque côté de la jonction. Si le dispositif est isolé, il apparaît une différence de potentiel aux bornes de la jonction et s'il est connecté à une charge électrique extérieure, on observe le passage d'un courant alors qu'on n'applique aucune tension au dispositif. C'est le principe de base d'une cellule photovoltaïque. [38]

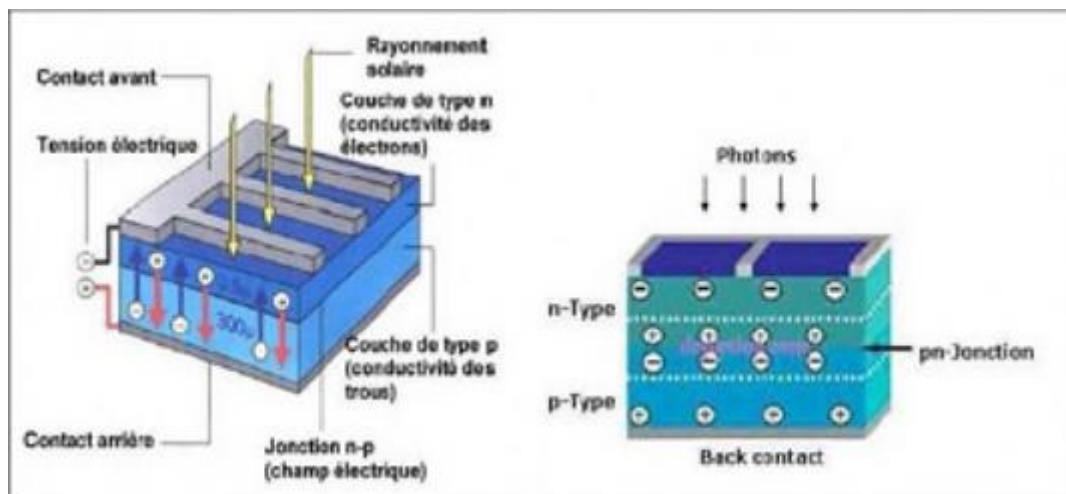


Figure III.25 Jonction P-N dans une cellule photovoltaïque.

III.11.4. Les 3 méthodes de dopages

- **La diffusion** : On utilise un four, dans lequel on injecte des gaz avec une solution dopante pour le silicium. Avec la chaleur, le dopant a une énergie suffisante pour entrer dans la plaquette

de silicium. Cette méthode est assez ancienne, et nécessite d'avoir une température uniforme dans le four.

-La Croissance Epitaxie : Cette méthode utilise toujours un four, mais cette fois-ci les atomes du dopant sont déposés sur le silicium qui se présente sous la forme d'une plaquette. On a ainsi un dépôt en surface, et non pas une insertion comme pour la méthode de dopage par diffusion. La température du four doit avoisiner les 1 200 °C.

-Le bombardement ionique : Une source (appelé faisceau ionique énergétique) produit des ions, qui sont ensuite accélérés, et par le biais d'un contrôle très précis, ceux-ci vont alors se positionner sur la plaquette. L'avantage de ce principe est que l'opération se déroule à température ambiante. Le défaut de cette technique est qu'elle peut provoquer des dommages au silicium induisant un réarrangement indésirable de sa structure cristalline, exigeant ainsi une recristallisation subséquente

■ De la silice au silicium...

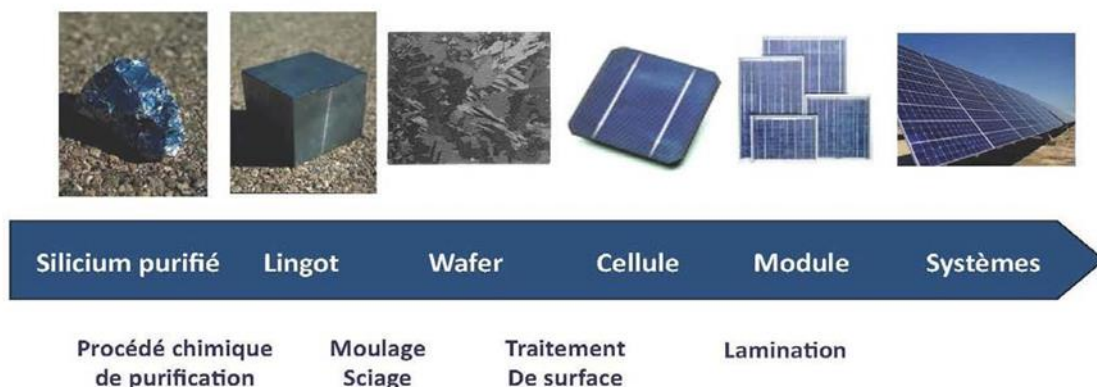


Figure III.26 Les étapes de fabrication d'une cellule solaire. [39]

III.12. Types de cellules et panneaux photovoltaïques

La cellule est l'unité de conversion la plus adaptée à l'effet photovoltaïque. Comme l'affirme le document [40] et le site [41], les matériaux et la méthodologie utilisée pour la conception de ces cellules influent sur l'énergie récupérée. Il en résulte que de nombreuses solutions ont été développées et nous allons brièvement les présenter.

III.12.1. Panneaux en silicium cristallin

A l'heure actuelle, les panneaux en silicium cristallin sont les plus utilisés et sont divisés en deux catégories : [42]

A-Silicium monocristallin

Figure III.27 les panneaux monocristallins sont composés de cristaux de silicium de grande pureté. Le lingot de silicium monocristallin a une forme cylindrique, un diamètre de 13-20 cm et une longueur de 200 cm, et est obtenu par la croissance d'un cristal filiforme en lente rotation. Ce cylindre est ensuite coupé en plaquettes de 200-500 μm d'épaisseur et la surface est traitée pour obtenir des « micro rainures » visant à minimiser les pertes par réflexion. Le principal avantage de ces cellules est leur efficacité (14 à 17%), leur longue durée de vie et la conservation des caractéristiques avec le temps³.

Le coût de ces modules est d'environ 3.2 à 3.5 €/W et les panneaux élaborés avec cette technologie sont généralement caractérisés par une couleur bleu foncé⁴.



Figure III.27 Panneau en silicium monocristallin

B-panneaux en silicium poly cristallin

Figure III.28 ou les cristaux constituant les cellules s'agrègent en prenant différentes formes et sens. En fait, les irisations typiques des cellules en silicium poly cristallin sont causées par les différents sens des cristaux et donc par le comportement différent par rapport à la lumière. Le lingot de silicium poly cristallin est obtenu en faisant fondre et en coulant le silicium dans un moule en forme de parallélépipède.

Les plaquettes ainsi obtenues ont une forme carrée et des stries caractéristiques de 180-300 μm d'épaisseur. L'efficacité est inférieure à celle du silicium monocristallin (12 à 14%), toutefois le coût est plus avantageux, de 2.8 à 3.3 €/W. La durée de vie est élevée (comparable

a celle du silicium monocristallin) de même que la conservation des performances avec le temps (85% de l'efficacité initiale après 20 ans). Les cellules élaborées à partir de cette technologie peuvent être reconnues à leur surface présentant des grains de cristaux assez visibles.

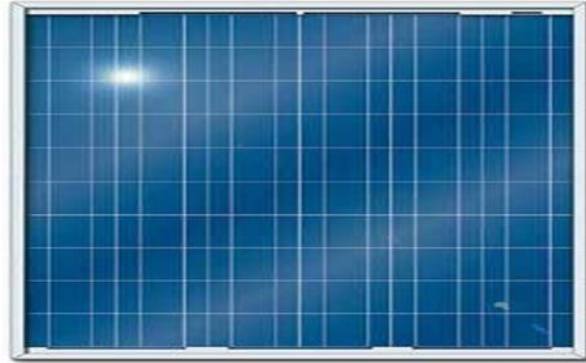


Figure III.28 Panneau en silicium poly cristallin

III.12.2 Panneaux à couche mince

Les cellules à couche mince sont composées de matériau semi-conducteur déposé, généralement sous forme de mélanges gazeux, sur des supports tels que le verre, les polymères, l'aluminium, qui donnent une cohérence physique au mélange. La couche mince de semi-conducteur a quelques μm d'épaisseur par rapport aux cellules en silicium cristallin qui en comptent des centaines. Par conséquent, l'économie de matériau est remarquable et la possibilité d'avoir un support flexible augmente le champ d'application des cellules à couche mince Figure III.29. [43]

Les matériaux utilisés sont les suivants :

- silicium amorphe
- CdTeS (Tellure de cadmium-Sulfure de cadmium)
- GaAs (Arséniure de gallium)
- CIS, CIGS et CIGSS (Alliages de cuivre iridium di séléniure)



Figure III.29 Modules à couche mince

A-silicium amorphe :

Le silicium amorphe (symbole a-Si) déposé sous forme de couche mince sur un support (par ex. aluminium) permet d'avoir une technologie PV à un coût réduit par rapport au silicium cristallin, toutefois l'efficacité de ces cellules a tendance à diminuer au fil du temps. Le silicium amorphe peut également être « vaporisé » sur une couche mince de plastique ou de matériau flexible. Il est surtout utilisé lorsqu'il est nécessaire de réduire au maximum le poids du panneau et de l'adapter à des surfaces courbes. L'efficacité de l'a-Si (5% à 6%) est très faible en raison des nombreuses résistances rencontrées par les électrons qui circulent. Les performances des cellules ont également tendance à diminuer dans le temps. Une application intéressante de cette technologie est le « tandem », combinant une couche de silicium amorphe à une ou plusieurs couches de silicium cristallin multi-jonctions ; grâce à la séparation du spectre solaire, chaque jonction montée en série donne son meilleur rendement et garantit des niveaux supérieurs en termes d'efficacité et d'endurance.

B-CdTeS (Tellure de cadmium-Sulfure de cadmium)

Les cellules solaires CdTeS sont composées d'une couche P (CdTe) et d'une couche N (CdS) qui forment une jonction P-N.

Les cellules en CdTeS ont une plus grande efficacité que les cellules en silicium amorphe : 10% à 11% pour les produits industriels (15.8% dans les laboratoires d'essais). La production à grande échelle de la technologie CdTeS pose un problème environnemental en raison du CdTe contenu dans la cellule : étant donné qu'il n'est pas soluble dans l'eau et qu'il est plus stable que d'autres composés contenant du cadmium, il peut s'avérer problématique s'il n'est pas correctement recyclé ou utilisé. Le coût unitaire de ces modules varie de 1.5 à 2.2 €/W.

C-GaAs (Arséniure de gallium)

Actuellement, la technologie GaAs est la plus intéressante du point de vue de l'efficacité, qui est supérieure à 25 à 30%. Cependant, la production de ces cellules est limitée par le coût élevé et la rareté du matériau, principalement utilisé dans les « semi-conducteurs à grande vitesse » et l'industrie optoélectronique. En fait, la technologie GaAs est essentiellement employée dans les applications spatiales où la réduction du poids et des dimensions joue un rôle clé.

D-CIS, CIGS et CIGSS (Alliages de cuivre iridium di séléniure)

Les modules CIS/CIGS/CIGSS correspondent à une technologie qui est encore à l'étude et en cours de développement. Le silicium est remplacé par des alliages spéciaux tels que :

- cuivre, indium et sélénite (CIS) ;
- cuivre, indium, gallium et sélénite (CIGS) ;
- cuivre, indium, gallium, sélénite et soufre (CIGSS).

L'efficacité est actuellement de 10 à 11% et les performances restent constantes au fil du temps.

La part de marché des technologies à couche mince est encore très limitée ($\approx 7\%$), toutefois des solutions offrant des capacités supérieures à moyen et long terme sont envisagées afin de réduire considérablement les prix. En déposant directement la couche mince à grande échelle, autrement dit sur plus de 5 m², les chutes inhérentes à l'opération de découpage de plaquettes en silicium cristallin à partir du lingot initial sont évitées. Les techniques de dépôt sont des processus à faible consommation d'énergie, par conséquent le délai d'amortissement est court, correspondant uniquement à la période durant laquelle une installation PV doit fonctionner avant que l'énergie utilisée pour la construire ait été générée (environ 1 an pour les couches minces de silicium amorphe contre 2 ans pour le silicium cristallin). Comparés aux modules en silicium cristallin, les modules à couche mince montrent une dépendance moindre entre l'efficacité et la température d'utilisation et une bonne réponse même lorsque le composant diffus est plus marqué et que les niveaux de rayonnement sont bas, notamment les jours nuageux.

III.13. Principaux composants d'une centrale PV

Les composants d'un système photovoltaïque dépendent de l'application considérée : habitation isolée ou proximité d'un réseau, utilisation de batterie ou « au fil du soleil »,

convertisseurs de puissance. Il existe plusieurs composants d'un système photovoltaïque parmi lesquels [44]

III.13.1. Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque représente la source de l'énergie électrique actionnant le moteur pompe. Il est constitué d'un ensemble de modules rangés sous forme de panneaux, les modules utilisés sont de type poly cristallin (BP 83), dont les caractéristiques sont données dans l'annexe 1.A. La structure topologique du générateur est composée d'un nombre de modules séries N_s et d'un nombre de modules parallèles N_p . En fonction de la puissance désirée, les panneaux eux-mêmes peuvent être assemblés pour constituer le générateur photovoltaïque. Le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque est caractérisé par :

$$IGPV = N_p \times I \dots \dots \dots \text{(III-6)}$$

$$VGPV = N_s \times V \dots \dots \dots \text{(III-7)}$$

$IGPV$, $VGPV$ sont le courant et la tension du générateur photovoltaïque N_s Et N_p sont les nombres des modules en série et en parallèle respectivement.

III.13.2. Les convertisseurs

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ photovoltaïque et la charge (sans stockage avec charge en continu, il portera le nom de convertisseur continu-continu), soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu alternatif)

• Convertisseur Continu–Continu

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ photovoltaïque correspondant au point de puissance maximale. Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (Maximum Power Point Tracking). Son rendement se situe entre 90 et 95 %

• Convertisseur Continu–Alternatif

C'est un dispositif destiné à convertir le courant continu en courant alternatif. La forte évolution de ce type de convertisseur s'est appuyée d'une part sur le développement de composants à semi-conducteurs entièrement commandé, robustes et rapides, et, d'autre part, sur l'utilisation quasi généralisée des techniques dites de « Modulation de Largeur d'Impulsions

» (MLI). Ces dernières s'appuient sur les performances en matière de fréquence de découpage des semi-conducteurs.

III.13.3. Les batteries

La batterie est utilisée pour le stockage de l'énergie produite par le champ de modules photovoltaïques. Il y a nécessité de stockage chaque fois que la demande énergétique est décalée. Les batteries les plus utilisées pour les systèmes photovoltaïques sont les batteries d'accumulateurs électrochimiques. Elles doivent remplir trois fonctions importantes [45]

- **Autonomie** : Une batterie permet de répondre aux besoins de la charge en tout temps, même la nuit ou par temps nuageux.
- **Courant de surcharge** : Une batterie permet de fournir un courant de surcharge pendant quelques instants, c'est-à-dire un courant plus élevé que celui que peut fournir le champ photovoltaïque. Ceci est nécessaire pour faire démarrer les moteurs et les autres appareils requérant un courant de démarrage de 3 à 5 fois supérieur au courant d'utilisation.
- **Stabilisation de la tension** : Une batterie permet de fournir une tension constante, en éliminant les écarts de tension du champ photovoltaïque et en permettant aux appareils un fonctionnement à une tension optimisée. Il existe deux types de batteries [46]

1. Les batteries ouvertes

Sont des batteries au plomb contenant de l'électrolyte liquide dont l'eau doit être contrôlée.

2. Les batteries étanches

Ne contiennent pas de liquide, mais du gel. Ainsi, elles peuvent fonctionner dans toutes les positions et ne demandent absolument aucun entretien puisqu'il n'y a pas d'eau à rajouter.

III.14. Analyse des performances journalières

Les paramètres de performance ont été spécifiés par l'Agence Internationale de l'Energie (IEA) et sont décrits dans les normes standardisées (Commission Electrotechnique Internationale) CEI 61724 [47]. Ces paramètres regroupent le rendement de référence (Y_r), le rendement du champ PV (Y_a), le rendement final du système PV (Y_f), le rapport de performance (PR), les pertes du système (LS) et les pertes diverses (LC). Ces paramètres sont utilisés pour

définir les performances du système dans son ensemble par rapport à la production d'énergie, les ressources solaires et l'effet global des pertes du système photovoltaïque. [44]

III.14.1. Energie générée et énergie cumulée

Energie générée par un système de champ PV (E_{dc})

L'énergie journalière générée par un système de champ PV est notée par $E_{dc,d}$, elle exprime la somme du produit de la puissance produite par le temps de la durée du jour. Elle est donnée par la relation suivante :

$$E_{dc,d} = \sum_{i=1}^{b=Trp} V_{dc} \times I_{dc} \times T_r \dots \dots \dots (III.8a)$$

Avec :

T_r : c'est le temps d'intervalle ;

T_{rp} : c'est la période de fonctionnement ;

V_{dc} : la tension produite par le champ PV

I_{dc} : le courant produit par le champ PV ;

De même, l'énergie mensuelle générée par un système de champ PV est notée par $E_{dc,m}$, elle présente la somme de toutes les énergies générées durant les jours du mois, elle est exprimée par la relation suivante :

$$E_{dc,d} = \sum_{i=1}^N E_{dc,d} \dots \dots \dots (III.8b)$$

Avec :

N : le nombre de jours durant le mois ;

$E_{dc,d}$; l'énergie journalière générée par le champ PV.

L'énergie fournie au réseau de distribution (E_{ac}) :

L'énergie journalière fournie au réseau de distribution (E_{ac}) exprime la somme du produit de la puissance produite par le temps de la durée du jour, elle est donnée par la formule suivante

$$E_{ac,d} = \sum_{i=1}^{b=Trp} V_{ac} \times I_{ac} \times T_r \dots \dots \dots (III.9a)$$

Avec :

Tr : c'est le temps d'intervalle ;

Trp : c'est la période de fonctionnement ;

Vac : la tension fournie au réseau de distribution ;

Iac : le courant au réseau de distribution ;

De même, l'énergie mensuelle fournie au réseau de distribution est notée par $E_{ac,m}$ elle présente la somme de toutes les énergies fournies durant les jours du mois, elle est exprimée par la relation suivante

$$E_{ac,m} = \sum_{i=1}^N E_{ac,d} \dots\dots\dots(III.9b)$$

Avec :

N : le nombre de jours durant le mois ;

$E_{ac,d}$; l'énergie journalière fournie au réseau de distribution.

III.14.2. Rendement de référence (Y_r)

Le rendement de référence est le rapport entre la quantité totale de rayonnement solaire Arrivant à la surface des panneaux solaires photovoltaïques I_{POA} (kWh/m²) et la quantité de rayonnement de référence G_0 (1kW/m²). Ce paramètre représente le nombre d'heures durant lesquelles l'éclairement est égal à celui de référence, Le rendement de référence Journalier $Y_{r,d}$ est exprimé par la formule suivante :

$$Y_{r,d} = \frac{I_{POA}}{G_0} \dots\dots\dots(III.10a)$$

$I_{POA,d}$: l'énergie journalière du rayonnement arrivant à la surface des panneaux PV ;

G_0 : le rayonnement de référence (dans les conditions standard).

Notant que le rendement de référence mensuel $Y_{r,m}$ est la moyenne des rendements de référence journaliers $Y_{r,d}$, il est exprimé par la formule suivante :

$$Y_{r,m} = \frac{1}{N} Y_{r,d} \dots\dots\dots(III.10b)$$

Avec :

N : le nombre de jours durant le mois ;

$Y_{r,d}$: le rendement de référence journalier

$Y_{r,m}$: le rendement de référence mensuel.

III.14.3. Rendement du champ PV (Y_a) :

Le rendement du champ PV est défini comme le rapport entre l'énergie totale générée $E_{D,C}$ (kWh) par les rangées PV pour une période définie (jour, mois ou année) et la puissance nominale P_0 (kWc) des rangées sous les conditions standard (STC : irradiation : 1000 W/m², 25°C température ambiante et spectre de référence AM 1.5-G). Le rendement du champ journalier est donné par :

$$Y_{a,d} = \frac{E_{dc,d}}{P_0} \dots \dots \dots (III.11a)$$

Le rendement du champ mensuel est la moyenne des rendements du champ journalier, il est donné par :

$$Y_{a,m} = \frac{1}{N} Y_{a,d} \dots \dots \dots (III.11b)$$

III.14.4. Rendement final du système PV (Y_f) :

Le rendement final correspond à l'énergie totale produite par le système PV, E_{AC} (kWh) Par rapport à la puissance nominale installée P_0 (kWc). Cette quantité représente le nombre d'heures pendant lesquelles le champ PV devrait fonctionner à sa puissance nominale. Le rendement final journalier est donnée par :

$$Y_{f,d} = \frac{E_{ac,d}}{P_0} \dots \dots \dots (III.12a)$$

Le rendement final du système mensuel est la moyenne des rendements finaux du système journalier, il est donné par :

$$Y_{a,m} = \frac{1}{N} Y_{a,d} \dots \dots \dots (III.12b)$$

III.14.5. Indice de performance normalisé (PR)

Le rapport de performance PR indique l'effet global des pertes sur la production énergétique des rangées d'un système PV. Les valeurs de PR indiquent à quel point un système PV approche les performances idéales dans des conditions réelles d'exploitation. PR est défini par le ratio

entre le rendement final et le rendement de référence, c'est une quantité adimensionnelle. L'indice de performance journalier est exprimé par :

$$PR_d = \frac{Y_{f,d}}{Y_{r,m}} \dots \dots \dots (III.13a)$$

De même, l'indice de performance mensuel est donné par :

$$PR_m = \frac{Y_{f,m}}{Y_{r,m}} \dots \dots \dots (III.13b)$$

III.14.6. Les pertes du système par conversion (L_s)

Les pertes du système par conversion (L_s) sont dues aux pertes par conversion des onduleurs (courant continu courant alternatif) et elles sont définies par la différence entrée rendement du champ PV (Y_a) et le rendement final (Y_f). Les pertes du système par conversion journalières sont données par :

$$L_{s,d} = Y_{a,d} - Y_{f,d} \dots \dots \dots (III.14a)$$

Les pertes du système par conversion mensuelles sont exprimées par :

$$L_{s,m} = Y_{a,m} - Y_{f,m} \dots \dots \dots (III.14b)$$

III.14.7. Les pertes diverses (L_c) :

Les pertes diverses (L_c) sont définies par la différence entre le rendement de référence le rendement du champ PV. Elles représentent les pertes dues aux : températures des panneaux, câblages, ombrage partiel, pertes spectrales, la salissure, erreurs dans la recherche du point de puissance maximale, de conversions (DC-AC), etc. Les pertes du diverses journalières sont données par :

$$L_{c,d} = Y_{r,d} - Y_{a,d} \dots \dots \dots (III.15a)$$

Les pertes diverses mensuelles sont exprimées par :

$$L_{c,m} = Y_{r,m} - Y_{a,m} \dots \dots \dots (III.15b)$$

III.14.8. L'efficacité du champ PV (η_{PV})

L'efficacité du champ photovoltaïque est le rapport de l'énergie totale générée par les rangées PV (E_{DC}) au produit de la quantité d'irradiation sur le plan des panneaux et de la surface

globale du champ photovoltaïque. L'efficacité journalière du champ photovoltaïque est donnée par :

$$\eta_{PV} = \frac{E_{DC,d}}{I_{POA,d} \times A_m} \times 100 \dots\dots\dots(III-16a)$$

Avec :

A_m : La surface du champ photovoltaïque ;

$I_{POA,d}$: L'énergie journalière du rayonnement arrivant à la surface des panneaux PV ;

$E_{DC,d}$: L'énergie journalière totale générée par les rangées PV (E_{DC}).

L'efficacité mensuelle du champ photovoltaïque est donnée par :

$$\eta_{PV,m} = \frac{E_{DC,m}}{I_{POA,m} \times A_m} \times 100 \dots\dots\dots(III-16b)$$

Avec :

$I_{POA,m}$: L'énergie mensuelle du rayonnement arrivant à la surface des panneaux PV ;

$E_{DC,m}$: L'énergie mensuelle totale générée par les rangées PV (E_{DC}).

III.14.9. L'efficacité du système PV (η_{SYS})

L'efficacité du système PV est le rapport de l'énergie totale générée par le système PV (E_{AC}) au produit de la quantité d'irradiation sur le plan des panneaux et de la surface globale du champ photovoltaïque.

$$\eta_{SYS,d} = \frac{E_{AC,d}}{I_{POA,d} \times A_m} \times 100 \dots\dots\dots(III-17a)$$

Avec :

A_m : La surface du champ photovoltaïque ;

$I_{POA,d}$: L'énergie journalière du rayonnement arrivant à la surface des panneaux PV ;

$E_{AC,d}$: L'énergie journalière totale générée par le système PV (E_{AC}).

L'efficacité mensuelle du système est donnée par :

$$\eta_{SYS,m} = \frac{E_{AC,m}}{I_{POA,m} \times A_m} \times 100 \dots\dots\dots(III-17b)$$

III.14.10. L'efficacité de l'onduleur PV (η_{inv})

L'efficacité de l'onduleur (η_{inv}) présente le rapport de l'énergie totale générée par le système PV à l'énergie totale générée par les rangées photovoltaïques. L'efficacité journalière de l'onduleur est donnée par :

$$\eta_{inv,d} = \frac{E_{AC,d}}{E_{DC,m}} \times 100 \dots\dots\dots(III.18a)$$

L'efficacité mensuelle de l'onduleur est exprimée par l'équation suivante :

$$\eta_{inv,m} = \frac{E_{AC,m}}{E_{DC,m}} \times 100 \dots\dots\dots(III.18b)$$

III.15 conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les enjeux et les développements actuels du photovoltaïque ainsi que le fonctionnement d'une cellule en expliquant brièvement le phénomène photovoltaïque (l'effet photovoltaïque). Nous avons vu que la cellule PV présente une caractéristique I(V) non linéaire, présente un point de puissance maximal (PPM) caractérisé par un courant (I_{max}) et un tension (V_{max}). Nous avons présenté l'influence des différents paramètres extérieurs sur cette caractéristique. Le courant de court-circuit évolue principalement avec l'éclairement et la tension à vide avec la température. L'interconnexion de cellule PV en série ou en parallèle pose plusieurs problèmes de déséquilibre qui sont très pénalisants si les cellules n'ont pas le même point de fonctionnement.



Chapitre IV
Le pompage solaire

IV.1. Introduction

Dans nos jours, la demande d'eau est de plus en plus importante. Le problème se multiplie en particulier dans les zones rurales et les sites isolés où l'accès à l'énergie classique est difficile. Ce phénomène a fait qu'un intérêt grandissant est porté sur l'utilisation des générateurs photovoltaïques comme nouvelle source d'énergie, La réalisation d'un système de pompage photovoltaïque autonome, fiable et à bon rendement, constitue une solution pratique et économique au problème du manque d'eau, en particulier dans les régions désertiques. En effet, un système photovoltaïque devient intéressant lorsqu'il est facile à installer avec une autonomie acceptable et une excellente fiabilité de service.

Dans cette partie, on traite plus particulièrement les éléments nécessaires qui constituent une station de pompage solaire.

IV.2. Le pompage solaire

Pour pomper l'eau avec un système photovoltaïque, deux méthodes sont possibles.

IV.2.1 Pompage « au fil du soleil »

Le pompage « au fil du soleil » permet d'avoir un système photovoltaïque simple, fiable et moins coûteux. Ici l'eau est pompée et stockée dans un réservoir, au fil de la journée. On parle alors d'un stockage hydraulique. L'eau stockée sera distribuée au besoin. [48]

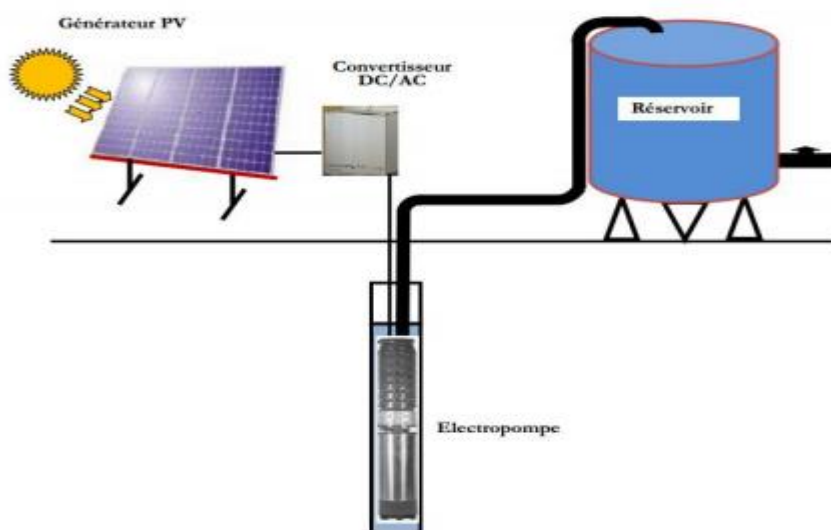
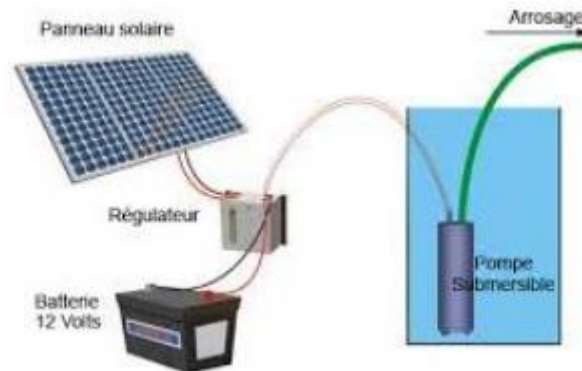


Figure IV.1 : Pompage photovoltaïque au fil du soleil.

IV.2.2. Pompage avec stockage d'énergie

Ici c'est l'énergie électrique qui sera stockée dans des batteries. Le pompage sera possible même en absence du soleil. Un tel système est plus coûteux que le précédent, vu la nécessité de changer les batteries, car elles ont une courte durée de vie. [49]



FigureIV.2 : Pompage photovoltaïque avec stockage d'énergie.

IV.3. Composants d'un système de pompage PV

Un système de pompage solaire est généralement constitué de [49]

- Le générateur photovoltaïque.
- Le groupe de motopompe.
- L'électronique de commande.
- Les éléments du stockage.

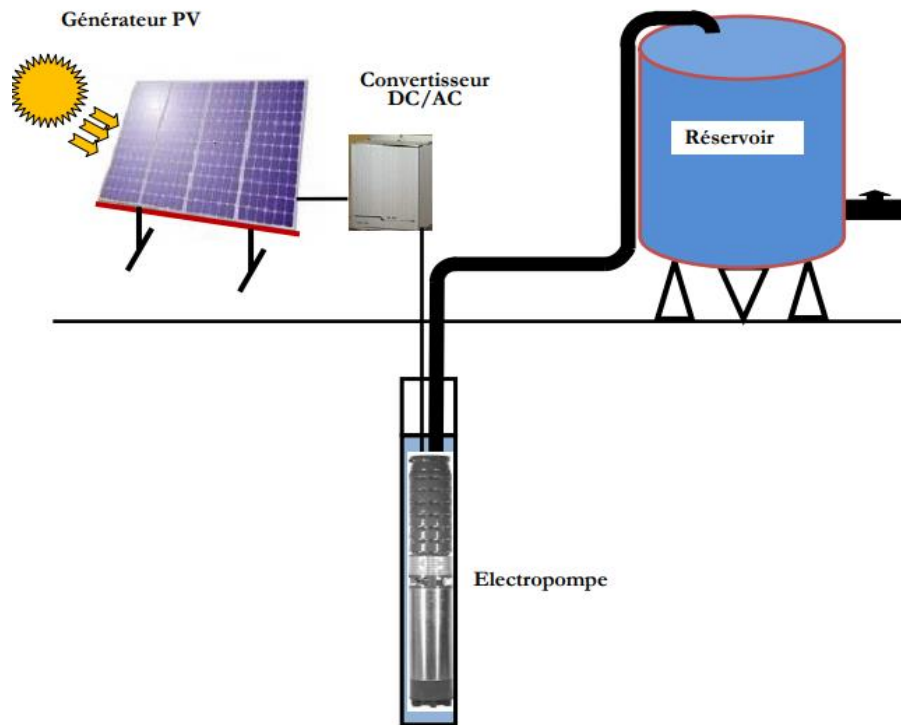


Figure IV.3: Schéma synoptique simplifié de pompage PV

IV.3.1- Le générateur photovoltaïque

Modules photovoltaïques interconnectés en une seule unité de génération d’électricité, montés sur des structures diverses (support ou châssis, toits et autres). [50]

En utilisant l’équation ci-dessous, pour un groupement mixte formé à partir d’un nombre N_s module en série et N_p module en parallèle [51] :

$$I = N_p \cdot I_{ph} - N_p \cdot I_0 \left[\exp \left(\frac{N_s \cdot V + \frac{I \cdot N_s \cdot R_s}{N_p}}{n \cdot N_s \cdot V_T} \right) - 1 \right] - \frac{N_s \cdot V + \frac{I \cdot N_s \cdot R_s}{N_p}}{\frac{N_s \cdot R_p}{N_p}} \dots \dots \dots (IV.1)$$

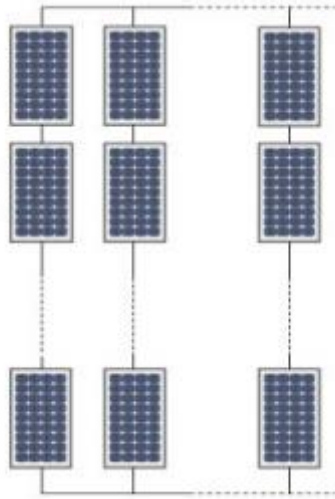


Figure IV.4 : Champ photovoltaïque

IV.3.2- Le groupe de motopompe

La classification des pompes peut se faire selon différents critères : conception de la pompe, sa position dans le système et le type du moteur utilisé. [52]

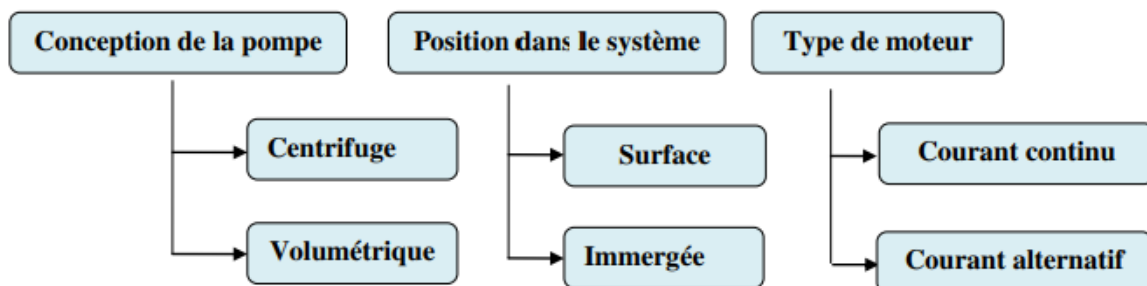


Figure IV.5 : Classification des pompes

IV.3.2.1- Classification selon la conception de la pompe

Une pompe est un dispositif permettant d'aspirer et de refouler un fluide. Il existe deux types de pompes : la pompe centrifuge et la pompe volumétrique.

a) Pompe centrifuge

La pompe centrifuge transmet l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de rotation de roues à aubes ou à ailettes. L'eau qui rentre au centre de la pompe sera poussée vers l'extérieur et vers le haut grâce à la force centrifuge des aubages.

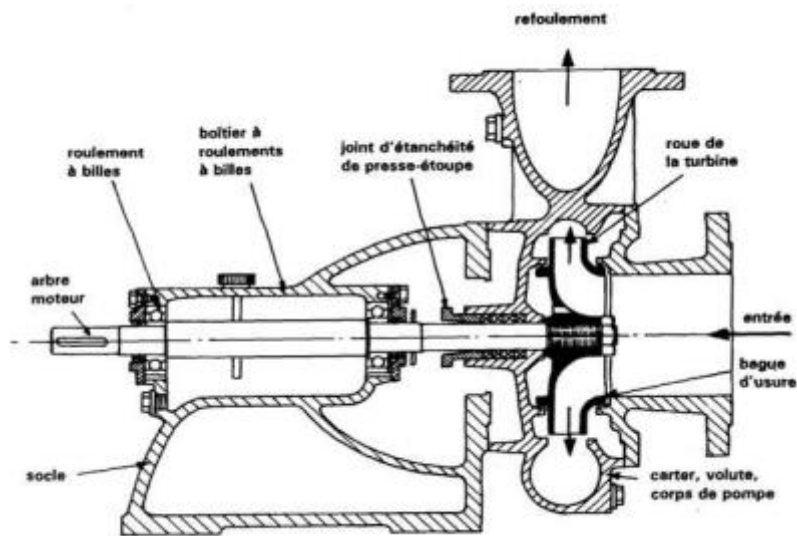


Figure IV.6 : Schéma d'une pompe centrifuge

b) Pompe volumétrique

La pompe volumétrique transmet l'énergie cinétique du moteur en mouvement de va et vient permettant au fluide de vaincre la gravité par variations successives d'un volume raccordé alternativement à l'orifice d'aspiration et à l'orifice de refoulement. Une pompe volumétrique comporte toujours une pièce mobile dans une pièce creuse qui déplace le liquide en variant le volume contenu dans la pièce creuse. Le principal intérêt des pompes volumétriques est de pouvoir véhiculer un fluide sous de très fortes pressions.

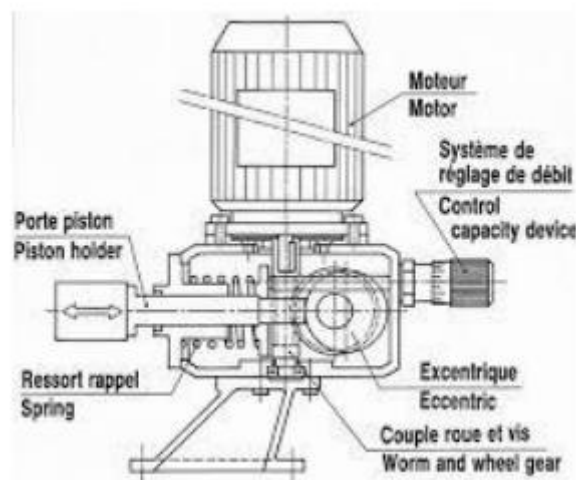


Figure IV.7 : Schéma d'une pompe volumétrique.

IV.3.2.2- Classification selon la position de pompe

En fonction de l'emplacement physique de la pompe, nous distinguons : Les pompes de surface et les pompes immergées. [49]

a) Pompes de surface

Le terme surface définit la position d'une pompe par rapport au liquide à pomper. Elle est dite pompe de surface, car prévue pour être posée en dehors du liquide à aspirer.

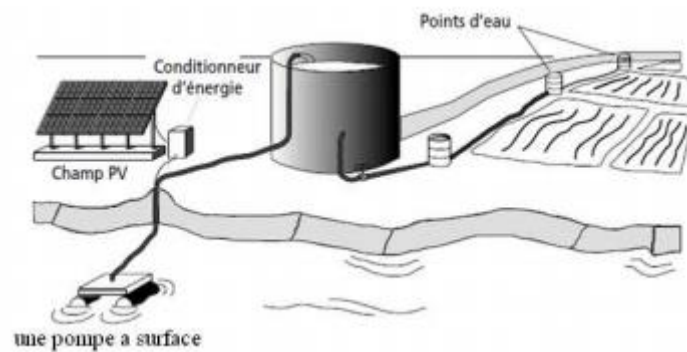


Figure IV.8 : Pompes de surface

b) Pompes immergées

Les pompes de refoulement sont immergées dans l'eau et ont soit leur moteur immergé avec la pompe (pompe monobloc), soit le moteur en surface. La transmission de puissance se fait alors par un long arbre reliant la pompe au moteur. Dans les deux cas, une conduite de refoulement après la pompe permet des élévations de plusieurs dizaines de mètres, selon la puissance du moteur.

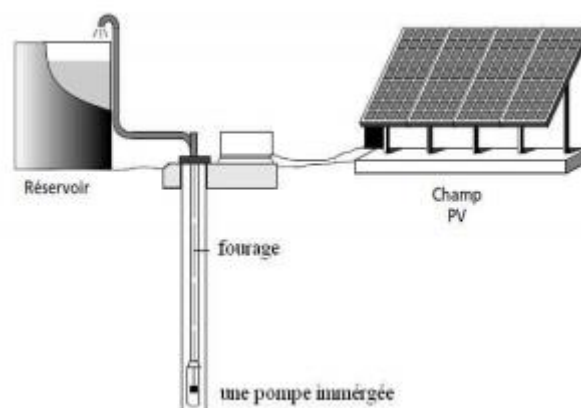


Figure IV.9 : Pompe immergée.

IV.3.2.3 Classification selon le moteur utilisé

Un moteur électrique est un dispositif électromécanique permettant la conversion l'énergie électrique en énergie mécanique. Il existe deux types de moteurs : à courant continu et alternatif. [52]

a) Moteur à courant continu

L'énergie électrique appliquée à un moteur est transformée en énergie mécanique en variant le sens du courant circulant dans un induit (habituellement le rotor) soumis à un champ magnétique produit par un inducteur (habituellement le stator). La commutation du courant dans le rotor d'un moteur à courant continu est effectuée à l'aide de balais composés de charbon et de graphite ou par commutation électronique.

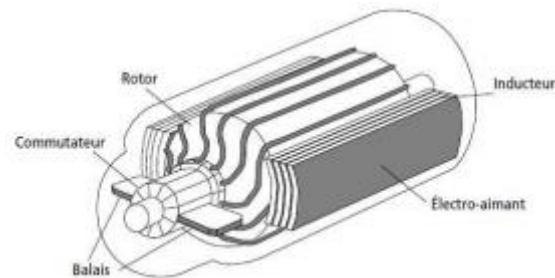


Figure IV.10 : Moteur à courant continu avec balais.

Le couplage est direct ou avec adaptation du générateur par un hacheur adaptateur de puissance.

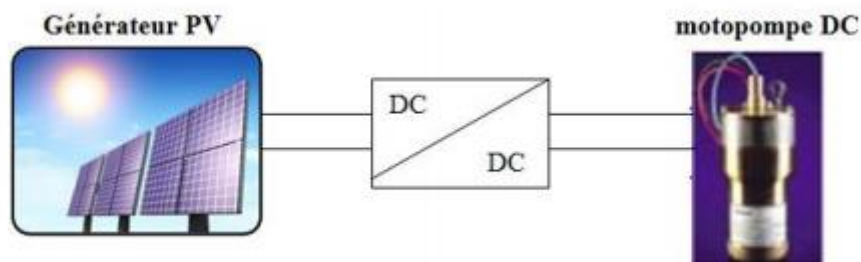


Figure IV.11 : Schéma synoptique simplifié du pompage PV par motopompe DC.

b) Moteur à courant alternatif

Les moteurs alternatifs asynchrones (rotor à cage) sont les plus couramment employés pour une gamme variée d'applications industrielles. Il est utilisé particulièrement pour le pompage immergé dans les forages et les puits ouverts.

L'arrivée d'onduleurs efficaces a permis l'utilisation de ce type de moteurs dans les applications de pompage solaire.

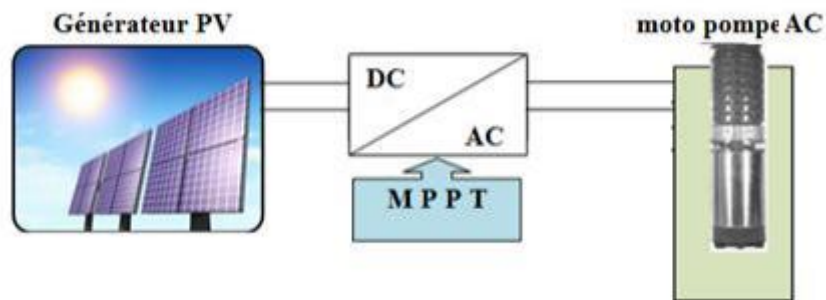


Figure IV.12 : Schéma synoptique simplifié du pompage PV par motopompe à AC.

IV.3.3- Electronique de commande [53]

a) Le convertisseur DC/DC (hacheur)

Utilisé dans le cas d'une pompe montée à un moteur à courant continu.

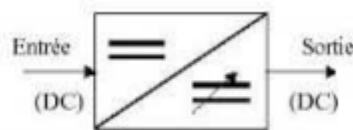


Figure IV.13 : Conversion DC / DC.

b) Le convertisseur DC/AC (onduleur)

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant continu, produit par les panneaux solaires en un courant alternatif

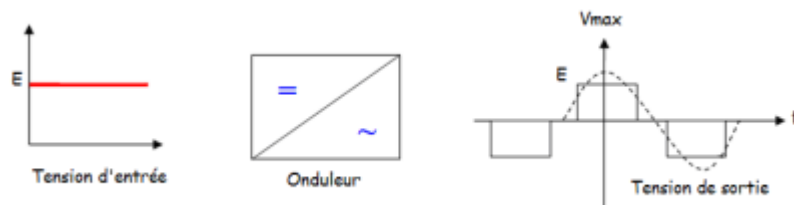


Figure IV.14 : Conversion DC / AC.

IV.3.4- Le stockage

Le stockage d'énergie peut se faire de deux façons : stockage d'énergie électrique ou stockage d'eau. Il est plus pratique de stocker l'eau dans des réservoirs que l'énergie électrique dans des accumulateurs coûteux et fragiles.



Figure IV.15 : Différents types de batteries.

IV.4. Notions hydrauliques

Les stations de pompage sont constituées d'une ou plusieurs pompes qui aspirent des volumes d'eau et les refoulent sous une certaine pression dans les canalisations du réseau. Les paramètres nécessaires pour dimensionner la pompe solaire sont le débit d'exploitation et la hauteur à laquelle la pompe devra refouler. Celle-ci est majorée par des pertes de charges et de la pression de refoulement dans la conduite. [54]

. Le débit Q

Le débit fourni par une pompe est la quantité d'eau qu'elle refoule durant un intervalle de temps donné. En pompage solaire, le débit est souvent exprimé en m^3 par jour.

. La hauteur manométrique totale H_{MT}

C'est la différence de pression en mètres de colonne d'eau entre les orifices d'aspiration et de refoulement. Cette hauteur peut être calculée comme suit :

$$H_{MT} = H_g + P_c \dots \dots \dots (IV.2)$$

Avec :

H_g : Hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée (niveau dynamique) et le plan d'utilisation (voir Figure IV.16). Elle est calculée par la formule suivante :

$$H_g = A + B + C \dots \dots \dots (IV.3)$$

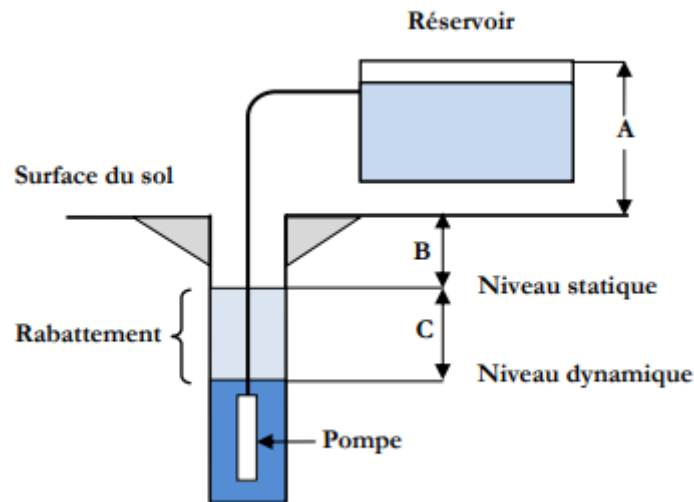


Figure IV.16 : Hauteur manométrique totale.

P_C Pertes de charge produites par le frottement de l'eau sur les parois des conduites.

Elles s'expriment en mètres d'eau et elles sont fonction de la distance des conduites (D), de leur diamètre et du débit de la pompe.

N_s :Le niveau statique d'un puits ou d'un forage est la distance entre le sol et la surface de l'eau avant pompage.

N_d :Le niveau dynamique d'un puits ou d'un forage est la distance le sol et la surface de l'eau pour un pompage à un débit donné. Pour le calcul de la HMT, le niveau dynamique est calculé pour un débit moyen.

Rabatement : La différence entre le niveau dynamique et le niveau statique.

Rabatement maximal : est le rabattement maximal acceptable avant de stopper la pompe.

IV.5 Dimensionnement complet de l'installation

Les différentes étapes pour le dimensionnement d'un système de pompage sont

- Evaluation des besoins en eau
- Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire
- Détermination de l'énergie solaire disponible

- Choix des composants.

IV.5.1 Estimations des besoins en eau

Pour une région tropicale, les besoins en eau peuvent être définis en utilisant les valeurs du tableau suivant [49] :

Tableau IV.1 : Diagramme d'estimation des besoins en eau

Humains	Animaux	Irrigation
Par personne 5 à 10 litres/jour minimum	Moutons et chèvres 5 litres/jours	Agriculture maraichère 60m3/hectare/jour
Conditions de vie normale 30 litres/jour	Cheval 40 litres/jour	Riz 100 m3 /hectare/jour
	Ane 20 litres/jour	Sucre de canne 65 m3 /hectare/jour
	Chameau 20 litres/jour	Coton 55 m3 /hectare/jour

IV.5.2 Calcul de l'énergie hydraulique quotidienne requise

Une fois les besoins nécessaires en volume d'eau pour chaque mois de l'année et les caractéristiques du puits sont définis, nous pouvons calculer l'énergie hydraulique moyenne journalière et mensuelle nécessaire à partir de la relation [49] :

$$E_h = C_h \cdot Q \cdot H_{MT} \dots \dots \dots (IV.4)$$

Avec :

E_h :Énergie hydraulique [kwh /j]

C_h :Constante hydraulique[kg.s/m²]

Q : Volume d'eau [m³/jour]

H_{MT} : Hauteur manométrique total [m]

Où :

$$C_h = g \cdot \rho / 3600$$

g : La gravité terrestre [$9.81m/S^2$]

ρ : Densité de l'eau [$1000/m^3$]

IV.5.3. Calcul de l'énergie électrique quotidienne requise

L'énergie nécessaire pour soulever une certaine quantité d'eau sur une certaine hauteur donnée pendant une journée est calculée à partir de l'équation suivante :

$$E_e = E_h / (\eta_{MP} \times \eta_{ond}) \dots\dots\dots (IV.5)$$

E_e : Energie électrique exprimé en [kwh/j]

η_{MP} : Le rendement du groupe motopompe, en général entre 30% et 60%

η_{ond} :Le rendement d'onduleur.

IV.5.4. Détermination de l'énergie solaire disponible

La méthode de dimensionnement utilisée est basée sur les calculs des valeurs moyennes journalières mensuelles de l'irradiation solaire disponible à l'inclinaison β des modules photovoltaïques (PV) par rapport au plan horizontal. Ce dernier doit se faire de manière à optimiser la conversion de l'énergie solaire en électrique.

IV.6 Taille du générateur photovoltaïque

Deux méthodes sont utilisées pour le dimensionnement de systèmes de pompage photovoltaïque : une méthode analytique et une méthode graphique. Ces méthodes permettent de dimensionner une installation de pompage photovoltaïque pour satisfaire les besoins en eau d'une consommation bien déterminée.

IV.6.1 Méthode analytique

Une fois connus le volume journalier $Q[m^3/jour]$, la hauteur manométrique totale H_{MT} et l'irradiation moyenne journalière incidente sur le plan du générateur, la puissance nominale correspondante du générateur photovoltaïque P_c est calculée par l'expression suivante [55] :

La puissance fournie par le générateur PV dans les conditions standards de mesure CSM, (éclairage de [$1000w/m^2$] et la température $25^\circ C$).

$$P_c = \eta_g \cdot A \cdot G \dots\dots\dots (IV.6)$$

P_c : La puissance de sortie du générateur (w) sous CSM (puissance crête).

η_g : Le rendement du générateur à la température de référence (25°C).

A : La surface active du générateur (m^2)

G : L'éclairement dans les conditions CSM.

L'énergie électrique journalière est donnée par l'équation :

$$E_e = \eta_{PV} \cdot A \cdot G_d(\beta) \dots \dots \dots (IV.7)$$

η_{PV} : Le rendement moyen journalier du générateur dans les conditions d'exploitation

$G_d(\beta)$: L'irradiation moyenne journalière incidente sur le plan des modules à

l'inclinaison β [kwh/ m^2 /j]

Le rendement η_{PV} est calculé par la formule suivante :

$$\eta_{PV} = F_m [1 - \gamma(T - T_r)] \eta_g \dots \dots \dots (IV.8)$$

F_m : Facteur de couplage, défini comme le rapport entre l'énergie électrique générée sous les conditions d'exploitation et l'énergie électrique qui se générerait si le système travaillait au point de puissance maximale.

γ : Coefficient de température des cellules. γ prend des valeurs entre 0,004 et 0.005 /°C pour des modules au silicium mono et poly cristallin, et entre 0,001 et 0,002 pour des modules au silicium amorphe.

T : Température moyenne journalière des cellules durant les heures d'ensoleillement.

Calcul de la puissance, en watts crêtes, que doit avoir le champ

En substituant les équations (IV.5), (IV.7) et (IV.8) dans (IV.6), nous obtenons la puissance crête du générateur :

$$P_c = \frac{G}{F_m [1 - \gamma(T - T_r)] G_d(\beta)} \cdot \frac{E_h}{\eta_{MP} \times \eta_{ond}} \dots \dots \dots (IV.9)$$

IV.6.2 Méthode graphique :

Le calcul de la puissance du générateur photovoltaïque peut être effectuée de deux manières : soit par des expressions analytiques comme celle donnée si haut, ou bien en utilisant les abaques de rendement des pompes fournis par le constructeur qui donne en fonction de

l'irradiation globale la puissance nécessaire développée P_c par les panneaux pour faire fonctionner la pompe dans cette gamme de débit, et de HMT.

IV.7 Dimensionnement de la pompe

Le choix de la pompe est basé sur les deux facteurs suivants :

- La hauteur manométrique totale H_{MT} .
- Le débit horaire Q_h .

$$Q_h = \frac{Q_{[\frac{m^3}{jour}]}}{h} \dots\dots\dots (IV.10)$$

h : est le nombre heures d'ensoleillement maximal à $[1000w/m^2]$:

IV.8 Dimensionnement des stations de pompage solaire

Pour définir la puissance utile au fonctionnement de la pompe développée par les panneaux solaires, les données minimums sont :

- La situation géographique pour déterminer l'irradiation solaire globale.
- Le débit pour déterminer les besoins journaliers en eau durant la période de besoin maximal.
- La hauteur manométrique totale pour mesurer le niveau statique, le rabattement maximal, la hauteur du réservoir et les pertes de charge dues à la tuyauterie.

On procèdera comme suit :

1. Définir l'irradiation globale journalière mensuelle en $[wh/\frac{m^2}{j}]$ par rapport à la latitude de la zone de travail.
2. Choisir une pompe en fonction du débit et de la hauteur manométrique totale, (utiliser les abaques de rendement des pompes fournis par le constructeur).
3. Choisir l'onduleur adapté à la pompe (tension et puissance).
4. Déterminer la puissance crête P_c nécessaire au fonctionnement de la pompe par la méthode analytique ou graphique.
5. Choisir le type de panneau solaire (définir leur puissance nominale P_n)
6. Déterminer le nombre de panneaux par la relation P_c/P_n

7. Vérifier la tension nominale pour le fonctionnement de l'onduleur (selon les modèles).
8. Déterminer le nombre de module série / parallèle (la forme de connexion).

IV.9. Exemple

IV.9.1. Hypothèses

Nous dimensionnons un système de pompage photovoltaïque, d'approvisionnement en eau pour l'irrigation d'une oasis de 365 de palmiers.

Les données suivantes caractérisent le système :

- Projet : Irrigation d'une oasis de 365 de palmiers.
- Site : Touggourt
- Irradiation quotidienne : 5.71 kWh/m²/jour.
- Débit maximum : 67 m³/palmier/an. (pour 365 palmiers : 67 m³/jour)
- Forage : HMT = 45 m.
- Module photovoltaïque choisi :
Poly-cristallin IBC Solo Sol
Puissance nominale : 150 Watt.
Tension nominale : 12 Volt.

IV.9.2. Résultats du dimensionnement

L'algorithme est programmé sur Matlab, les résultats obtenus pour l'application sont comme suit :

- Energie hydraulique : 18257,5 Wh/j.

- Energie électrique : 28088,46 Wh/j.
- Nombre total de modules : 32.
- Modules en série : 16.
- Modules en parallèle : 2.

IV.9.3. Choix du matériel

- Choix de la pompe

On choisit la pompe en fonction du débit et de la hauteur manométrique totale [49], on calcule le débit horaire par la formule suivante :

$$Q_h = \frac{Q[\frac{m^3}{jour}]}{h}$$

Avec :

h : nombre d'heures d'ensoleillement maximal (Environ 7 heures).

Q : débit voulu ($67 \text{ m}^3/\text{jour}$).

Ceci donne un débit horaire d'environ $10 \text{ m}^3/\text{h}$. Sachant que la hauteur manométrique totale est de 45 m, alors on choisit la pompe immergée Lorentz PS2-600[28].

Qui a les caractéristiques suivantes :

- Type : Lorentz PS2-600.
- Débit nominal : $12 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Tension d'entrée : 150 v.
- immersion : Jusqu'à 150 m.

- Choix de l'onduleur

Le choix de l'onduleur dépend des caractéristiques électriques de la pompe alimentée (puissance, tension). Pour notre étude, l'onduleur choisi est :

- Type : Victon phoenix 24 / 500 VA.

IV.10. Conclusion

Deux techniques de pompage PV ont été présentées : pompage au fil de soleil et pompage avec batterie. Nous avons montré l'intérêt du pompage dit « au fil du soleil ». Nous avons également pu conclure que les systèmes de pompage photovoltaïque les plus courants, selon l'état de l'art actuel, sont constitués d'une pompe centrifuge menue d'un moteur à induction triphasé. Le moteur est alimenté par un générateur photovoltaïque sans batteries, via un onduleur triphasé à fréquence variable conçu spécifiquement pour cette application. Nous avons présenté les résultats d'une étude qui a conduit au dimensionnement d'une installation de pompage photovoltaïque pour irriguer un hectare de palmiers située sur la vallée de Ouargla.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches sont conduites à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande est l'énergie solaire photovoltaïque, c'est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite. C'est d'ailleurs ce qui explique que son utilisation connaît une croissance significative dans le monde. L'étude réalisée dans le cadre de ce mémoire de fin d'étude nous a permis de bien comprendre le principe du photovoltaïque consistant en l'exploitation de l'énergie solaire, cela nous a permis aussi de déduire qu'un dimensionnement photovoltaïque passe par un compromis énergie-économie qui se traduit par le choix des éléments composant les installations photovoltaïques.

L'objectif de ce travail est l'étude d'une chaîne de conversion photovoltaïque de production d'énergie électrique destinée à l'alimentation d'une charge autonome.

Ce travail a été consacré à une étude technico d'un système de pompage photovoltaïque. On peut rapidement comprendre et justifier l'intéressement à l'énergie solaire pour pomper l'eau. D'abord, l'énergie solaire photovoltaïque est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite. C'est d'ailleurs ce qui explique que son utilisation connaît une croissance significative dans le monde. D'autre part, la demande d'énergie électrique, essentiellement pour les besoins des zones rurales et les sites isolés, ne cessent d'augmenter, en particulier, les systèmes de pompage d'eau. Classiquement sur ce type de site, on utilise l'énergie conventionnelle par groupe électrogène. Mais cette énergie présente plusieurs contraintes, comme le transport du combustible et les entretiens périodiques pour les moteurs diesels.

Bibliographie

- [1] (en) « World Consumption of Primary Energy by Energy Type and Selected Country Groups, 1980-2004 » [archive], Energy Information Administration (consulté le 17 mai 2008).
- [2] (en) « Induction Versus DC Brushless Motors » [archive], sur www.tesla.com, 9 janvier 2007 (consulté le 22 janvier 2019) (en) « Tesla's electric motor shift to spur demand for rare earth neodymium » [archive], sur Reuters, 13 mars 2018
- [3] Énergie hydraulique [archive], sur le site actu-environnement.com, consulté le 7 janvier 2014
- [4] « Hydroélectricité » (Archive • Wikiwix • Archive.is • Google • Que faire ?) [PDF], Direction Générale de l'Énergie et du Climat, p. 8.
- [5] Géothermie : du geyser au radiateur, Jean-Michel Coudert (ISBN 2715904711), (ISBN 9782715904712).
- [6] J.M Chassériau, 1984 : Conversion thermique du rayonnement solaire ; Dunod
- [7] R. Bernard & al, 1980 : Le rayonnement solaire conversion thermique et applications ; Technique et documentation Lavoisier, 2ème édition 1980.
- [8] S. Saadi, 2010 : Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan, Mémoire de Magister en physique ; UMC.
- [9] R. Bernard et al., "Le rayonnement solaire conversion Thermique et applications" Technique et documentation Lavoisier, 2ème édition 1980.
- [10] Halouane Assia, "modélisation du transfert radiatif dans les strates supérieures d'un module photovoltaïque", mémoire de master, université M'Hamed bougera Boumerdes 2017.
- [11] Debili Narimene, "étude et optimisation en environnement matlab/simulink d'un système de pompage photovoltaïque", thèse de magister, université Constantine I, 2015.
- [12] Hasni Hhadjèr, "caractérisation automatisée d'une cellule solaire ", mémoire de fin d'étude en master, université Med Khider Biskra, 2014.
- [13] <http://www.africa-solar-energy.com/l'énergie-solaire-afrique/>
- [14] Helali Kamelia, "modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative ", thèse de magister, université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012.

Bibliographie

- [15] Karroute salima, « étude théorique et numérique des systèmes couples : distillateur plan capteur et distillateur hot box-capteur », thèse de magister en physique spécialité : physique énergétique option : photo thermique- université mentouri de Constantine, 2009.
- [16] Saadi Souad « effet des parametres operationnels sur les performances d'un capteur solaire plan » université mentouri de Constantine ; 2010.
- [17] Bejan A. & al, 2003 : Heat transfer handbook, TJ250.B35.
- [18] T. Ismail, 2002 : Modelling in transport phenomena, Elsevier Science B.v
- [19] A. LABOURET, P. CUMUNEL, J-P. BRAUN, B. FARAGGI, p 46.
- [20] José Miguel Navarro (cellule photovoltaïque organiques Transparentes Dans le visible) thèse de doctorat, Université Toulouse III Paul Sabatier,2008
- [21] Zouache Foudil (étude de la concentration solaire sur les performances des système photovoltaïque) m'moire de magister en électronique, université mantouri Constantine 2009.
- [22] <https://hal.archives-ouvertes.fr/>
- [23] N. B. Ben Ahmed, « Propriétés Physiques Des Semi-Conducteur (Si Monocristallin Et Ge) Et Simulation Des Cellules Solaire a Base De Si ET Si Ge », These De Magister, Université Abou Beker Belkaid-TELEMEN, (2006).
- [24] H. Derbal : « Cellules Solaires Photovoltaïques Plastiques Nanostructures », Thèse De Doctorat, Université D'Angers, (2009).
- [25] http://www.eere.energy.gov/solar_photovoltaique.html
- [26] UPMC. G. Philippe : « Energie Renouvelable Et Energie Solaire », disponible sur le site : philippe.guibert@upmc.fr
- [27]. Vighetti Stéphane « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion ». Thèse de doctorat, Université Grenoble, Institut polytechnique de Grenoble, 2010
- [28]. Petibon Stéphane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.
- [29] Alonso Corinne (Contribution a optimisation, la gestion et le traitement de l'energie) mémoire d'habitation à diriger les recherche, Université Paul Sabatier toulouseIII,2003

Bibliographie

- [30] Roshanak Radbeh (réalisation et caractérisation des cellules solaires organique a couche composites polymère incluant des monotube de carbone) thèse de doctorat, université de limoges, 2008
- [31] Petibon Stéphan (Nouvelles architectures distribuées de gestion et deconversion de l'energie
- [32] K. Benlarbi, L. Mokrani, M.S. Nait-Said « A fuzzy global efficiency optimisation of a Photovoltaic water pumping system », *Solar Energy* 77 (2004) 203–21
- [33] A. Oould Mohamed Yahia et la (étude et modélusation d'un générateur photovoltaïque) revue des energie Renouvelable Vol.N° 3 2008 PP473-483,2088.
- [34] Vightti stéphane (Systeme photovoltaïque raccordés au réseau : Choix et dimentionnement des étages de conversion) These de doctorat, Université Grenoble, Institut polytechnique de Grenoble,2010.
- [35] Loie Bailly (cellule photovoltaïque organique souple à grande surface) These de doctorat, Université bordeaux I,2010.
- [36] Yesref Djamel, "optimisation d'une cellule solaire à base du silicium poly cristallin en couche mince déposé sur un substrat en céramique", mémoire de magister, université AbouBakr Belkaid – Tlemcen, 2013.
- [37] Bounouar Malika, "étude de la purification du silicium destiné à la réalisation de cellules", mémoire de magister, université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015.
- [38] Louzazna Brahim et Madi Salim, "étude et caractérisation d'un panneau photovoltaïque type condor", mémoire de master en électrotechnique, université de Bejaïa, 2015.
- [39] <http://www.eere.energy.gov/solar/photovoltaique.html>
- [40] H. Derbal : « Cellules Solaires Photovoltaïques Plastiques Nanostructures », Thèse De Doctorat, Université D'Angers, (2009).
- [41] PC1D,citescerx.ist.psu.edu/viedoc/summary?doi=10.1.1
- [42] Cellules solaires, 5e édition à paraître en septembre 2010, A. Labouret, P. Cumunel, B. Faraggi, & J-P. Braun, Dunod éditeur

Bibliographie

- [43] Cellules solaires, 5e édition à paraître en septembre 2010, A. Labouret, P. Cumunel, B. Faraggi, & J-P. Braun, Dunod éditeur
- [44]. Hneini Mema Babe « Etude de la centrale photovoltaïque d'Ain Skhouna (Saida) », mémoire de master en génie mécanique option énergétique. Université de Mohamed Boudiaf M'sila, 2019.
- [45]. Mustapha Belarbi, « Contribution à l'étude d'un générateur solaire pour site autonome » Thèse de Doctorat Es-Sciences, Université des sciences et de la Technologied'OranMohamedBoudiaf2015.
- [46]. Petibon Stéphane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.
- [47]. International Standard IEC 61724, Photovoltaic system performance monitoring guidelines for measurement, Data exchange and analysis. 1998.
- [48] : A. Oi. « Design and simulation of photovoltaic water pumping system », These de Doctorate, California Polytechnic State University San Luis Obispo, 2005
- [49] : J. Royer, T. Djako, « Le pompage photovoltaïque », Manuel de cours à l'intension des ingénieurs et des techniciens, Université d'Ottawa, 2002.
- [50] : M. Angel, C. Pastor, « Conception et réalisation de modules Photovoltaïque électroniques », Thèse de Doctorat « Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006
- [51] Y. Pankow, « Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque », Thèse de Doctorat de L'Ecole Doctorale de L'ENSAM ED432, 2004.
- [52] : B. Multon, H. B. Ahmed, N. Bernard, « les moteurs électriques pour applications de grande série », Pierre-Emmanuel CAVAREC Antenne de Bretagne de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, Revue 3EI juin 2000.
- [53] : M. SLAMA Fateh, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », Thèse de Magister de l'université Ferhat Abbas - Sétif-
- [54] B. Molle, « Les stations de pompage individuelles pour l'irrigation », juin 1996

Bibliographie

[55] A. Hadj Arab, M. Benghanem et A. Gharbi, « Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque », Rev. Energ. Ren. Vol. 8 (2005) 19 – 26.