

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université d'EL-Oued
Faculté des Sciences et de Technologies



Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme de
LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Génie Électrique
Spécialité: Réseaux Électriques

Thème

Généralités sur l'Energie
Photovoltaïque

Dirigé par:

M. Nouredine BESSOUS

Réalisé par:

- DJEDID Mohammed El Mehdi
- REDOUANI Mohammed Salah
- DJARI Bachir

Année universitaire : 2013/2014

Remerciements

Nous tenons à remercier très sincèrement notre encadreur, Nouredine BESSOUS , pour ses conseils précieux, ses orientations judicieuses, sa patience, sa diligence, ainsi que ses suggestions et critiques qui ont facilité l'achèvement de ce présent travail.

Nous tenons également à remercier Mr le président de jury, pour l'honneur qu'il nous a fait de présider le jury. Nous remercions aussi tous les membres de jury, qui ont bien voulu examiner ce travail.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui nous ont soutenu de près ou de loin, à l'élaboration de ce travail.

Résumé Mémoire (Généralités sur l'énergie les photovoltaïques)

Afin de continuer le mode de vie moderne et répondre, dans le future, aux besoins industriels et ménagères en énergie, on doit assurer le remplacement des sources non renouvelables (notamment les hydrocarbures) par des sources renouvelables (inépuisables).

L'énergie solaire, dans ce domaine, est l'une des sources les plus prometteuses. Dans ce contexte, le présent mémoire intitulé ; **GENERALTES SUR L'ENERGIE LES PHOTVOLTAIQUES** relate dans un premier chapitre la production des différents types d'énergie électrique en mentionnant leurs avantages et inconvénients, et décrit dans un deuxième les côtés techniques concernant la conversion photovoltaïque, ainsi on va débiter par la description des cellules solaires et leur principe de fonctionnement, puis les différents branchements des panneaux et leurs installations et pour terminer on aura une idée sur la conversion, les systèmes de stockage et le couplage charge et source.

(عموميات حول الألواح الكهروضوئية)

قصد الإستمرار في نمط الحياة العصرية وتلبية حاجات الصناعة والمساكن من الطاقة في المستقبل، يتعين ضمان تعويض المصادر غير المتجددة (لاسيما المحروقات) () .

وتعتبر الطاقة الشمسية، في هذا المجال، أحد المصادر الواعدة جدا. في هذا السياق، تسرد هذه المذكرة، المعنونة: **عموميات حول الألواح الكهروضوئية** ، في باب أول إنتاج مختلف أنواع الطاقة الكهربائية مع الإشارة إلى محاسنها ومساوئها، وتصف في ثان الجوانب التقنية المتعلقة بالتحويل الكهروضوئي ، وهكذا تبدأ بالتعريف بالخلايا الشمسية ومبد عملها ثم أنواع الربط المختلفة للألواح وتركيباتها لتنتهي بأخذ فكرة عن التحويل، أنظمة التخزين و .

Symboles

PV	- Photovoltaïque ;
D	- une diode ;
G	- une source de courant ;
Rs	- une résistance série (Ω) ;
Rsh	- une résistance shunte (Ω) ;
$\alpha = 2$ et $\beta = 2$ selon	- sont les Coefficient des cellules ;
I_{01} et I_{02}	- Les deux courants de saturation (A) ;
I_d	- le courant de diode (D) ;
a	- est un facteur de dimension ;
k	- La constant de Boltzmann ($k = 1.381 \cdot 10^{23} J / K$) ;
q	- La constante de charge d'électron ($q = 1.602 \cdot 10^{-19} C$) ;
V	- La tension de sortie (V) ;
I_{ph}	- Courant de la cellule PV (Photo-Courant) ;
I_{sc}	- Le courant de court-circuit (A) ;
I_{op}	- Le courant optimal (A) ;
Voc	- La tension de circuit ouvert (V) ;
Vop	- La tension optimale (V) ;
DC	- courant direct ;
AC	- courant alternatif ;
(PPM)	- Point de Puissance Maximal ;
Ri	- La résistance interne (Ω).

SOMMAIRE.

	CHAPITRE I		
	LA PRODUCTION D'ENERGIES ELECTRIQUES.		
I.1.	<i>Introduction.</i>		02
I.2.	LA PRODUCTION D'ENERGIE ELECTRIQUE.		02
I .2.1.	Le principe de production.		02
I .2.2.	Les différents types d'énergie.		02
	I.2.2.1.	Energies non renouvelables.	03
	I.2.2.2.	Energies renouvelables.	03
		I.2.2.2.1. Définition.	03
		I.2.2.2.2. Avantages et inconvénients.	04
I.3.	LES DIFFERENTES ENERGIES RENOUVELABLES.		04
I.3.1.	Energie solaire.		04
	I.3.1.1.	Définition.	04
	I.3.1.2.	Avantages et inconvénients.	06
I.3.2.	Energie géothermique.		07
	I.3.2.1.	Définition.	07
	I.3.2.2.	Avantages et inconvénients.	08
I.3.3.	Biomasse.		09
	I.3.3.1.	Définition.	09

	I.3.3.2.	Avantages et inconvénients.	10
I.3.4.	Energie hydroélectrique.		10
	I.3.4.1.	Définition.	10
	I.3.4.2.	Avantages et inconvénients.	11
I.3.5.	Energie des vagues (marémotrice).		12
	I.3.5.1.	Définition.	12
	I.3.5.2.	Avantages et inconvénients.	13
I.3.6.	Energie éolienne.		14
	I.3.6.1.	Définition.	14
	I.3.6.2.	Avantages et inconvénients.	15
I.4.	EXEMPLE DE BASE (CENTRALE HYDRAULIQUE).		16
1.	Puissance disponible.		16
2.	Types des centrales hydrauliques.		16
	a	Les centrales de haute chute.	16
	b	Les centrales de moyenne chute.	17
	c	Les centrales de basse chute.	18
3.	Parties principales d'une centrale hydraulique.		18
	a	Le barrage.	18
	b	Le déversoir (évacuateur de crue).	18
	c	La conduite d'amenée.	18
	d	La conduite d'échappement.	19
	e	Salle de commande.	19
4.	Centrales à réserve pompée.		19
I.5.	TRANSPORT ET DISTRIBUTION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE.		21
I.6.	Conclusion.		23

	CHAPITRE II		
	CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE		
II.1.	<i>Introduction.</i>		25
II.2.	LES CELLULES SOLAIRES.		25
II.3.	LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.		25
II.4.	LES DIFFERENTS TYPES DE GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUES.		26
II.4.1.	Silicium monocristallin.		26
		Avantages.	27
		Inconvénients.	27
II.4.2.	Silicium polycristallin (multicristallin).		27
		Avantages.	27
		Inconvénients.	27
II.4.3.	Silicium amorphe.		27
		Avantages.	27
		Inconvénients.	28
II.5.	SCHÉMA ÉQUIVALENT D'UNE CELLULE SOLAIRE.		28
II.6.	LE GÉNÉRATEUR PV ET SES PERFORMANCE.		29
II.6.1.	Caractéristique courant-tension.		29
II.6.2.	Caractéristique puissance-tension.		31
II.6.3.	Influence de l'éclairement.		32
II.6.4.	Influence de la température.		34
II.7.	LES DIFFERENTS BRANCHEMENTS DES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES.		36
II.7.1.	Le branchement en série.		36
II.7.2.	Le branchement en parallèle.		37
II.7.3.	Le branchement mixte, en série et en parallèle.		38
II.8.	STRUCTURES D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE.		39
II.8.1.	Site isolé.		39
II.8.2.	Site connecté au réseau.		40
II.9.	LES CONVERTISSEURS.		40
II.9.1.	Les convertisseurs DC/AC.		41
II.9.2.	Les convertisseurs DC/DC.		41
	II.9.2.1.	Convertisseur vers le haut.	41
	II.9.2.2.	Convertisseur vers le bas.	42
II.10.	LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES.		42
II.10.1.	Les systèmes photovoltaïques avec stockage électrique.		42
II.10.2.	Les systèmes à couplage direct sans batterie.		43
II.11.	COUPLAGE LA CHARGE ET SOURCE PHOTOVOL-		44

	TAÏQUE.	
II.12.	AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE.	47
II.12.1.	Avantages.	47
II.12.2.	Inconvénients.	47
II.13	<i>Conclusion.</i>	48

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

Les énergies renouvelables (EnR en abrégé) sont des sources d'énergies dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle de temps humaine. L'expression énergie renouvelable est la forme courte et usuelle des expressions « sources d'énergie renouvelables » ou « énergies d'origine renouvelable » qui sont plus correctes d'un point de vue physique.

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique renouvelable produite à partir du rayonnement solaire.

La cellule photovoltaïque est le composant électronique de base, utilisant l'effet photoélectrique. Plusieurs cellules reliées entre elles forment un module solaire photovoltaïque ; plusieurs modules regroupés forment une installation solaire produisant une électricité qui peut être utilisée sur place, ou alimenter un réseau de distribution.

Notre mémoire étudie d'une manière généralisée la centrale photovoltaïque.

CHAPITRE I
PRODUCTION D'ENERGIES
ELECTRIQUES.

I.1 INTRODUCTION :

L'énergie est nécessaire dans toutes nos activités quotidiennes pour la production du chauffage, de l'électricité, dans l'industrie, pour la construction et dans les transports. Depuis que l'industrialisation a commencé, il y a plus de 200 ans, la richesse économique a été immédiatement liée avec l'accès aux combustibles fossiles pour la production énergétique, en premier lieu le charbon, mais plus récemment le pétrole et le gaz. Le problème de la consommation d'énergie est aussi devenu de plus en plus important.

Pour résoudre ce problème, des politiques énergétiques de développement ont été conduites pour exploiter au mieux les ressources en énergies renouvelables existantes. Les technologies mises en œuvre sont très importantes et font appel au génie électrique et aux matériaux de pointe. Les énergies renouvelables comme les énergies: solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, marémotrice et de la biomasse sont des énergies de flux, on les oppose aux énergies fossiles qui sont disponibles sous forme de réserve.

Dans ce chapitre, on va commencer par avoir une idée sur la production d'énergie électrique, par la suite on va traiter les différents types d'énergies renouvelables en résumant leurs avantages et leurs inconvénients, on va prendre aussi la centrale hydraulique comme exemple de base, et on terminera par le transport et la distribution de l'énergie électrique.

I.2 LA PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE :

I.2.1 Le principe de production:

Une centrale électrique fonctionne grâce à un réservoir d'énergie dite primaire qui sera transformée en énergie mécanique, une turbine qui possède de l'énergie mécanique du fait de son mouvement de rotation (sauf centrale éolienne), et un alternateur qui convertit l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique, [1].

I.2.2 Les différents types d'énergie:

On distingue deux grands types des énergies, les ***non renouvelables*** et les ***renouvelables*** :

Les premières sont produites grâce au pétrole, le gaz, le charbon et l'uranium.

Les secondes couvrent le solaire, le géothermique, la biomasse; l'hydroélectrique, les vagues, et l'éolien. Toutes ces énergies ne sont pas utilisées de la même façon.

I.2.2.1 Energies non renouvelables :

Les réserves en pétrole et gaz existantes sont limitées dans la terre et vu l'excès de leur utilisation elles sont appelées à disparaître, parce qu'il faudrait des millions d'années pour que les quantités consommées de ces ressources fossile se reforment. Alors le pétrole et le gaz ne sont pas renouvelables. Aussi, l'énergie nucléaire n'est pas une énergie renouvelable car la réserve d'uranium disponible sur Terre est limitée.

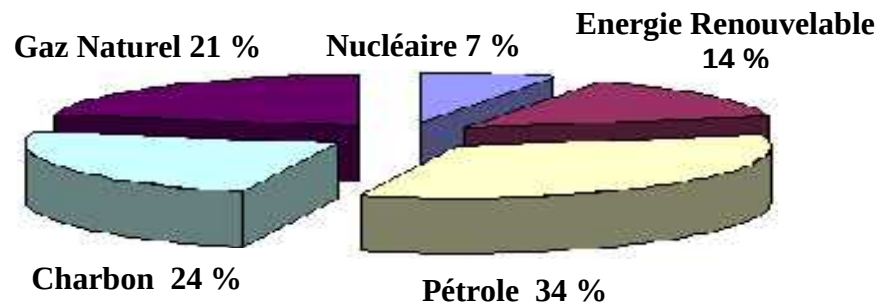


Figure I.1: Répartition des sources primaires d'énergie dans le monde.

I.2.2.2 Energie renouvelable :

I.2.2.2.1 Définition :

L'énergie renouvelable se rapporte à la puissance développée par une source renouvelable. C'est à dire, quand l'énergie est produite, la ressource n'est pas épuisée.

D'une manière générale, on peut appeler une énergie renouvelable toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme.

Le caractère renouvelable d'une énergie dépend non seulement de la vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée. Par exemple, le bois est une énergie renouvelable tant qu'on abat moins d'arbres qu'il n'en pousse. Le comportement des consommateurs d'énergie est donc un facteur à prendre en compte dans cette définition.

Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique).

La notion d'énergie renouvelable est souvent confondue avec celle d'énergie propre. Or, même si une énergie peut être à la fois renouvelable et propre, les énergies renouvelables ne sont pas tous nécessairement propres, [2].

Le mot renouveler veut dire remplacer. Renouveler l'énergie, c'est aussi remplacer l'énergie fossile qui exploite le charbon, le pétrole et le gaz qui sont des réserves limitées et qui polluent l'environnement, par des énergies dont les ressources sont inépuisables et non polluantes, qu'on appelle aussi énergie de remplacement.

I.2.2.2 Avantages et inconvénients:

Les principaux avantages des énergies renouvelables en plus de leur caractère renouvelable bien sûr, qui fait qu'on ne prive pas les générations futures de ressources rares, sont:

- 1- L'absence de problèmes liés au rejet de gaz à effet de serre.
- 2- Les sources sont disponibles gratuitement.
- 3- Ce sont des énergies écologiques ...etc.

Mais, aussi leurs inconvénients:

- 1- Elles occupent un espace souvent revendiqué pour d'autres usages (vallées pour l'hydraulique, côtes et crêtes pour les éoliennes);
- 2- Il est peu probable de se fier entièrement sur les énergies renouvelables, à cause du cout très élevé de leurs installations, comme les éoliennes et les panneaux solaires.. etc.,.

I.3 LES DIFFERENTES ENERGIES RENOUVELABLES :

I.3.1 Energie solaire :

I.3.1.1 Définition :

Le soleil est une source énorme d'énergie et depuis les anciens temps l'homme a toujours rêvé de l'utiliser. La terre reçoit du soleil, environ 10000 fois la quantité totale d'énergie consommée par l'ensemble de l'humanité. En d'autres termes, capter 0.01% de cette énergie nous permettrait de nous passer de pétrole, de gaz, de charbon et d'uranium, [3].

- **Energie solaire passive :**

C'est l'art de planifier l'architecture d'une maison afin de bénéficier des rayons du soleil pour réduire les besoins en chauffage.

Les principes de base sont :

- Orientation de la maison vers le sud ;
- Grandes fenêtres de ce côté ;
- Petites fenêtres sur le côté Nord ;
- Choix de matériaux ayant une bonne masse thermique pour absorber la chaleur pendant la journée et la libérer pendant la nuit.

Il s'agit d'une technologie peu chère qui permet de faire des économies spectaculaires. Comme la plupart des maisons construites aujourd'hui seront toujours intactes lorsqu'on aura épuisé les réserves d'énergies combustibles, il faut absolument tenir compte de ces principes.

- **Energie solaire active :**

Elle utilise des capteurs plans pour concentrer la chaleur de la lumière pour chauffer un liquide. L'essentiel est de "piéger" cette chaleur en créant un petit "effet de serre". Les installations les plus simples de ce type chauffent l'eau pour les besoins en eau chaude des ménages. Cette technique permet aussi de chauffer une maison en faisant circuler l'eau chaude dans les murs sous le plancher.

- **Photovoltaïque :**

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'énergie récupérée et transformée directement en électricité à partir de la lumière du soleil par des panneaux photovoltaïques. Elle résulte de la conversion directe dans un semi-conducteur (le silicium, le CdTe, l'AsGa, le CIS, etc.) d'un photon en électron.

Outre les avantages liés à l'absence de maintenance des systèmes photovoltaïques, cette énergie répond parfaitement aux besoins des sites isolés et dont le raccordement au réseau électrique est trop onéreux. L'énergie solaire photovoltaïque est également appelée énergie photovoltaïque.

L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par Antoine Becquerel, grand père de Henri Becquerel qui découvrit en 1896 la radioactivité, [4].

Les figures I.2, et I.3, représentent des exemples de capteurs plans, qui sont surtout utilisés dans la production d'eau chaude sanitaire, et capteurs fixes à usage domestique, qui sont généralement installés sur le toit des habitations.



Figure I.2 : Exemple de capteur plan



Figure I.3 Exemple de panneau solaire

I.3.1.2 Avantages et inconvénients :

Par rapport aux énergies classiques, l'énergie solaire possède les avantages suivants:

1. Après avoir recouvert les coûts initiaux, l'énergie émanant du soleil est pratiquement gratuite;
2. Selon la façon dont l'énergie est utilisée, les périodes de récupération peuvent être très courtes lorsqu'on les compare au coût des sources d'énergie généralement utilisées;
3. Le soleil fournit une alimentation quasi illimitée en énergie solaire;
4. L'utilisation de l'énergie solaire supplante l'énergie classique. Cela permet de diminuer de façon significative les émissions des gaz à effet de serre.

Parmi les inconvénients, on cite :

1. Source de faibles intensité et intermittente qui dépend de l'ensoleillement;
2. Coût élevé des installations pour le chauffage;
3. Coût élevé des cellules photovoltaïques;
4. L'énergie solaire est beaucoup plus coûteuse que les sources d'énergie conventionnelles, ceci revient au problème classique de l'offre et de la demande;
5. Elle ne convient pas pour le moment aux utilisations à forte consommation d'énergie.

I.3.2 Énergie géothermique :**I.3.2.1 Définition :**

La géothermie est la seule source d'énergie dont l'énergie ne provient pas du soleil, mais des processus de désintégration à l'intérieur de la croûte terrestre. À part cela, il existe également la géothermie volcanique.

Le principe consiste à extraire l'énergie contenue dans le sol. La température croît depuis la surface vers le centre de la Terre. Selon les régions géographiques, l'augmentation de la température avec la profondeur est plus ou moins forte, et varie de 3 °C par 100 m en moyenne jusqu'à 15°C ou même 30°C. La chaleur produite sert dans la plupart des cas à la production d'eau chaude sanitaire et au chauffage de bâtiments.

Quatre types de géothermie existent selon la température de gisement:

- Haute (>180°C).
- Moyenne (>100°C).
- Basse (>30°C).
- Très basse énergie (<30°C).

Les deux premiers types favorisent la production de l'énergie électrique. La géothermie basse énergie permet de couvrir une large gamme d'usages : chauffage urbain, chauffage de serres, utilisation de chaleur dans les processus industriels...etc. La géothermie très basse énergie nécessite l'utilisation des pompes à chaleur et donc une installation particulière.

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques. C'est donc une énergie fiable et disponible dans le temps. Cependant, il ne s'agit pas d'une énergie entièrement inépuisable dans le sens où un puits verra un jour son réservoir calorifique diminuer. Si les installations géothermiques sont technologiquement au point et que l'énergie qu'elles prélèvent est gratuite, leur coût demeure, dans certains cas, très élevé, [5].



**Figure I.4 : Centrale géothermoélectrique de Hatchobaru
(Japon 300 MW)**

I.3.2.2 Avantages et inconvénients:

Les avantages sont:

- 1- Elle peut être considérée comme l'énergie la moins chère pour éviter l'émission de gaz carbonique;
- 2- C'est une énergie propre qui n'émet pas ou peu de polluants. Son exploitation ne génère pas de flamme, pas d'odeurs, pas de fumée, pas de ramonage, etc.

Les inconvénients sont :

- 1-Selon la nature du sol, les coûts de forage peuvent être très élevés. Mais si la mise en place d'une installation géothermique correspond à un investissement important, le coût d'exploitation est quasiment nul;
- 2- L'épuisement de la source est possible sur certains stocks trop petits lors de leur exploitation;
- 3- L'expansion de la géothermie se heurte également à l'absence de réelle volonté politique, exprimée notamment dans la lourdeur des taxes;
- 4- Les seuls risques de pollution existants sont de rejeter à la surface du sol l'eau extraite si celle-ci contient des métaux lourds. Ce risque est évité lorsqu'elle est réinjectée en sous-sol;
- 5- Risque de glissement de terrain;
- 6- L'énergie géothermique devient rentable au bout de 5 ans maximum,[6].

I.3.3 Biomasse:**I.3.3.1 Définition :**

La biomasse désigne toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre. Généralement, les dérivés ou déchets sont également classés dans la biomasse, différents types sont à considérer : le bois – énergie, les biocarburants, le biogaz. Le bois énergie est une ressource très abondante. C'est la ressource la plus utilisée au monde. En Europe, c'est 51% de la part de l'énergie renouvelable qui appartient à ce mode de production d'énergie. Elle se concentre sur l'utilisation destinée au chauffage.

L'Union européenne projette d'atteindre une production de 17 millions de tonnes de biocarburant par an en 2010 par rapport à un million produit actuellement. La principale motivation qui pousse à la production du biogaz est environnementale. Quelle que soit l'origine, le biogaz non valorisé contribue, du fait de ses fortes teneurs en méthane, à l'effet de serre, mais c'est le bilan global du cycle qui doit être considéré. Il peut être utilisé comme source brute ou après le processus d'épuration injecté dans les réseaux de distribution.

Longtemps le biogaz ne servait qu'à la production de la chaleur. De nos jours la filière carburant ainsi que la génération de l'électricité est en pleine expansion. En 1993, 6 millions de m³ ont été utilisés dans le monde. L'utilisation du biogaz n'est pas encore à son maximum, une croissance de cette technologie est donc à prévoir, [5].



Figure I.5: La central biomasse

I.3.3.2 Avantages et inconvénients :

Pour cette source on cite les avantages suivants:

1. Il est possible d'utiliser la biomasse indéfiniment comme source d'énergie parce que la matière végétale se renouvelle continuellement;
2. L'utilisation de la bioénergie ne provoque aucune augmentation des gaz à effet de serre, mais peut réduire la quantité de méthane, émis par la matière végétale en décomposition;
3. La bioénergie a, en général, une incidence favorable sur les économies locales;
4. Un plus grand nombre d'emplois peut être créé parce qu'une main d'œuvre plus importante est nécessaire pour manipuler les combustibles issus de la biomasse ;
5. L'utilisation de la biomasse offre des avantages significatifs à d'autres industries locales, par exemple, l'élimination des arbres morts, malades ou de mauvaise qualité des forêts;
6. Les matières qui forment la biomasse sont souvent des rebuts provenant des activités industrielles, leur élimination diminue la nécessité d'agrandir les sites d'enfouissement locaux tout en produisant une énergie utile .

Les inconvénients de cette source d'énergie sont :

1. Son rendement énergétique est assez faible ;
2. Pour produire de l'énergie biomasse il faut occuper des terres arables et donc baisser la production agricole ;
3. Elle dégage du CO₂ ;
4. Une surexploitation de la biomasse peut entraîner une déforestation importante et donc un danger pour l'environnement ;
5. Elle provoque la pollution des eaux et des sols ;
6. Les coût et les impacts du transport pour amener le bois là où la ressource manque,[6].

I.3.4 Hydroélectrique :**I.3.4.1 Définition :**

L'énergie hydroélectrique est la production d'énergie utilisable sous forme d'électricité à partir de l'eau. Cette électricité est produite par un générateur, une fois que

l'eau en mouvement est passé à travers une turbine, figure 1.6, présente un schéma de principe d'une centrale hydraulique.

Etant donné que les systèmes naturels comme les rivières contiennent déjà une grande partie de ces éléments, elles peuvent être utilisées. Dans le cas où le mouvement naturel de l'eau ne serait pas possible ou insuffisant pour la production d'énergie, il est possible de rencontrer des systèmes comme les barrages où l'eau est dirigée sur une turbine en sous-sol, puis pompée pour être ramenée à sa source après utilisation (en générale pendant les heures creuses de consommation de l'électricité).

L'énergie hydroélectrique est une source d'énergie renouvelable, cela signifie que la source qui fournit l'énergie peut être renouvelée. En effet contrairement aux sources non renouvelables, on n'épuise pas complètement l'eau. On la trouve après qu'elle a été utilisée pour la production d'énergie.

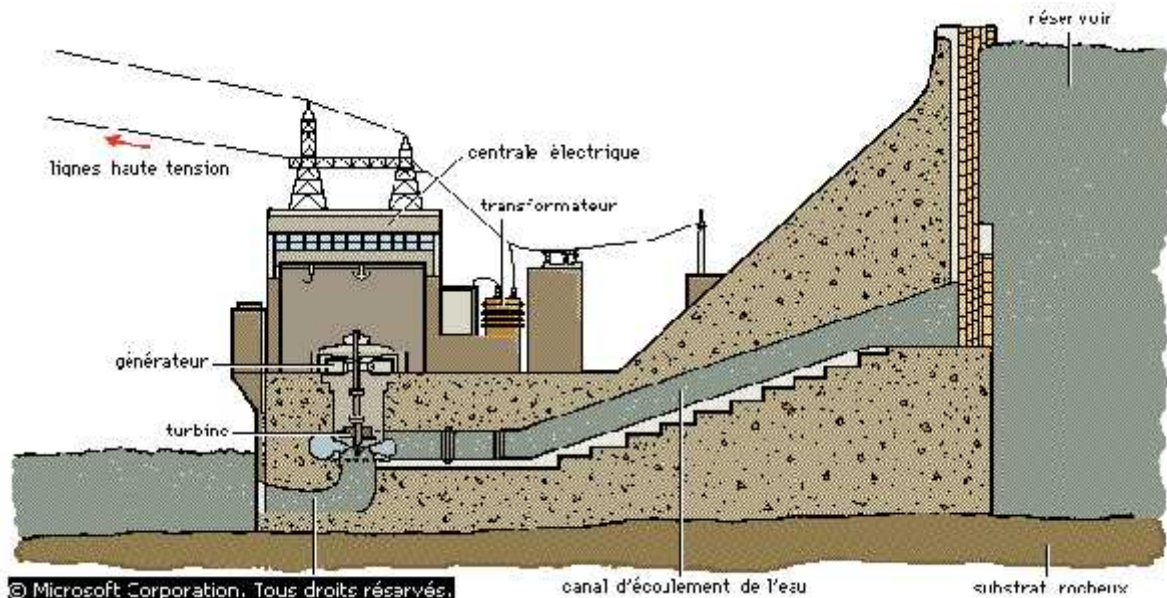


Figure I.6 : Exemple du principe d'une centrale hydraulique

I.3.4.2 Avantages et inconvénients:

Le développement de l'énergie hydroélectrique pendant ces cent dernières années a montré que la technologie est mature, faisant de l'eau la première source d'énergie renouvelable utilisée dans le monde.

Ses avantages sont :

1. L'énergie hydroélectrique est une source d'énergie électrique continuellement renouvelable;
2. On peut utiliser une proportion assez importante de l'énergie hydraulique et les

coûts opératoires et de maintenance sont assez faibles;

3. L'énergie hydroélectrique est non polluante; aucune chaleur ni aucun gaz nocif n'est émis;

4. Les centrales hydrauliques, ont des durées de vie de deux à dix fois celles des usines à charbon ou nucléaire, bon nombre d'entre elles sont en activité depuis plus d'un demi-siècle et fonctionnent toujours efficacement;

5. La technologie de l'énergie hydroélectrique est une technologie qui a fait ses preuves et qui offre un fonctionnement fiable et souple;

6. Les barrages qui sont utilisés dans ces usines aident à éviter les inondations et fournissent un débit d'eau d'irrigation régulier aux régions en aval du barrage.

Cependant il y a quelques inconvénients :

1. les problèmes d'environnement et de perturbation de l'équilibre écologique.

2. les grands et moyens barrages coûtent très cher : les gouvernements cherchent de plus en plus à faire appel à des fonds privés ou aux organismes internationaux comme la Banque mondiale pour les financer. Et les investisseurs privés pourraient se détourner des projets hydroélectriques en privilégiant le développement des énergies fossiles, en raison des erreurs qui ont souvent été commises jusqu'ici dans la construction des grands barrages : manque de discipline et retards importants lors de la construction ; programmes de déplacement des populations mal conçus et mal réalisés ; coûts nettement plus élevés que prévu à l'origine ; processus de prise de décision davantage politique qu'économique...etc...

L'avenir du développement de l'hydroélectricité dépend donc de la capacité des gouvernements et du secteur public à s'entendre avec le secteur privé, afin que celui-ci accepte d'investir dans la construction de barrages...[7].

I.3.5 Energie des vagues (marémotrice) :

I.3.5.1 Définition :

L'énergie des vagues est encore une fois une forme particulière de l'énergie solaire. Le soleil chauffe inégalement les différentes couches atmosphériques ce qui entraîne des vents eux-mêmes responsables par frottement des mouvements qui animent la surface de la mer (courants, houle, vagues). Les vagues créées par le vent à la surface des mers et des océans

transportent de l'énergie. Lorsqu'elles arrivent sur un obstacle elles cèdent une partie de cette énergie qui peut être transformée en énergie électrique.

L'énergie en provenance du mouvement des eaux de la mer est une énergie très difficilement récupérable bien qu'elle représente un potentiel immense. Les investissements sont très lourds dans un environnement hostile et imprévisible. Cette énergie est à exploiter dans l'avenir et ne représente qu'une toute petite quantité de l'énergie produite à ce jour par rapport aux autres ressources exploitées, [5].



Figure I.7 : Usine marémotrice de la Rance 240 MW

I.3.5.2 Avantages et inconvénients:

Parmi les avantages on site les suivants :

1. Énergie gratuite;
2. L'énergie des vagues est plus utile et mieux adaptée pour l'alimentation en électricité des îles éloignées où toute autre manière de l'alimenter en électricité est limitée et coûteuse;
3. C'est une bonne idée que d'intégrer l'énergie des vagues dans des projets de cogénération afin d'optimiser la production d'énergie;
4. Il y a également un fort potentiel pour la production d'électricité à partir des vagues ou pour les industries de désaliénation de l'eau, dans des pays côtiers ayant des problèmes d'alimentation en eau douce, tels sur le continent africain et au Moyen Orient.

L'énergie des vagues possède certains inconvénients, on site les suivants :

1. L'énergie des marées ne peut fournir qu'une petite contribution à l'approvisionnement en énergie, car il y a peu de sites permettant ce type d'installation;

2. Les coûts de construction sont élevés et les risques de détérioration du matériel à cause du sel sont trop importants. Cependant il y a quelques régions qui possèdent les bonnes conditions pour produire de l'énergie grâce aux marées;

3. Variation de la production en fonction de l'amplitude des marées;

4. Conséquences sur l'environnement.

I.3.6 Eolienne :

I.3.6.1 Définition :

L'éolienne (éol : le dieu du vent chez les grec), est une énergie cinétique du vent, utilisée après conversion en énergie mécanique ou électrique. Cette énergie résulte de la force exercée par le vent sur les pales d'une hélice montée sur un arbre rotatif, lui-même relié soit à des systèmes mécaniques qui servent à moudre le grain ou à pomper l'eau, soit à un aérogénérateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Lorsque l'arbre est connecté à une charge, par exemple à une pompe, la machine est appelée roue éolienne ; lorsque celle-ci est utilisée pour produire de l'électricité, L'énergie électrique produite par les aérogénérateurs peut être distribuée par le biais d'un réseau ou utilisée en complément des générateurs autonomes dans les collectivités non reliées à un réseau. La puissance et le débit d'énergie d'une éolienne augmentent en fonction de la hausse de la vitesse du vent, La figure I.8, montre trois utilisations de l'énergie éolienne: (a)le pompage de l'eau, (b) un moulin à vent et (c) la production de l'électricité.

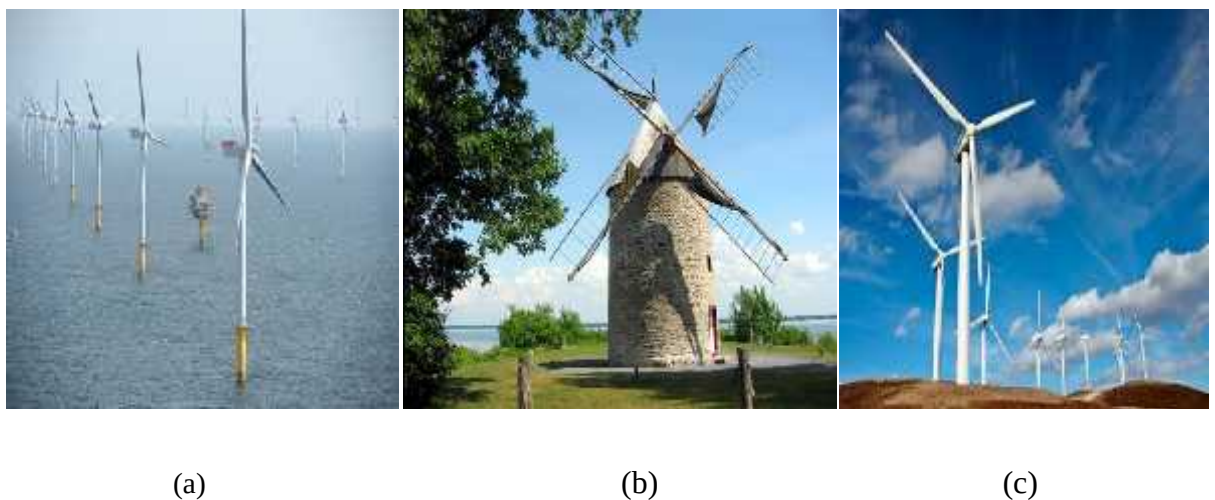


Figure I.8 Exemples d'éoliennes

I.3.6.2 Avantages et inconvénients :

1. L'énergie éolienne est une énergie renouvelable idéale parce que :
 - Il s'agit d'une forme d'énergie indéfiniment durable et propre;
 - Elle ne nécessite aucun carburant;
 - Elle ne crée pas de gaz à effet de serre;
 2. Elle ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs;
 3. La plupart des éoliennes sont silencieuses et ne présentent aucun danger important pour les oiseaux ou les autres espèces sauvages;
 4. Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2 % du sol environ est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations;
 5. Chaque MWh d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO₂ produites chaque année par la production d'électricité avec le charbon ou le diesel;
 6. Outre les nombreux avantages qu'elle partage avec les autres sources d'énergie renouvelable (qu'on vient de citer), l'exploitation de l'énergie du vent présente une série d'avantages propres:
 7. L'énergie éolienne est modulable et peut être parfaitement adaptée au capital disponible ainsi qu'au besoin en énergie; il n'y a pas donc d'investissement superflus. Cette modularité permet de maintenir en fonctionnement la plus grande part de l'installation lorsqu'une pièce est défectueuse ;
 8. Les frais de fonctionnement sont assez limités étant donné le haut niveau de fiabilité et la relative simplicité des technologies mises en œuvre ;
 9. Le prix de revient d'une éolienne connaît une tendance à la baisse suite aux économies d'échelle réalisées sur leur fabrication ;
 10. Techniquement au point, les éoliennes sont rentables dans les régions les plus ventées ;
 11. La période de haute productivité, située souvent en hiver où les vents sont plus forts, correspond à la période de l'année où la demande d'énergie est la plus importante.
- Les principaux impacts environnementaux des fermes éoliennes sont les suivants :
1. Les effets sur le paysage;
 2. Le bruit;
 3. La perturbation de l'écologie locale des sites;

4. Les interférences électromagnétiques;
5. La sécurité;
6. Coût important ;
7. Variations importantes des quantités fournies qui dépendent de l'intensité des vents d'où la nécessité de faire appel à d'autres sources;
8. Ils ont un impact visuel nuisible, et peuvent être bruyantes lorsqu'il y a beaucoup de vent;
9. Les emplacements appropriés pour des parcs d'éoliens sont souvent dans des zones protégées.

I.4. EXEMPLE DE BASE (CENTRALE HYDRAULIQUE) :

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

1-Puissance disponible:

D'une façon générale, la puissance que l'on peut tirer d'une chute dépend non seulement de la hauteur de la chute, mais aussi du débit du cours d'eau. Le choix de l'emplacement d'une centrale hydro-électrique dépend donc de ces deux facteurs. La puissance disponible est donnée par l'équation:

$$P = 9.8 q h$$

P = puissance hydraulique, en [kW]

q = débit en mètres cubes par seconde [m^3/s]

9.8 = coefficient tenant compte des unités.

A cause des pertes, la puissance mécanique que l'on peut recueillir sur l'arbre de la turbine est inférieure à la puissance fournie par l'eau. Cependant, le rendement des turbines hydraulique est élevé: de l'ordre de 80 à 94% pour les grosses unités. Dans les alternateurs, la transformation de la puissance se fait à un rendement de 97 à 98.5%.

2- Types des centrales hydrauliques:

Suivant la hauteur de chute, on distingue:

a) -les centrales de haute chute:- ont des hauteurs de chute supérieure à 200 m; elles

utilisant des turbines Pelton. Ces centrales se trouvent dans les Alpes et dans d'autres régions très élevées.

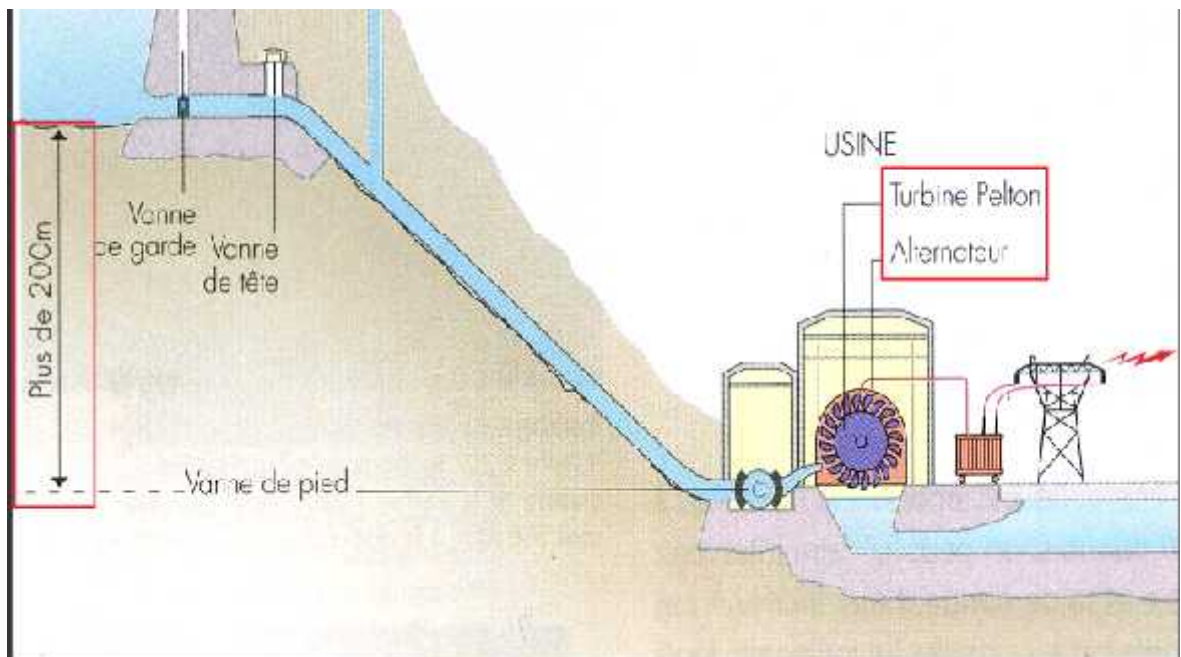


Figure I.9 : Centrale hydraulique de haute chute

b) -les centrales de moyenne chute :- ont des hauteurs comprises entre 30m et 200m; elles utilisant des turbines Francis. Ces centrales sont alimentées par l'eau retenue derrière un barrage construit dans le lit d'une rivière de région montagneuse. Elles comportent un réservoir de grande capacité.

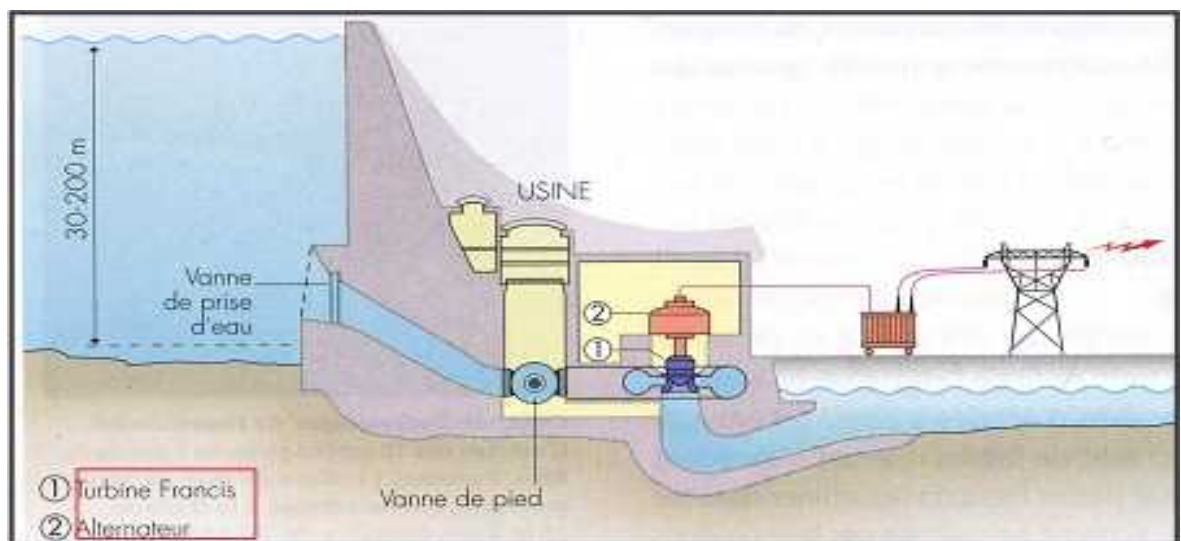


Figure I.10 Centrale hydraulique de moyenne chute

c)-les centrales de basse chute :- ou centrales au fil de l'eau, ont des hauteurs de chute inférieures à 30m; elles utilisent des turbines Kaplan ou Francis. Ces centrales sont établies sur les fleuves ou les rivières à fort débit.

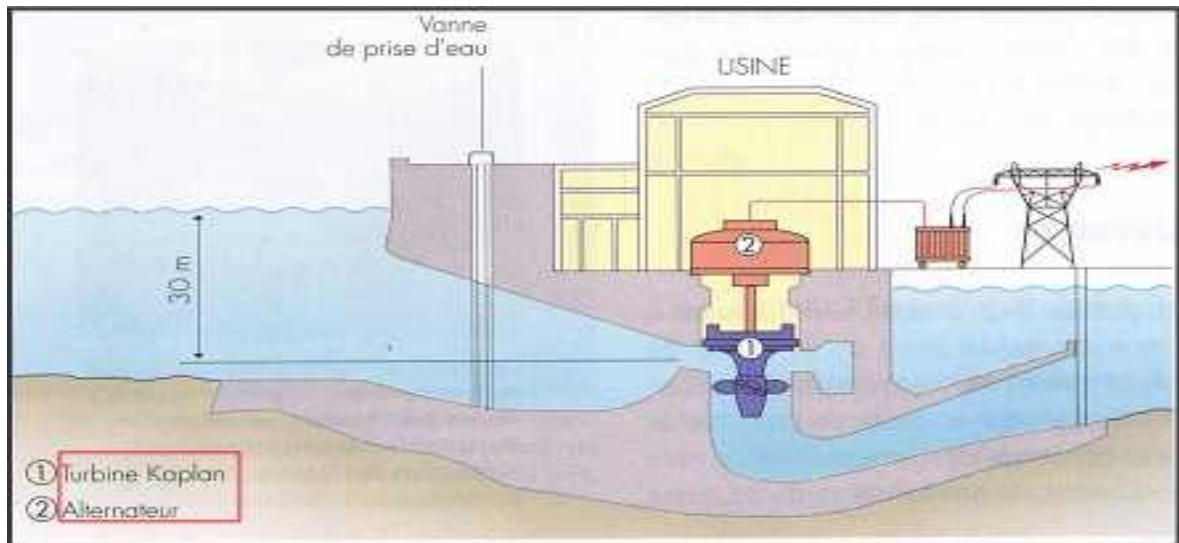


Figure I.11 Centrale hydraulique de basse chute

Les ouvrages d'aménagement, la vitesse et le type des turbines et des alternateurs varient suivant la hauteur de chute et le débit du cours d'eau.

3- Parties principales d'une centrale hydraulique:

Une centrale hydro-électrique comporte essentiellement:

a)-le barrage: les barrages de retenue sont établis en travers du lit des rivières; ils servent à concentrer les chutes près des usines et à former des réservoirs d'emmagasinement. On peut ainsi, créer des réserves d'eau pour compenser l'insuffisance de débit pendant les périodes des sécheresses et assurer à l'usine une alimentation en eau plus uniforme. Les barrages peuvent être en béton, en enrochement ou en terre. Les barrages du type poids sont les plus utilisés; ils s'opposent à la poussée des eaux par leur masse même.

b)-le déversoir (évacuateur de crue): installés près des barrages sont destinés à laisser passer l'eau lorsque son niveau dépasse une certaine hauteur. Ils permettent d'évacuer sans dégâts les débits considérables résultant de la fonte des neiges ou provoqués par des pluies de longue durée.

c)-la conduite d'amenée: la conduite d'amenée conduit l'eau du barrage jusqu'aux turbines. À l'extérieur de l'usine, elle est constituée par un canal, un tunnel ou un tuyau. La partie intérieure, appelée conduite forcée, est en béton, en acier ou en fonte. On dispose, à l'entrée de la conduite forcée, des vannes qui permettent de contrôler l'admission de l'eau. À la sortie de la conduite forcée des aménagements à moyenne et à basse chute, l'eau arrive dans la chambre

de mise en charge d'où elle est distribuée aux différentes turbines. Une couronne fixe entoure chaque turbine et assure une répartition uniforme de l'eau sur son pourtour. Une série de portes, ou vannes mobiles, disposées autour de la turbine permettent de régler l'admission de l'eau dans celle-ci. Ces vannes sont commandées par le régulateur de vitesse.

d)-la conduite d'échappement: après être passée dans les turbines, l'eau retourne dans la rivière par la conduite d'échappement. La conduite d'échappement comporte une cheminée de succion et un canal de fuite qui peut être le lit même de la rivière.

e)-Salle de commande: les appareils de commande et de contrôle sont groupés ensemble dans une salle d'où le personnel peut surveiller la marche des groupes générateurs. Les appareils de signalisation et les appareils de commandes à distance de l'excitatrice, du régulateur de vitesse et du disjoncteur de chaque groupe générateur sont montés sur un pupitre. Les instruments de signalisation, indicateurs et enregistreurs, les régulateurs de tension ainsi que les relais de protection et les différents systèmes d'alarmes sont réunis sur des panneaux.

4- Centrales à réserve pompée:

On a vu que la variation de l'appel de puissance d'un réseau nécessite l'installation de centrales de pointe. Considérons un réseau simple dont l'appel de puissance varie entre 100MW et 160MW selon la courbe de la figure I.12 on pourrait installer une centrale de base de 100MW et une centrale de pointe 60MW.

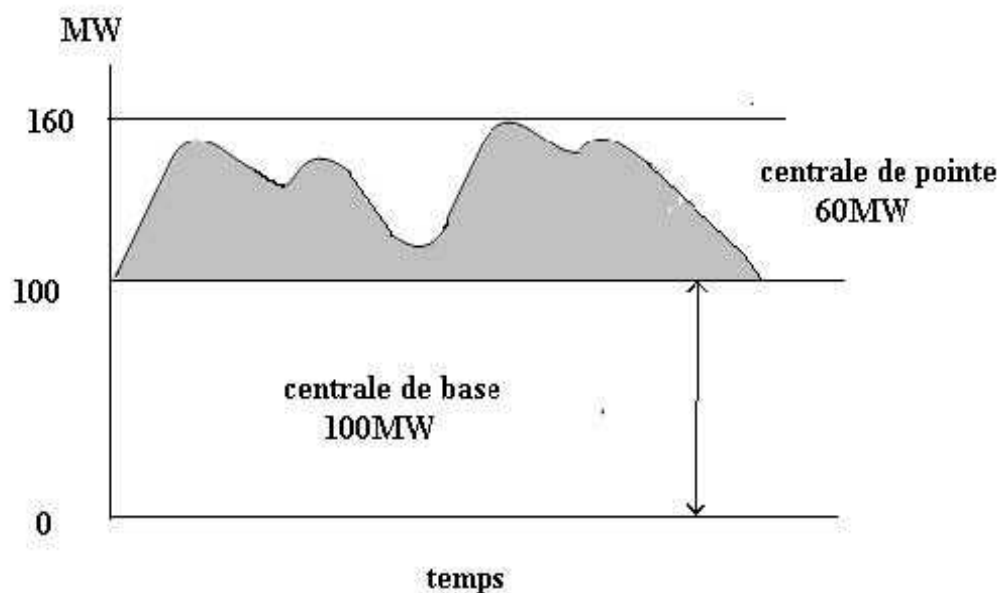


Figure I.12 : Centrale de base et centrale de pointe conventionnelle alimentant une charge maximale de 160MW

Cependant, on peut envisager une deuxième solution: elle consiste à installer une centrale de base de 130MW et une centrale de pointe spéciale de 30MW. Cette centrale de pointe aura la

propriété, non seulement de débiter de l'énergie électrique, mais aussi d'en recevoir. Pendant les périodes creuses la centrale de pointe reçoit et fiabilité de l'énergie de la centrale de base.

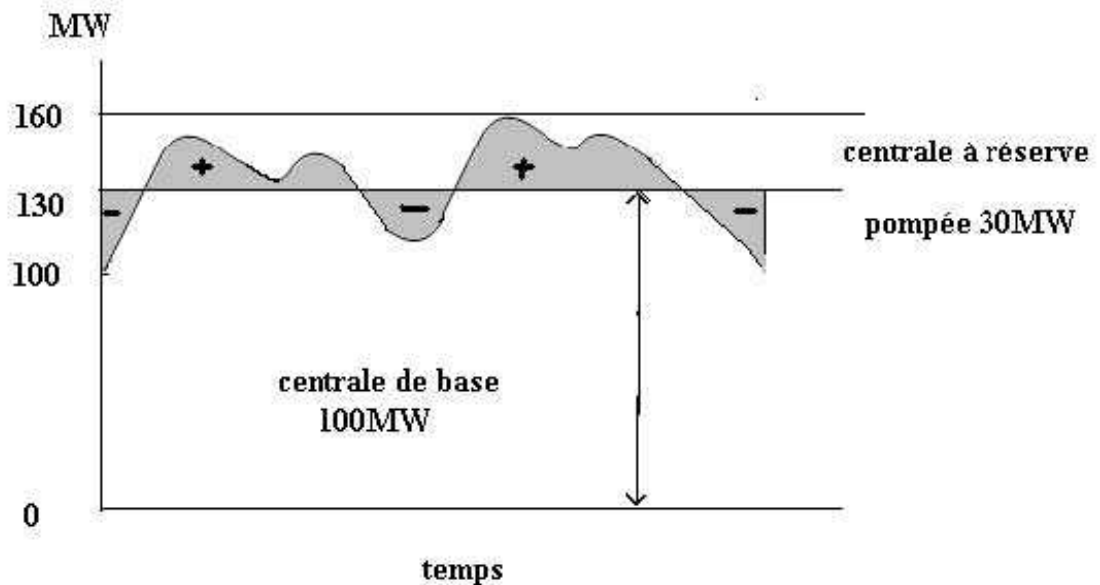


Figure I.13: Centrale de base et centrale de pointe conventionnelle alimentant une charge maximale de 160MW

Ce système possède plusieurs avantages:

- 1)- on peut utiliser une plus grande centrale de base, ce qui augmente le rendement.
- 2)- la capacité de la centrale de pointe est réduite, ce qui diminue son coût.

Ces quantités énormes d'énergie ne peuvent être emmagasinées que par des méthodes mécaniques. C'est ainsi qu'on emploie des centrales à réserve pompée. Pendant les heures de pointe; ces centrales fonctionnent comme des centrales hydrauliques classiques, utilisant l'énergie de l'eau qui s'écoule d'un réservoir supérieur dans un réservoir inférieur. Pendant les périodes creuses, les alternateurs fonctionnent comme des moteurs synchrones et entraînent les turbines qui deviennent d'énormes pompes prenant l'eau dans le réservoir inférieur pour la renvoyer dans le réservoir supérieur.

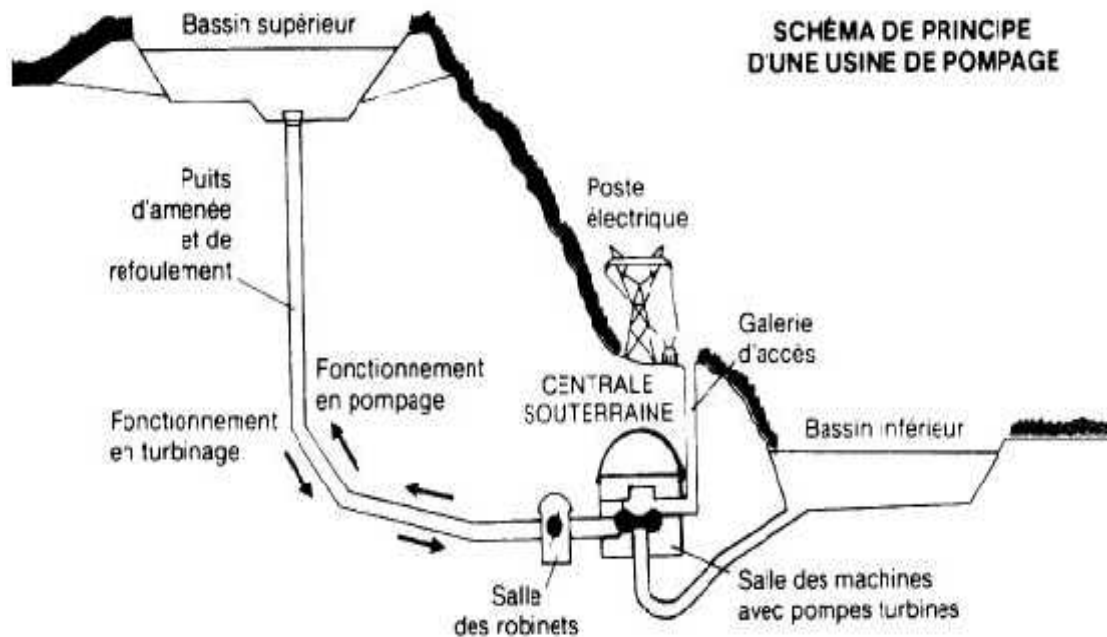


Figure I.14: schéma de principe d'une usine de pompage

Le cycle se répète une ou deux fois par jour, selon la nature du réseau et de la charge. Les machines ont une puissance comprise entre 50MW et 500MW et elles doivent être réversibles. Car on doit changer le sens de rotation lorsque la turbine fonctionne comme pompe. Le démarrage de ces gros moteurs synchrones impose une forte charge sur la ligne d'alimentation et l'on utilise parfois des méthodes spéciales pour éviter une surcharge excessive.

Les centrales à réserve pompée complètent bien les centrales nucléaires qui atteignent leur rendement maximal lorsqu'elles fonctionnent à débit constant,[8].

I.5.TRANSPORT ET DISTRIBUTION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE:

L'énergie électrique est transportée à partir de la station de production de l'énergie électrique au consommateur à l'aide des lignes conductrices appelées réseaux de transport et de distribution de l'électricité.

Le schéma ci-dessous décrit un réseau qui débute de la station de production de l'énergie électrique et se termine au consommateur.

Les réseaux de transport et distribution de l'électricité comprennent des transformateurs élévateurs et abaisseurs de tensions.

Les transformateurs placés avant le transport peuvent augmenter la tension en générale jusqu'à 220 kV, ce qui implique l'abaissement du courant électrique, afin de minimiser les pertes dans les lignes de transports, en plus de réduire le coût en utilisant des fils de petite section.

Les lignes de haute tension aérienne transportant l'énergie électrique à travers les zones rurales vers les villes et les centres industriels. Stations de distribution contenant des transformateurs abaissent la tension à 30 kV.

Les lignes de moyenne tension transportant l'énergie électrique en reliant la station de distribution aux postes de basse tension, les transformateurs abaissent la moyenne tension à basse tension de 220 V et de 380 V.

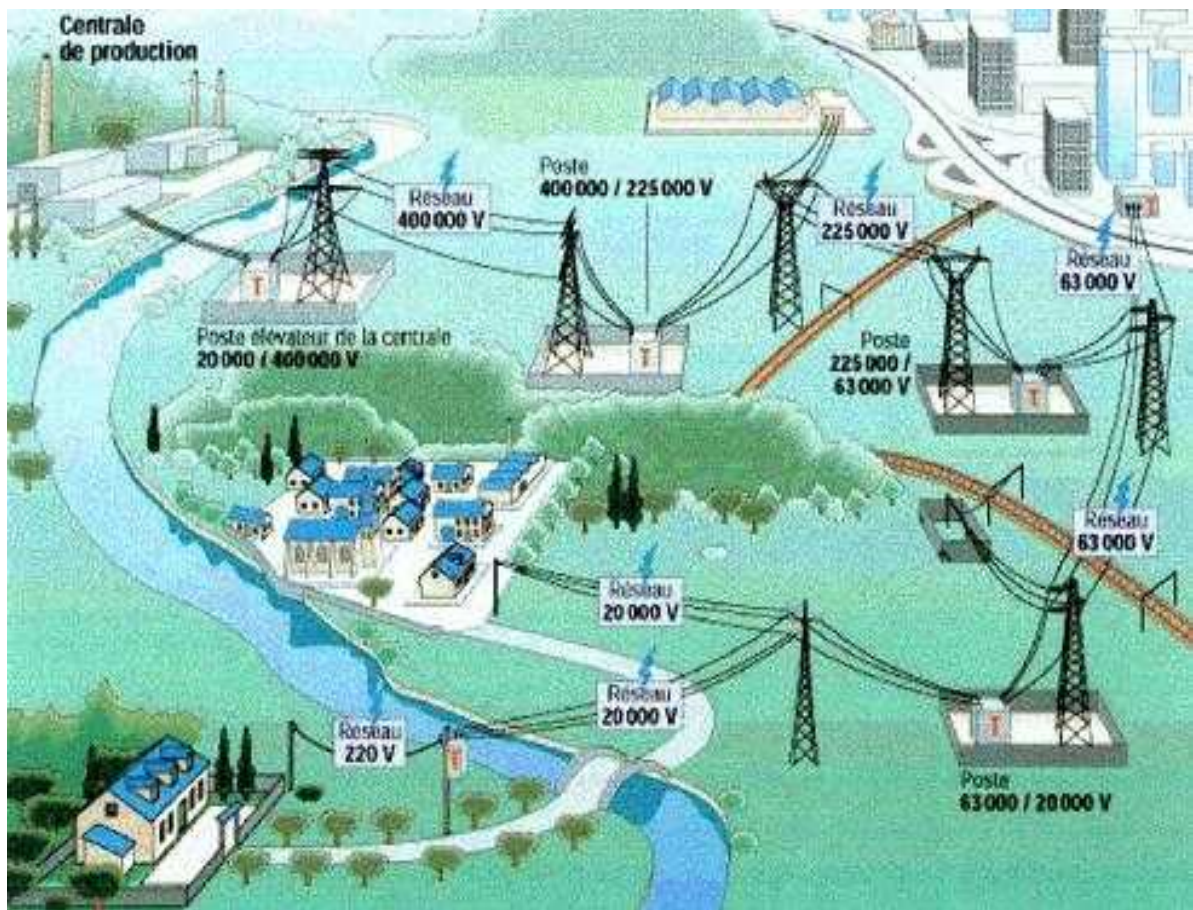


Figure I.15 : Schéma Transport et distribution de l'énergie électrique

I.6. CONCLUSION

Au rythme de la consommation actuelle, dans les pays industrialisés, un habitant utilise près de 5 tonnes de pétrole par an, selon de nombreux experts, les réserves de pétrole seraient épuisées dans une cinquantaine d'années et un peu plus pour le gaz ; celles du charbon, dans deux cents ans. Selon le conseil mondial de l'énergie, les sources d'énergies renouvelables ne pourront couvrir au mieux que 30% des besoins mondiaux vers 2020 (même si certains estiment que ce chiffre pourrait être de 60% vers 2100).

Dans ce chapitre nous avons passé en revue les différents types de production d'énergies électriques. Notre sera focalisé bien sûr les énergies renouvelables ainsi que leurs importances, leurs avantages et inconvénients et précisément à la conversion photovoltaïque.

CHAPITRE II
CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUES

II.1 INTRODUCTION:

La production d'énergie électrique par conversion de la lumière, en utilisant des cellules photovoltaïques, a connu un essor gigantesque dans les dernières années avec un taux de croissance record de plus de 40% en 2000. De nouvelles approches technologiques s'imposent en vue de réaliser des cellules photovoltaïques à coût plus bas d'une part, et d'autre part d'un rendement plus haut de conversion énergétique afin de permettre au photovoltaïque d'occuper sa place distinctive en tant qu'énergie propre, inépuisable et sûre.

II.2 LES CELLULES SOLAIRES :

Une cellule solaire photovoltaïque est une plaquette de silicium (semi-conducteur), capable de convertir directement la lumière en électricité. Cet effet est appelé l'effet photovoltaïque.

Le courant obtenu est un courant continu et la valeur de la tension obtenue est d'ordre calculable.

II.3 LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement *dopée de type n* et *dopée de type p*. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau *n* diffusent dans le matériau *p*. La zone initialement dopée *n* devient chargée positivement, et la zone initialement dopée *p* chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone *n* et les trous vers la zone *p*. Une jonction PN a été formée.

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont " bombardés " par les photons constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être " arrachés / décrochés " : si l'électron revient à son état

initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique.

Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque,[9].

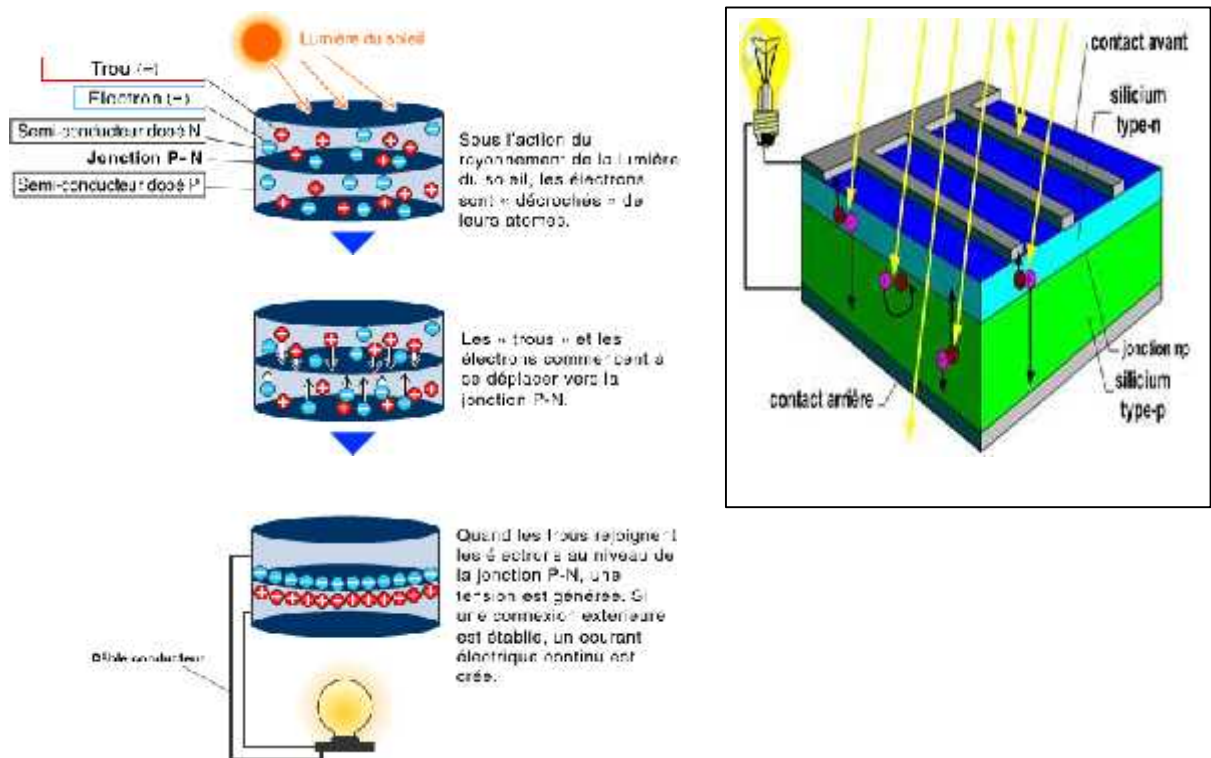


Figure II.1: Schéma d'une cellule élémentaire

II.4 LES DIFFERENTS TYPES DE GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUES:

II.4.1 Silicium monocristallin :

Les cellules en silicium monocristallin représentent la première génération des générateurs photovoltaïques.

Pour les fabriquer, on fond du silicium en forme de barreau. Lors d'un refroidissement lent et maîtrisé, le silicium se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On

découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.

Durée de vie : 20 à 30 ans.



Avantages:

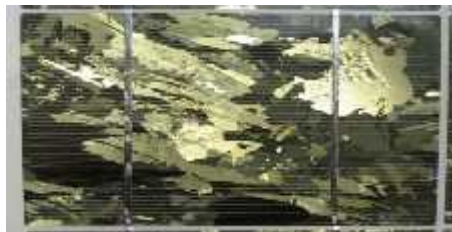
- bon rendement, de 12% à 18%
- bon ratio Wc/m^2 (environ 150 Wc/m^2) ce qui permet un gain de place si nécessaire.
- nombre de fabricants élevés

Inconvénients:

- coût élevé
- rendement faible sous un faible éclairement.

II.4.2 Silicium polycristallin (multicristallin) :

Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.



Avantages:

- ✓ cellule carrée (à coins arrondis dans le cas du Si monocristallin) permettant un meilleur foisonnement dans un module.
- ✓ moins cher qu'une cellule monocristalline.

Inconvénients :

- ✓ moins bon rendement qu'une cellule monocristalline : 11 à 15%
- ✓ ratio Wc/m^2 moins bon que pour le monocristallin (environ 100 Wc/m^2)
- ✓ rendement faible sous un faible éclairement.

Ce sont les cellules les plus utilisées pour la production électrique (meilleur rapport qualité-prix). Durée de vie : 20 à 30 ans.

II.4.3 Silicium amorphe :

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires".

• Avantages :

- fonctionne avec un éclairement faible ou diffus (même par temps couvert)

- un peu moins chère que les autres technologies
- intégration sur supports souples ou rigides.
- **Inconvénients :**
 - rendement faible en plein soleil, de 6% à 8%
 - nécessité de couvrir des surfaces plus importantes que lors de l'utilisation de silicium cristallin (ratio Wc/m^2 plus faible, environ $60 Wc/m^2$)
 - performances qui diminuent avec le temps (environ 7%),[10].

II.5 SCHÉMA ÉQUIVALENT D'UNE CELLULE SOLAIRE:

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dus à la fabrication et représentés sur le schéma équivalent (fig. II.2).

Ce schéma équivalent est constitué d'une diode (D) caractérisant la jonction, une source de courant (G) caractérisant le photo-courant, une résistance série (R_s) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte (R_{sh}) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à (R_s) et peut donc être placée indifféremment entre A et B ou entre C et D dans le schéma équivalent, [11].

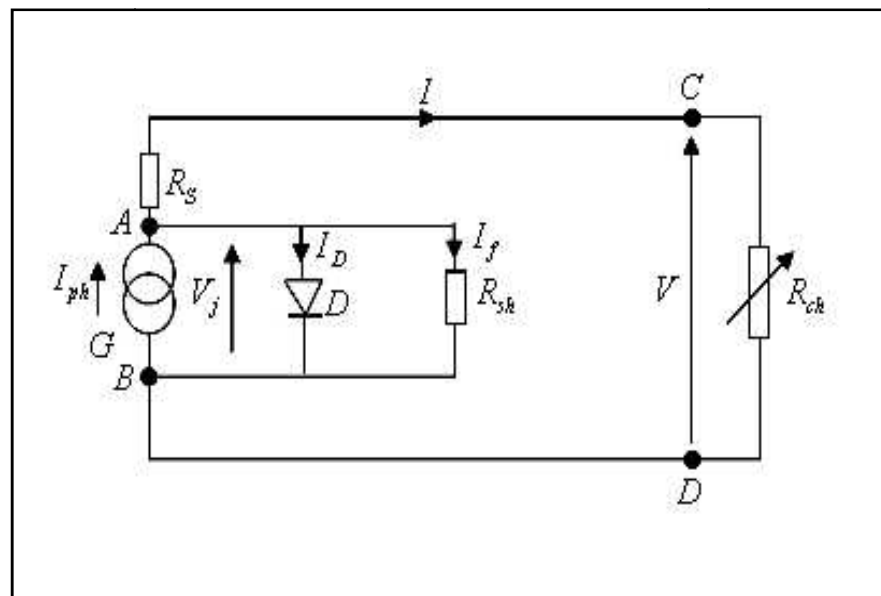


Figure II.2 : Schéma équivalent électrique d'une cellule PV

Dans notre travail, nous avons utilisé le modèle mathématique du module solaire à exponentiel simple, mais d'autres auteurs pour effectuer l'extraction des paramètres de cellule solaire tel que le courant photovoltaïque, la résistance série, la résistance parallèle, la tension thermique, et le courant de saturation ; ils ont basé ces calculs sur un modèle à double exponentiel qui est à la forme suivante [11,12] :

$$I = I_{ph} - I_{01} \left\{ \exp\left[\frac{(V + R_s I)}{a \cdot V_{th}}\right] - 1 \right\} - I_{02} \left\{ \exp\left[\frac{(V + R_s I)}{b \cdot V_{th}}\right] - 1 \right\} - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (II.1)$$

On assure que les Coefficients des cellules sont $\alpha = 2$ et $\beta = 2$ selon, [12].

En outre, les deux courants de saturation I_{01} et I_{02} sont exprimés par la formule suivante:

$$I_{01} = \frac{1}{2} \frac{I_{sc}}{\left[\exp\left(\frac{q \cdot Voc}{K \cdot T_c}\right) - 1 \right]} \quad (II.2)$$

$$I_{02} = \frac{1}{2} \frac{I_{sc}}{\left[\exp\left(\frac{q \cdot Voc}{2 \cdot K \cdot T_c}\right) - 1 \right]} \quad (II.3)$$

Plusieurs travaux de recherche ont montré que les deux modèles possèdent un domaine de validité; le modèle en double exponentielle se prête mieux aux mesures de la caractéristique courant-tension pour des tensions élevées tandis que celui à une exponentielle est plus précis pour de basses et moyennes tensions. Ces deux modèles sont simplifiés et non-linéaires, alors la recherche ou la détermination d'une solution analytique serait une tâche délicate ,[11].

II.6 LE GÉNÉRATEUR PV ET SES PERFORMANCE:

Un générateur photovoltaïque ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que la puissance, le courant de court-circuit ou la tension en circuit ouvert.

II.6.1 Caractéristique courant-tension:

La caractéristique courant-tension d'une photopile se met sous la forme mathématique :

$$I = I_{ph} - I_D - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (II.4)$$

Où le courant de diode (D) est donné par l'équation, [11] :

$$I_D = I_0 \left(\exp\left[\frac{q(V + R_s I)}{akT}\right] - 1 \right) \quad (\text{II.5})$$

Ou a est un facteur de dimension, k constant de Boltzmann ($k = 1.381 \cdot 10^{23} \text{ J / K}$) et q la charge de l'électron ($q = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$).

En substituant l'expression du courant I_D dans l'équation (II.4), I devient donc :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left[\frac{(V + R_s I)}{V_{th}}\right] - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad I = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left[\frac{q(V + R_s I)}{akT}\right] - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.6})$$

Le courant de court circuit est pratiquement égal au photo-courant I_{ph} lui-même, d'après cette dernière équation, on peut déduire l'expression de la tension V :

$$V = -R_s I + \frac{akT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph} - \left(\frac{R_s}{R_{sh}} + 1\right)I - \frac{V}{R_{sh}}}{I_0} + 1 \right) \quad (\text{II.7})$$

Si l'on suppose que R_{sh} est infinie et R_s nulle, l'équation précédente devient :

$$V = \frac{akT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph} - I}{I_0} + 1 \right) \quad (\text{II.8})$$

Si la charge est infinie (circuit ouvert), la cellule présentera à ces bornes une tension V_{oc} , dont son expression est comme suit :

$$V_{oc} = \frac{akT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (\text{II.9})$$

Comme l'ordre de grandeur de (I_{ph}/I_0) est d'environ $10^{10} : 10^{14}$ [11], l'équation précédente devient:

$$V_{oc} = V_{th} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad \text{Avec} \quad V_{th} = \frac{akT}{q} \quad (\text{II.10})$$

Où V_{th} est la tension thermique.

La tension thermique V_{th} et le courant de saturation peuvent être donnés par ,[12]:

$$V_{th} = \frac{V_{op} + R_s I_{op} - V_{oc}}{\ln\left(1 - \frac{I_{op}}{I_{sc}}\right)} \quad (\text{II.11})$$

$$I_0 = (I_{sc} - I_{op}) \exp\left(-\frac{V_{op} + R_s I_{op}}{V_{th}}\right) \quad (\text{II.12})$$

Où

$I_{sc} = N_p \cdot I_{sc} \text{ 'module'}$: Le courant de court-circuit.

$I_{op} = N_p \cdot I_{op} \text{ 'module'}$: Le courant optimal.

$V_{oc} = N_s \cdot V_{oc} \text{ 'module'}$: La tension de circuit ouvert.

$V_{op} = N_s \cdot V_{op} \text{ 'module'}$: La tension optimale.

$R_s = \frac{N_s}{N_p} \cdot R_s \text{ 'module'}$: La résistance série.

N_s et N_p sont respectivement le nombre de modules en séries et en parallèles (dans notre module $N_s=10, N_p=2$).

Pour différents niveaux de l'éclairement et la température solaires peut être manipulée par des équations bien définies.

La figure II.3 représente le courant en fonction de la tension.

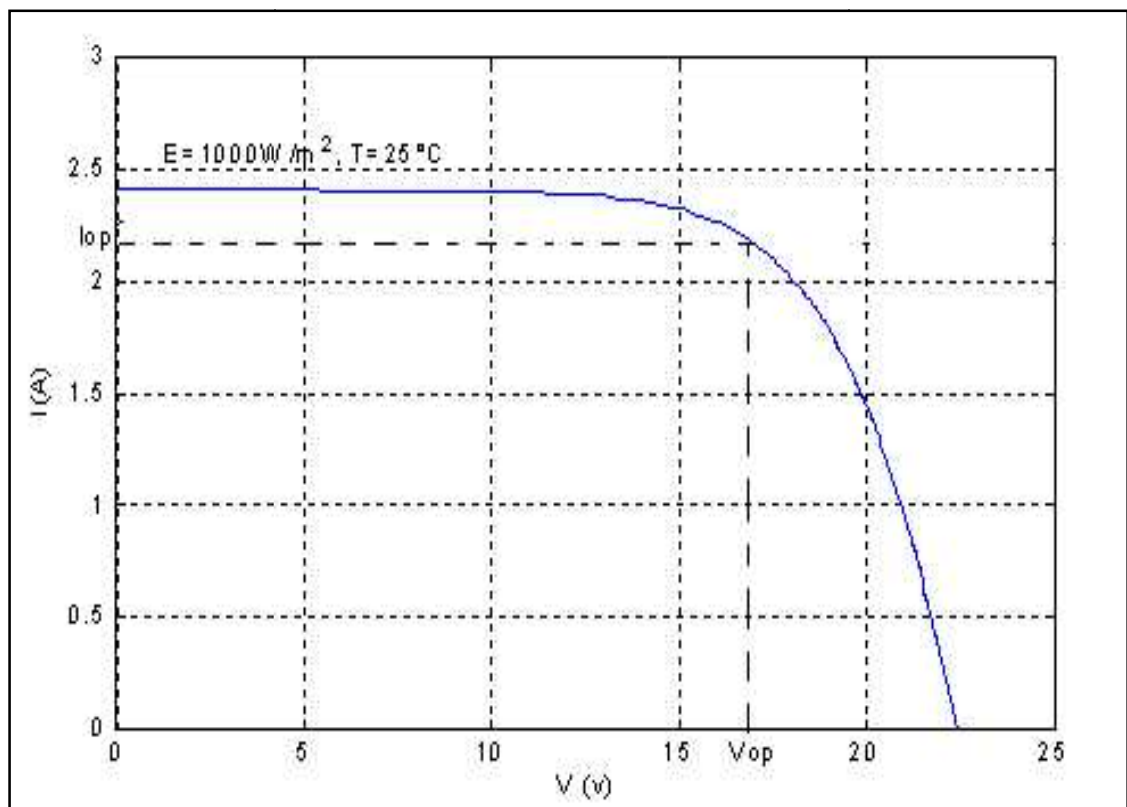


Figure II.3 : Caractéristique courant –tension d’un module solaire

II.6.2 Caractéristique puissance-tension:

La puissance maximale débitée par la cellule donnée par le produit entre la tension V_{op} et le courant I_{op} comme représentée la formule $P_{max}=I_{op} \cdot V_{op}$.

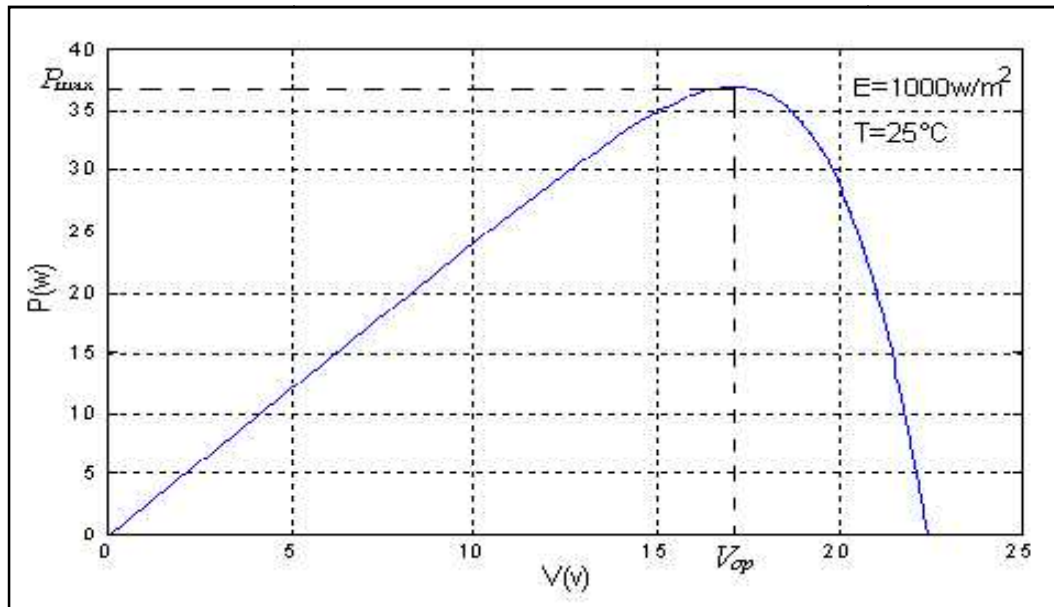


Figure II.4 Caractéristique puissance –tension d'un module solaire

II.6.3 Influence de l'éclairement:

La figure II.5 présente un exemple des courbes pour différents niveaux de rayonnement :

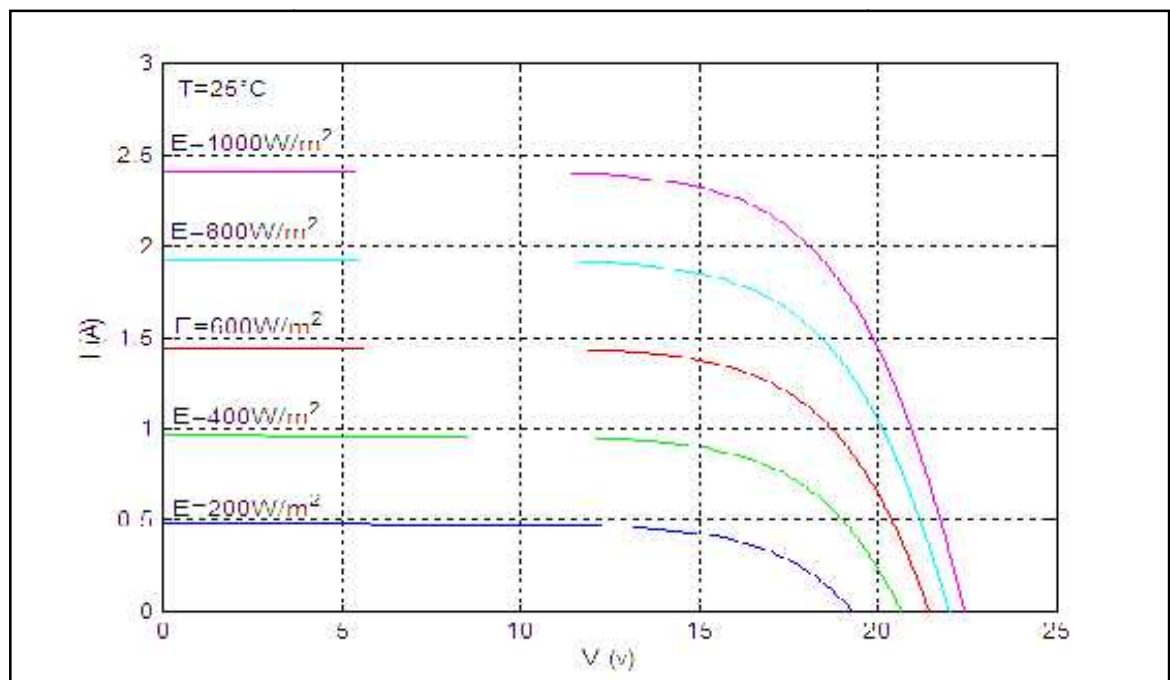


Figure II.5 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique électrique I - V

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement, [13]. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.

L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m^2 et une température de 25°C .

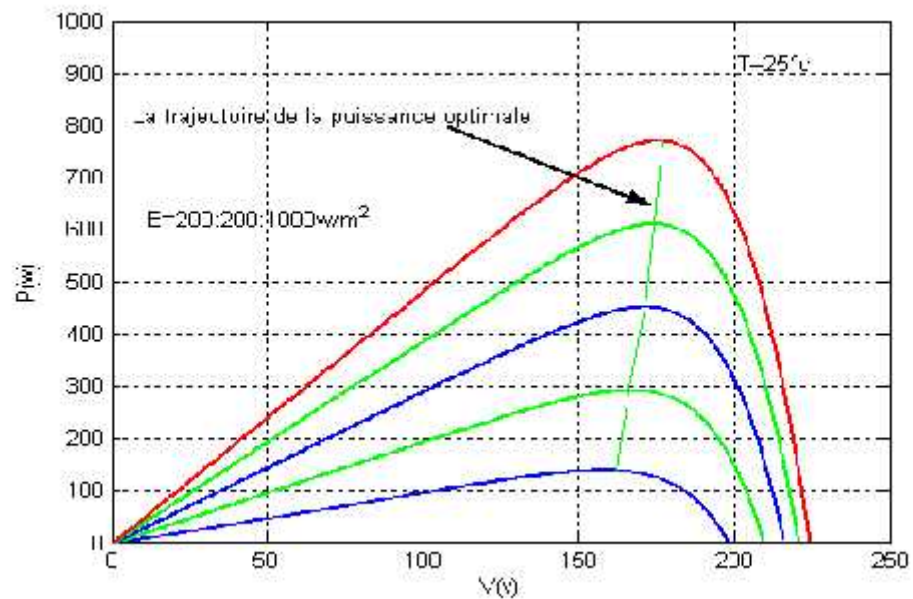


Figure II.6 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique électrique PV

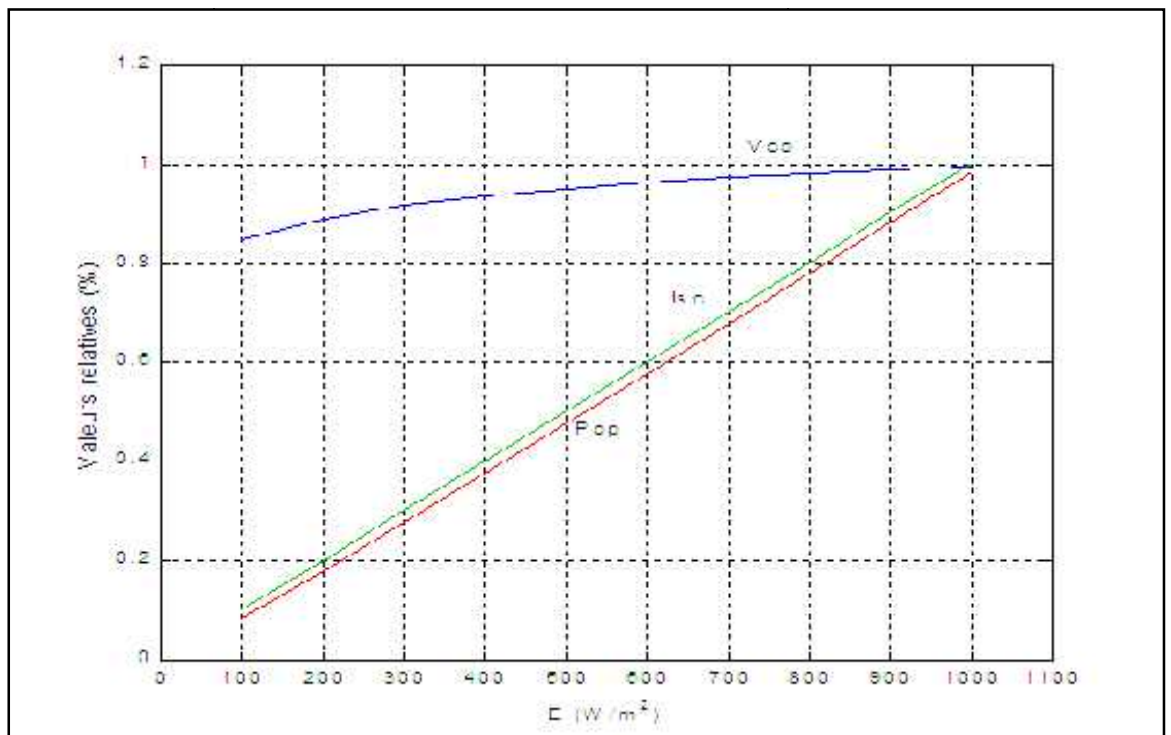


Figure II.7 : Influence de l'éclairement sur V_{co} , I_{sc} et P_{op}

II.6.4 Influence de la température:

La figure II-8 présente des courbes courant-tension pour différentes températures de fonctionnement de la cellule PV:

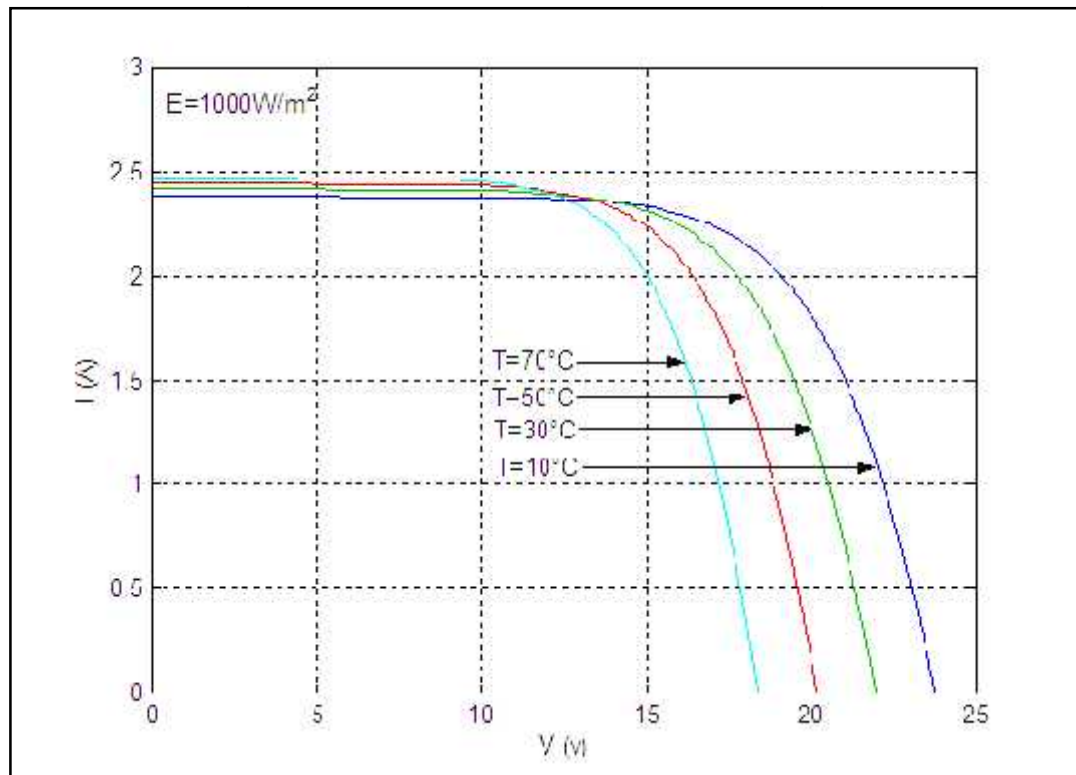


Figure II.8 : Influence de la température sur la caractéristique électrique I-V

On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue, [13]. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement à prendre en compte.

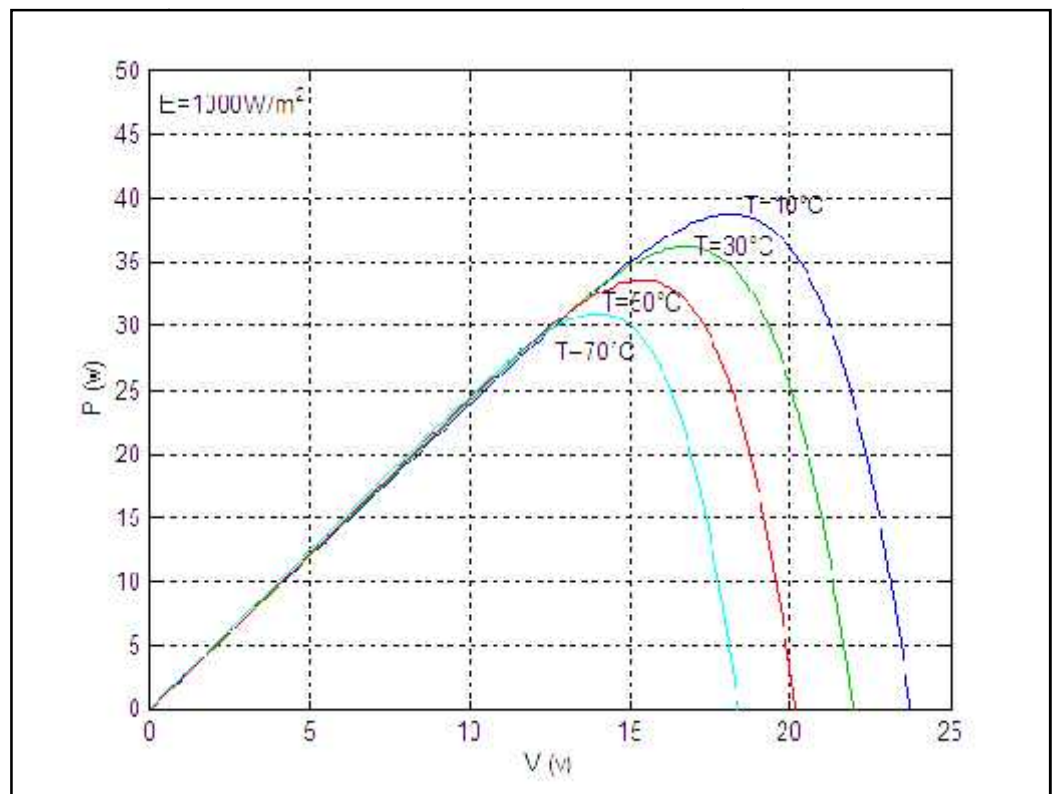


Figure II.9 : Influence de la température sur la caractéristique électrique PV

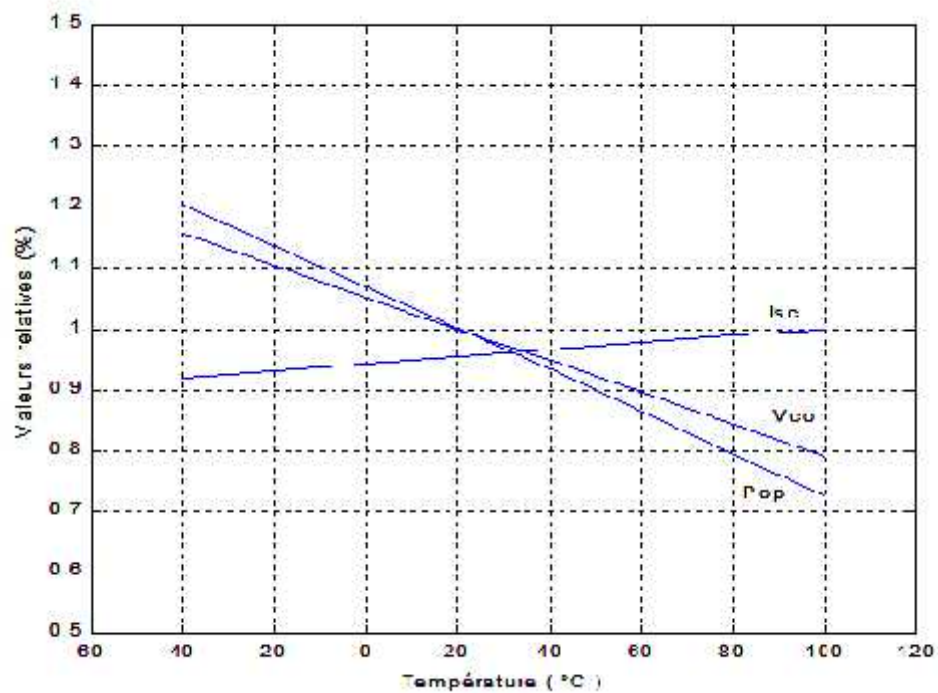


Figure II.10: Influence de la température sur I_{sc} , V_{oc} , P_{mp}

II.7 Les différents branchements des panneaux photovoltaïques:

II.7.1 Le branchement en série:

Ce branchement permet d'additionner les tensions en Volts, l'intensité en Ampères ne bouge pas.

Dans cette configuration la borne + du panneau solaire est branchée sur la borne - du panneau suivant....etc.

Branchement en série

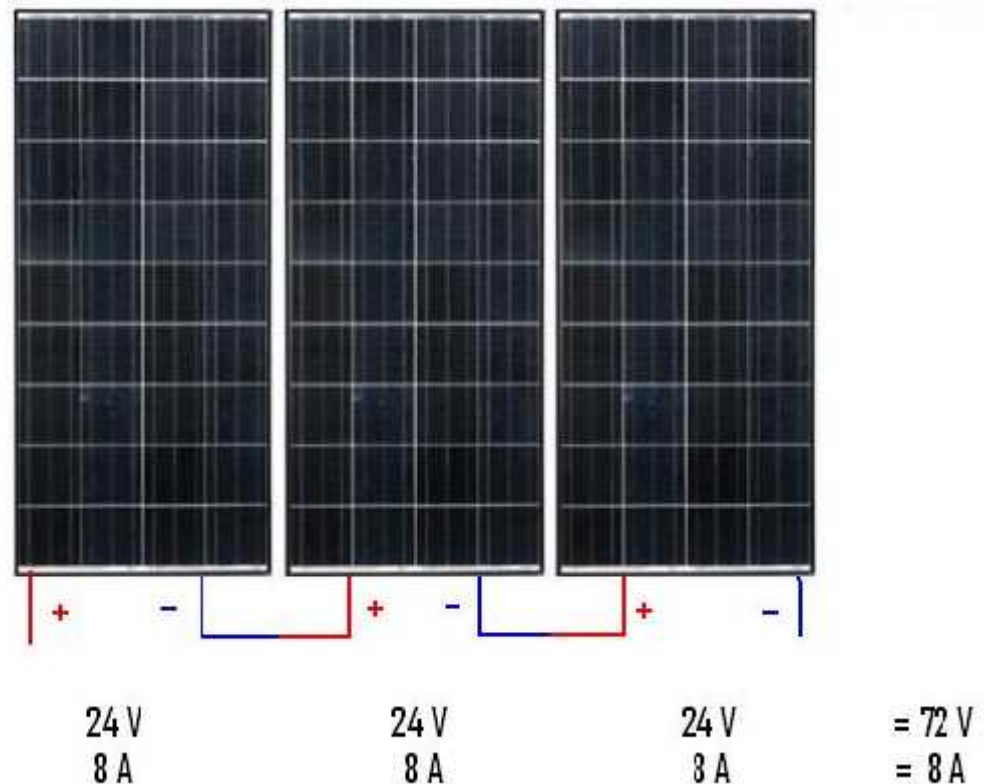


Figure II.11: schéma branchement en série

A noter que si les tensions V s'additionnent systématiquement, c'est l'intensité la plus faible A qui prime dans le cas de panneaux solaire différents.

Imaginons que sur ces 3 panneaux l'un d'eux ait une intensité de 4 Ampères, l'Ampérage total serait de 4 Ampères même si les autres sont à 8 Ampères.

Par contre si nous avons $24\text{ V} + 12\text{ V} + 10\text{ V} = 46\text{ V}$.

L'inconvénient du branchement en série c'est qu'il y a une perte de puissance si un seul des panneaux est ombragé (arbre, bâtiment, cheminée...).

Si un panneau est ombragé il va perdre en intensité et c'est cette intensité qui va déterminer celle des autres panneaux.

Puissance en plein soleil: $72\text{ V} \times 8\text{ A} = 576\text{ W}$

Avec une ombre sur un panneau, supposons qu'il descende à 4 Ampères (tous les panneaux seront à 4 A)

$72\text{ V} \times 4\text{ A} = 288\text{ W}$ perte de moitié.

Conclusion il faut bien étudier l'emplacement de ses panneaux solaire.

II.7.2 Le branchement en parallèle :

Ce branchement permet d'additionner les intensités en Ampères, la tension en Volts ne bouge pas.

Dans cette configuration toutes les bornes + de tous les panneaux solaire sont reliées entre elles, et toutes les bornes - entre elles.

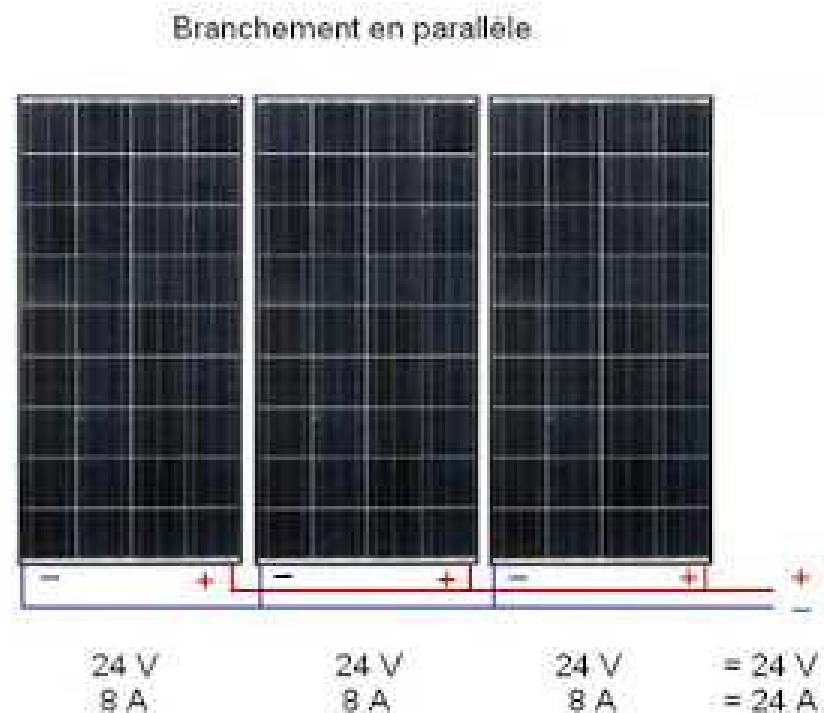


Figure II.12 schéma branchement en parallèle

Ce branchement n'est possible qu'avec des panneaux de mêmes tensions !, contrairement au branchement en série, il n'est pas possible d'avoir des panneaux de 24 V et un autre de 18 V par exemple (*C'est théoriquement possible avec la tension la plus faible qui prime, mais il y a un risque de surtension et court circuit !*), par contre il est possible d'avoir des panneaux d'intensités différentes, deux panneaux de 8 A et un de 5 A = 21 A.

Dans ce branchement c'est donc l'intensité qui s'additionne ! C'est le branchement idéal lorsque l'on a besoin d'une plus grosse intensité.

C'est également le bon montage lorsqu'il peut y avoir un ombrage sur les panneaux photovoltaïque, reprenons le 1er exemple.

Puissance en plein soleil: $24 \text{ V} \times 24 \text{ A} = 576 \text{ W}$ (exactement comme le montage en série)
Avec un ombrage et un panneau qui descend à 4 Ampères d'intensité.

Nous aurons toujours 24 V de tension et $8 \text{ A} + 8 \text{ A} + 4 \text{ A}$ d'intensité puisque dans le montage en parallèle les intensités s'additionnent alors que dans le montage en série c'est la plus petite qui prime.

$24 \text{ V} \times 20 \text{ A} = 480 \text{ W}$ (nous avons 288 W dans le montage en série).

II.7. 3 Le branchement mixte, en série et en parallèle :-

C'est le branchement qui s'impose lorsque l'on a besoin d'une certaine puissance à une tension voulue, les règles du montage en série et celles du montage en parallèle s'appliquent dans le cas du montage mixte.

Il convient d'avoir des panneaux de même tension et de même intensité, c'est plus simple pour faire ses calculs et ça évite des problèmes.

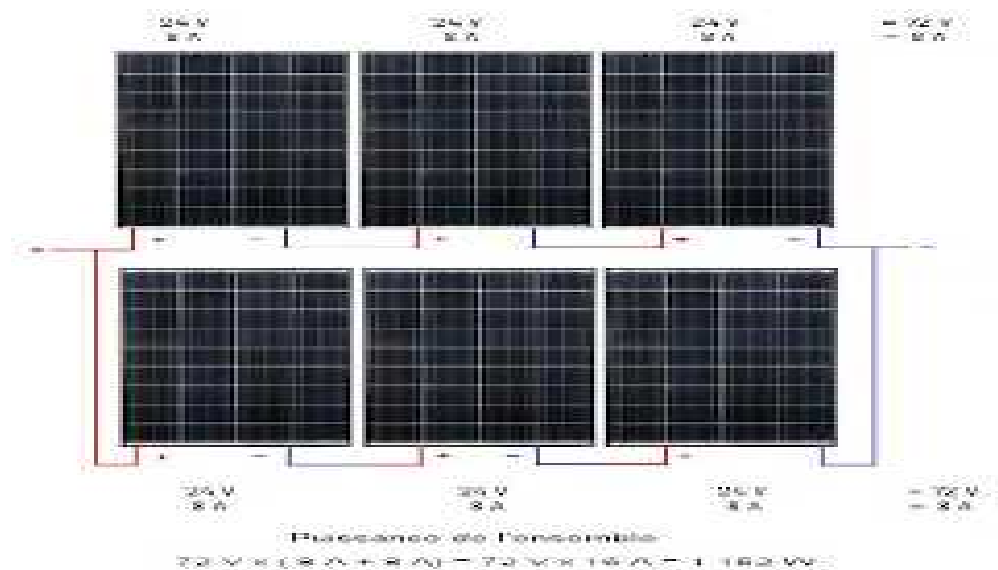


Figure II.13 : schéma branchement mixte, en série et en parallèle

Un ensemble monté en série s'appelle un "string", il est possible d'ajouter des panneaux de mêmes tensions dans les strings pour augmenter la tension Volt, par exemple un panneau de 24 v si vous avez besoin d'une tension de 96 V, ou alors d'ajouter un ou plusieurs string si vous avez besoin de plus d'intensité pour plus de puissance.

Si dans cet exemple on ajoute un string nous allons obtenir:
 $72 \text{ V} \times (8 \text{ A} + 8 \text{ A} + 8 \text{ A}) = 72 \times 24 \text{ A} = 1 728 \text{ W}$

Quelque soit le branchement, il faut systématiquement une mise à la terre,[14].

II.8 STRUCTURES D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE:

II.8.1 Site isolé:

En site isolé le champ photovoltaïque peut fournir l'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner les récepteurs (éclairage et équipement domestique). Un système de régulation et une batterie d'accumulateurs permettent de stocker l'énergie électrique en l'absence de soleil.

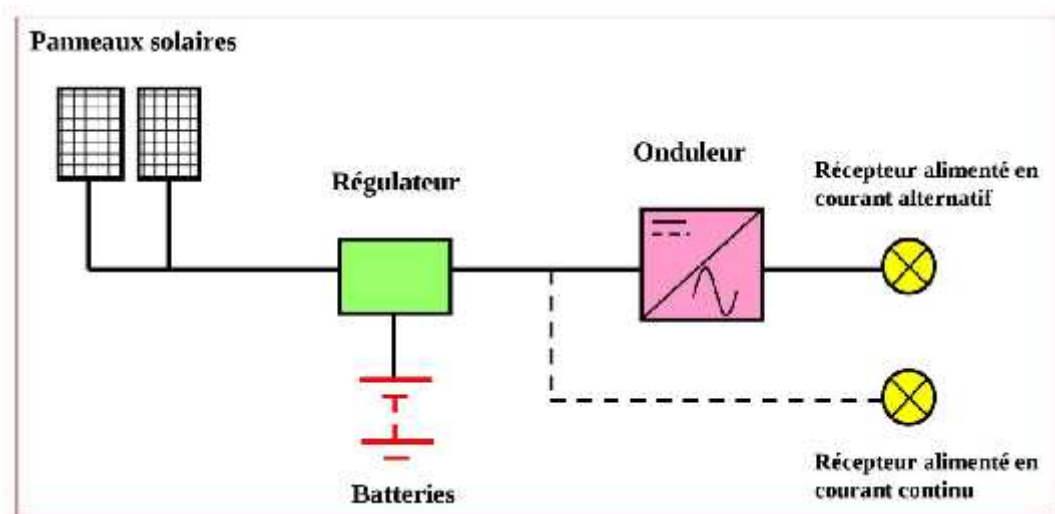


Figure II.14: d'une installation photovoltaïque en site isolé

Les batteries sont utilisées pour stocker l'énergie électrique sous une forme chimique. Elles restituent l'énergie électrique selon les besoins de l'utilisateur.

Le régulateur de charge a pour fonction principale de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes. Il est un élément essentiel pour la durée de vie de la batterie.

L'onduleur permet d'alimenter les récepteurs fonctionnant en alternatif,[10].

II.8.2 Site connecté au réseau:

Pour ce type de site, le champ photovoltaïque est connecté au réseau par l'intermédiaire d'un onduleur.

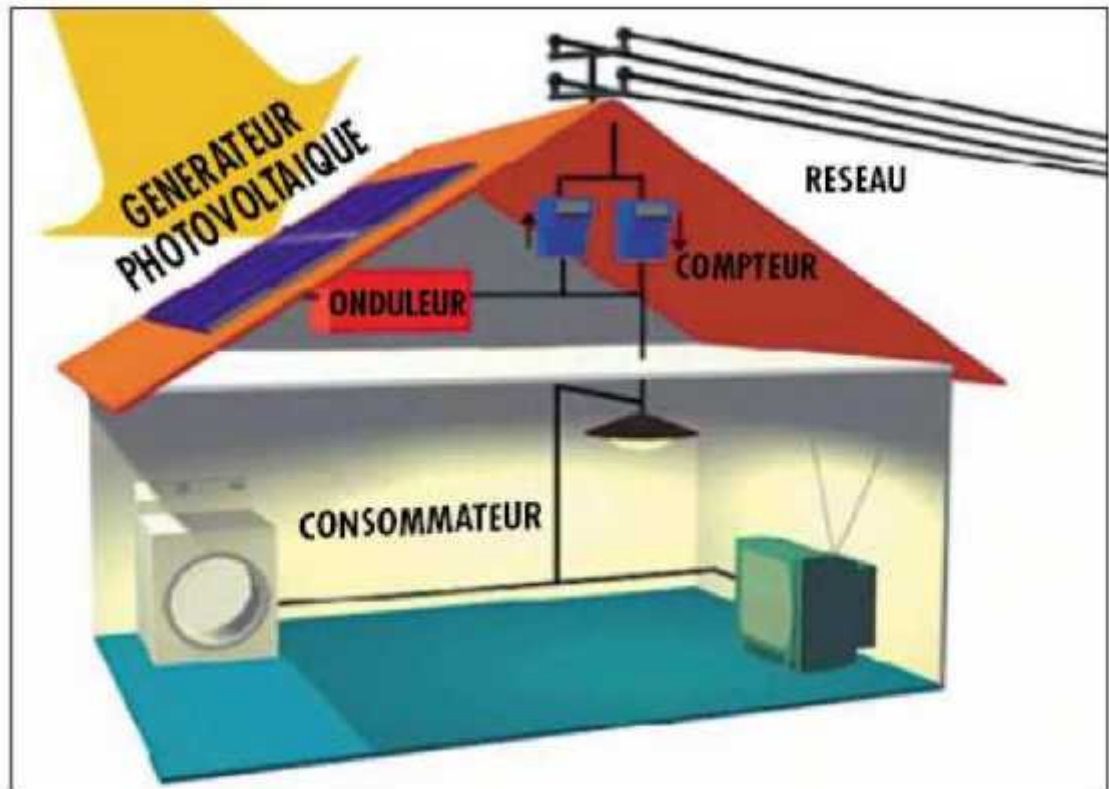


Figure II.15: d'une installation photovoltaïque en site connecté au réseau

Le particulier peut revendre tout ou partie de l'électricité qu'il produit. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire d'installer de batteries de stockage de l'énergie produite,[10].

II.9 LES CONVERTISSEURS :

Suivant l'application, on devra souvent utiliser un convertisseur pour adapter la puissance générée à la charge.

Il existe principalement les convertisseurs DC/DC et les convertisseurs DC/AC :

II.9.1 Les convertisseurs DC/AC:

Ce sont des onduleurs. Ils peuvent être utilisés pour alimenter une charge isolée mais aussi pour raccorder un générateur photovoltaïque au réseau. La déformation de l'onde due aux commutations est susceptible de produire des perturbations plus ou moins gênantes pour les

cellules photovoltaïques. Les onduleurs peuvent être classés en générateurs produisant soit une onde sinusoïdale, soit une onde carrée ou une onde dite pseudo sinusoïdale. Le choix de l'onduleur dépendra des appareils qu'il devra faire fonctionner,[15].

II.9.2 Les convertisseurs DC/DC:

Ces convertisseurs sont utilisés pour transformer la tension des batteries en une tension DC différente pour alimenter une radio ou autres.

Il y a deux types de convertisseurs actifs ayant un bon rendement : le convertisseur vers le haut et le convertisseur vers le bas.

II.9.2.1 Convertisseur vers le haut :

Si l'interrupteur est fermé, l'inductance stocke le courant provenant de la batterie. Si l'interrupteur est ouvert, interruption de courant provoque une surtension dans l'inductance dérivée dans le condensateur et le récepteur. La diode empêche tout retour de courant. Le condensateur sert à lisser la tension de sortie. Le rendement est de 70% et peut atteindre 85 à 90% pour les meilleurs convertisseurs.

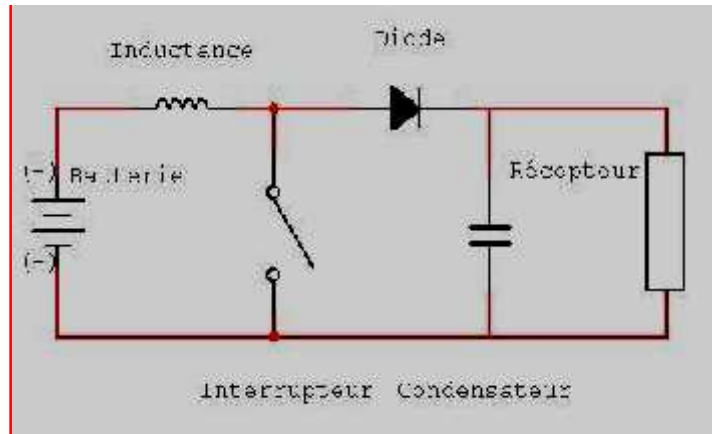


Figure. II.16 : Exemple de convertisseur DC/DC vers le haut

II.9.2.2 Convertisseur vers le bas :

Il sert à produire une tension plus basse que celle des batteries et il s'applique à l'alimentation de radios et autres.

Lorsque l'interrupteur est fermé, le courant circule de la batterie vers le récepteur à travers l'inductance. Si l'interrupteur s'ouvre, la tension aux bornes de l'inductance s'inverse et la diode protège donc l'interrupteur. Le rendement est. De 80 a 90%, [15].

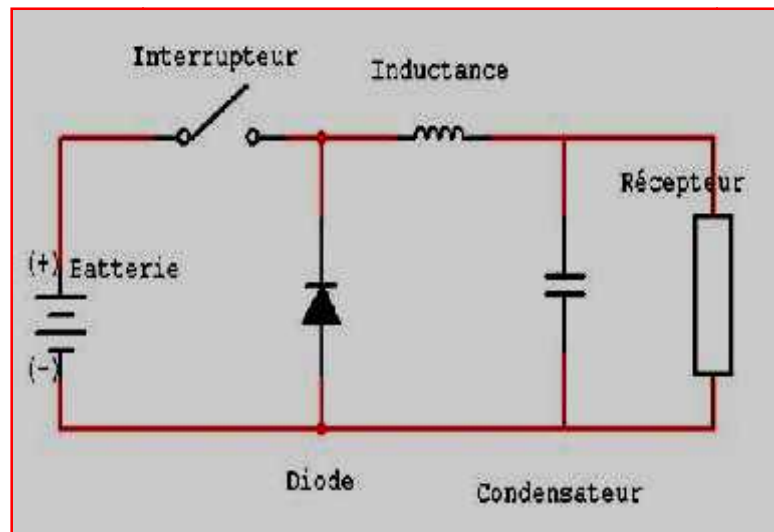


Figure. II.17 : Convertisseur typique DC/DC vers le bas

II.10 LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES:

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

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

II.10.1 Les systèmes photovoltaïques avec stockage électrique :

Batterie d'accumulateurs électrochimiques, ceux-ci alimentent des appareils d'utilisation soit directement en courant continu, soit en courant alternatif par l'intermédiaire d'un convertisseur continu- alternatif (onduleur).

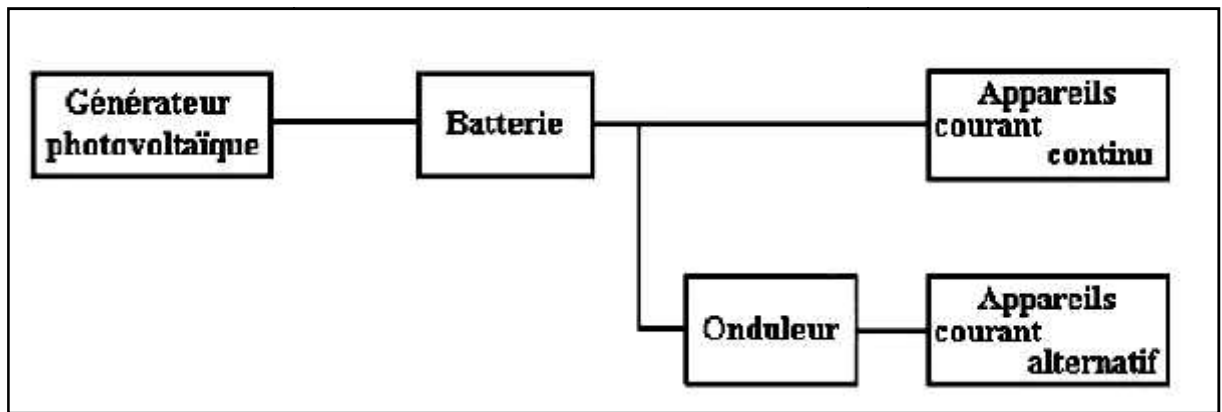


Figure II.18: Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec stockage

II.10.2 Les systèmes à couplage direct sans batterie :

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

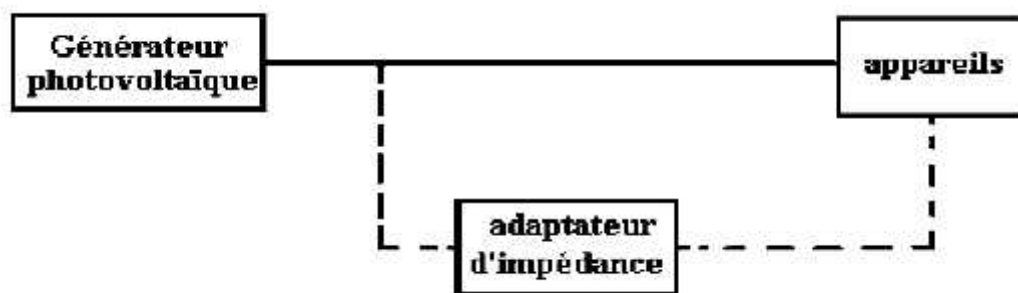


Figure II.19: Schéma synoptique d'un système photovoltaïque à couplage direct

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

Exemple :

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

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

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

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

Un système photovoltaïque est donc constitué du générateur, et des charges à alimenter. Ces charges sont de type courant continu ou courant alternatif. Les diverses composantes d'un système photovoltaïque sont représentées symboliquement sur le schéma généralisé suivant (fig. II.20).

Cette représentation synoptique recouvre à peu près tous les cas, mais il est bien certain qu'un système photovoltaïque ne comporte en général qu'un certain nombre des éléments,[16].

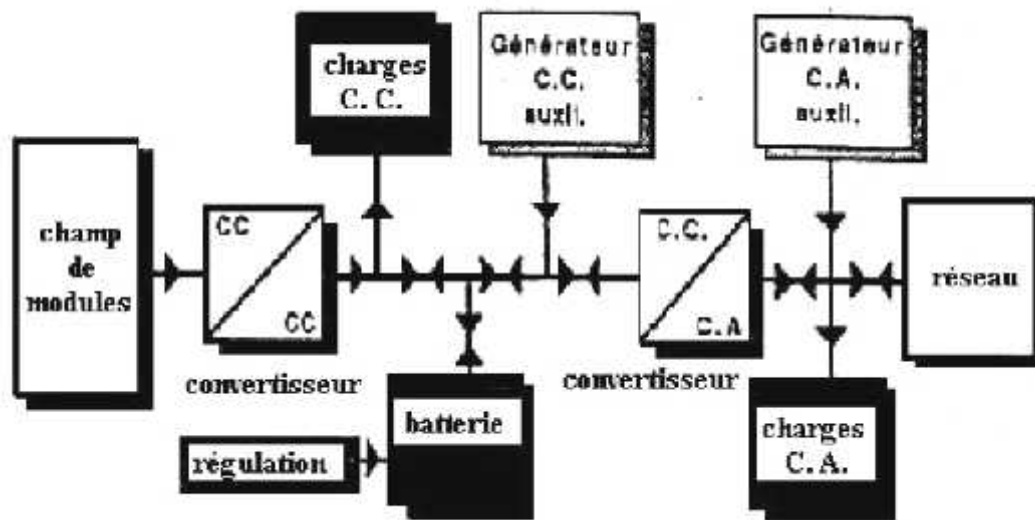


Figure II.20 Schéma synoptique d'un système photovoltaïque

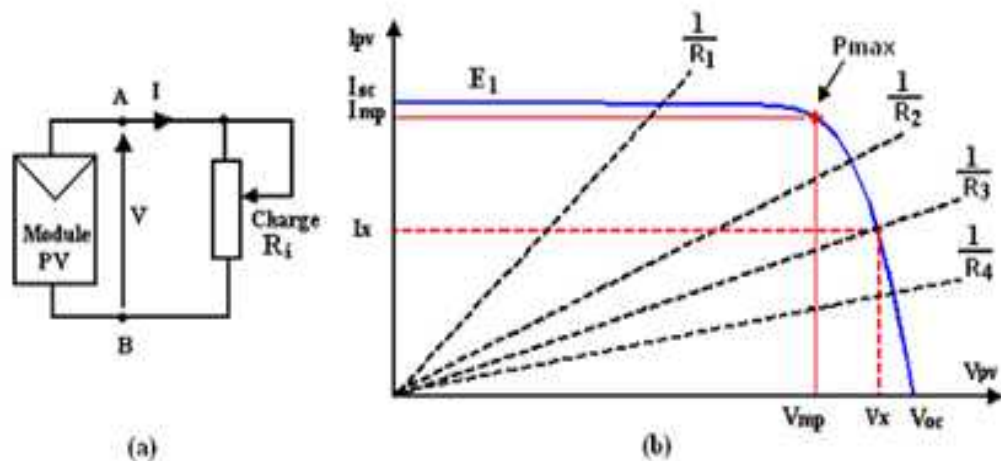
II.11 COUPLAGE LA CHARGE ET SOURCE PV :

La conception globale de systèmes photovoltaïques optimisés est par nature difficile. En effet, côté source, pour un générateur photovoltaïque (PV), la production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température, mais aussi du vieillissement global du système.

Chaque charge, que ce soit en continu (DC) (batteries, certains appareils électroménagers destinés à des réseaux continus isolés) ou bien en alternatif (AC) (réseau électrique Algérien 220 V/50 Hz, certains moteurs), possède un comportement propre.

Ainsi, pour qu'une connexion source-charge soit possible, un point de fonctionnement correspondant à l'intersection des caractéristiques électriques doit exister.

Pour mieux comprendre ceci, prenons par exemple le cas d'une connexion directe entre un générateur PV et une charge purement résistive R_i d'une part et d'autre part entre un générateur PV et une batterie d'une résistance interne R_i . Nous regardons l'énoncé de la nature de la charge, comme illustré dans la (figure II.21. a) et (figure II.21.b).



**Figure II.21 : (a) Connexion électrique directe entre un générateur PV et une charge.
(b) Points de fonctionnement résultant de l'association des
générateurs PV sous un niveau d'éclairement E_1
avec une charge résistive variable (R_1, R_2, R_3, R_4)**

Comme nous pouvons le constater sur la (figure II.22.a) et la (figure II.22.b), le fonctionnement du générateur PV dépend fortement des caractéristiques de la charge à laquelle il est associé.

En effet, pour la charge résistive ou pour l'accumulateur de résistance interne R_i sont données pour différentes valeurs, l'adaptation optimale ne se produit que pour un seul point de fonctionnement particulier, nommé Point de Puissance Maximal (PPM) et noté dans notre cas P_{max} . Ces formes correspondent à la puissance maximale que peut délivrer un générateur PV pour une courbe $I(V)$

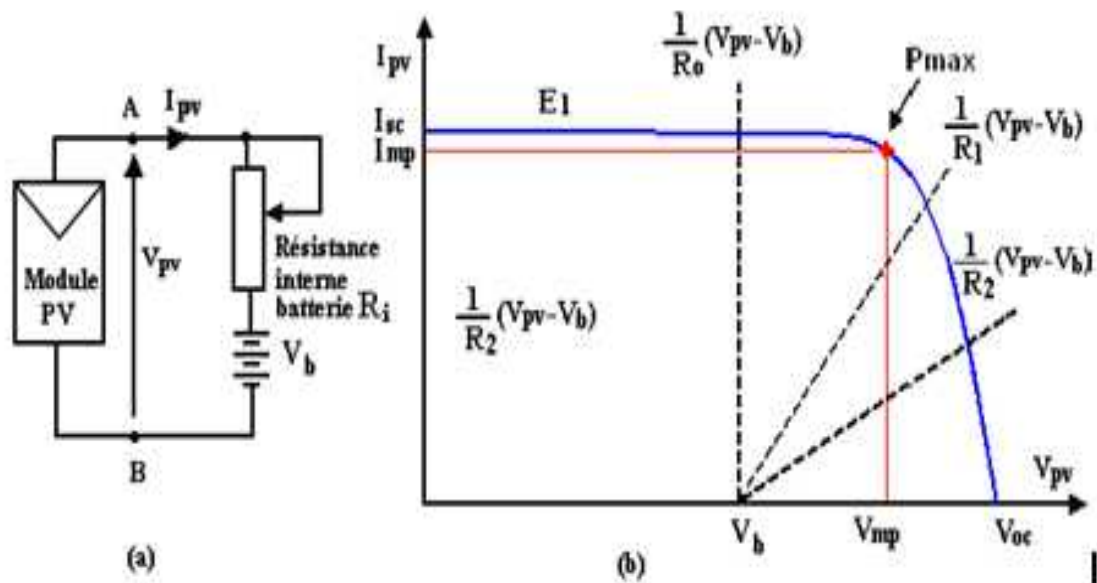


Figure II.22 : (a) Connexion électrique directe entre un générateur PV et une batterie.
(b) Points de fonctionnement résultant de l'association des générateurs PV
sous un niveau d'éclairement E_1 avec une batterie comme charge ayant
ou pas une résistance interne R_i Variable (R_1 , R_2) donnée.

Pour la charge de type batterie, le point de connexion source-charge n'est pas optimal. Ainsi, lorsque l'on réalise une connexion directe source-charge (figure II.22.a), le rendement de l'ensemble est rarement optimal.

Dans le cas d'une connexion directe entre une batterie et un générateur PV, le rendement du système dépend de l'écart entre la tension optimale du générateur PV (V_{op}) et la tension de batterie (V_b) qui varie en fonction de son état de charge,[17].

II.12 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE:

II.12.1 Avantages :

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au MégaWatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

II.12.2 Inconvénients :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

II.13 CONCLUSION:

La technologie photovoltaïque qui se distingue point de vue écologique par sa propreté car c'est un produit non polluant, ne fait pas de bruit et n'entraîne aucune perturbation du milieu, pose encore des problème soit sur le plan financement par le coût de départ très élevé, même si il est rentabilisé par la suite, surtout pour les pays pauvres, soit sur le plan espace car les installations photovoltaïques ont besoin de grands espaces pour capter l'énergie solaire.

Mais aussi, la production de cette énergie est très irrégulière dans les pays situés au nord du globe terrestre où il n y a pas beaucoup du soleil et un système de batterie pour stocker l'énergie est obligatoire ce qui augmente le prix de l'installation.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

La production de courant par des cellules photovoltaïques repose sur le principe de l'effet photoélectrique. Ces cellules produisent du courant continu à partir du rayonnement solaire. Ensuite l'utilisation de ce courant continu diffère d'une installation à l'autre, selon le but de celle-ci. On distingue principalement deux types d'utilisation, celui où l'installation photovoltaïque est connectée à un réseau de distribution d'électricité et celui où elle ne l'est pas.

Les installations non connectées peuvent directement consommer l'électricité produite. À grande échelle, c'est le cas des calculatrices solaires et autres gadgets, conçus pour fonctionner en présence de lumière naturelle ou artificielle (dans un logement ou un bureau). À plus petite échelle, des sites non raccordés au réseau électrique (en montagne, sur des îles ou des voiliers, un satellite...) sont alimentés de la sorte, avec des batteries d'accumulateurs pour disposer d'électricité au cours de périodes sans lumière (la nuit notamment).

L'installation de parcs photovoltaïques au sol entraîne une concurrence d'usage de la terre entre la production d'énergie et la production agricole par exemple. Néanmoins leur installation peut avoir des avantages comme la valorisation des sols artificialisés ou pollués et entraîner des économies d'échelle en comparaison des panneaux solaires posés sur les toits.

Plusieurs associations et organisations intervenant dans les domaines de l'énergie et de la protection de l'environnement proposent cinq recommandations à considérer pour tout projet de création de parc photovoltaïque au sol :

1. Le parc photovoltaïque doit s'inscrire dans une politique de territoire;
2. Tout projet de parc photovoltaïque doit avoir fait l'objet d'études sur l'usage des sols et leur artificialisation;
3. La préservation de la biodiversité doit faire l'objet d'une considération particulière;
4. La multifonctionnalité doit être favorisée;
5. La réversibilité doit être recherchée.

Les références

- [1] : www.ac-nancy-metz.fr/enseign/physique/.../Prod-energie-elec-CH.pdf
- [2] : http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_renouvelable
- [3] : www.eleves.ens.fr/home/gouzien/Publications/.../Elie_Gouzien_TPE.pdf
- [4] : http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaireenvironnement/definition/energie_solaire_photovoltaique.php4#
- [5] : KENDOULI Fairouz, Etat de l'art et modélisation des microcentrales,(mémoire de magister),université Mentouri de Constantine-2007.
- [6] : <http://geothermieael.e-monsite.com/pages/avantages-et-inconvenients.html>
- [7] :<http://energie-hydraulique-tpe.kazeo.com/l-energie-hydroelectrique/avantage-et-inconvenient,a559118.html>
- [8] : PRODUCTION D'ENERGIE ELECTRIQUE - Cours de ALLAL Abderrahim – 1^{er} semestre , Réseaux Electriques –Université d'El – Oued- 2013.
- [9] : www.itismajo.it/fff/.../Energie_solaire_photovoltaique.pdf
- [10] : webgarnier.ac-noumea.nc/phyapp/solaire/doc/cours_photo.pdf
- [11] : Messaoudi Salah,Gouga Adel''Etude comparative de quelques techniques de poursuite du point de puissance maximale d'un générateur photovoltaïque''. Thèse d'ingénieur,université de BISKRA, 2007.
- [12] : A. Betka''Perspectives for the sake of photovoltaic puping development in the south'' Thèse de doctorat, Université de Batna.
- [13] : Alain Bilbao Learreta''Réalisation de Commandes MPPT Numériques'' Thèse d'ingénieur Toulouse (France) 2006.
- [14] : http://www.solaires-photovoltaique.info/2012/07/branchement-des-panneaux-solaire-en_19.html
- [15] : CHABANI Idris, L'intégration du photovoltaïque Au Réseau électrique Problèmes et Perspectives (Mémoire d'ingénieur), Université Mohamed Khider, BISKRA -2006
- [16] : M. SLAMA Fateh, Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique (Mémoire de Magister) UFAS – 2011.
- [17] : bloggerinfo27.files.wordpress.com/2013/01/chapitr1.docx

Annexe .

Fiche technique d'un module MSX-60, sous ($G=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$)

Spécification du module solaire (donnée du fabricant)	
Température des conditions standards ou de références (T_{ref})	25°C
Eclairement des conditions standards ou de références (G_{ref})	1000 W/m^2
Puissance crête maximale (P_m)	60W
Tension de crête maximale (V_m)	17.1V
Courant de crête maximale (I_m)	3.5A
Courant de court-circuit (I_{sc})	3.8A
La tension de circuit ouvert	21.1V
Coefficient de la température de la tension de circuit ouvert α	$-73\text{mA}/^\circ\text{C}$
Coefficient de la température du courant de court-circuit β	$3 \text{ mA}/^\circ\text{C}$
Tolérance sur puissance de crête	$-0.38\text{W}/^\circ\text{C}$
Température nominale de fonctionnement (NOCT)	49°C