

I. Rayonnement Solaire

I.1 Introduction

Le soleil, bien que distant de plus de 150 millions de kilomètres de nous, demeure notre plus grande source d'énergie même si elle est intermittente. La température intérieure du soleil, supérieure à 10 millions de degrés permet aux réactions nucléaires de fusion de transformer à chaque seconde environ 6 millions de tonnes de sa masse en énergie rayonnée dans l'espace. La surface de la terre reçoit 180.10^6 GW de la puissance totale émise par le soleil qui est 390.10^{15} , le reste est renvoyé dans l'Univers par réflexion et rayonnement [1, 4, 5].

Les rayonnements solaires concernés par le photovoltaïque sont des rayonnements électromagnétiques (ultraviolet, rayonnement visible et infrarouge). Ils peuvent être divisés en trois types : rayonnement direct, rayonnement diffus provenant de l'atmosphère et rayonnement réfléchi provenant du sol. L'œil humain nous renseigne de ce fait très mal sur l'énergie apportée par le rayonnement solaire à cause de la partie invisible (les infrarouges), qui représente plus de la moitié de ce rayonnement. Par ailleurs, lorsque le soleil est voilé (nuage, vent de sable) une grande partie de l'énergie solaire n'arrive pas au niveau du sol (de l'ordre de 50 à 70%) [1, 2].

I.2 Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire

Sur la surface terrestre, le rayonnement solaire subit des modifications considérables, dues principalement aux phénomènes d'absorption et/ou de diffusion causés par les aérosols (poussière de diverses origines), ainsi que par les molécules d'eau et les différents gaz (azote, oxygène, gaz carbonique...etc) présents dans la couche atmosphérique enveloppante.

I.3 Rayonnement solaire au niveau du sol

Après avoir traversé l'atmosphère, une partie du rayonnement incident parvient directement au sol, l'autre sera diffusé. Une autre composante du rayonnement est mise en évidence, c'est la partie renvoyée vers l'atmosphère après réflexion diffusée par le sol. Cette partie s'appelle l'ALBEDO, et qui varie en fonction du sol et de son état.

- **Rayonnement global** est défini comme étant la somme du rayonnement direct et diffus qui est le rayonnement émis par le soleil incident sur une surface donnée.
- **Rayonnement direct** est le rayonnement solaire incident sur un plan donné, et provenant d'un petit angle solide centré sur le disque solaire.
- **Rayonnement diffus** est le rayonnement solaire global à l'exception du rayonnement direct. Il comprend la plus grande partie du rayonnement diffusé par l'atmosphère ainsi qu'une partie du rayonnement réfléchi par le sol, suivant l'inclinaison de la surface réceptrice.

I.4 Mesure du rayonnement solaire

On mesure le rayonnement solaire par deux appareils les plus utilisés [2, 4] qui sont :

I.4.a Le pyranomètre

Cet appareil est utilisé pour la mesure du rayonnement global et diffus. Dans le premier cas, on mesure le rayonnement incident sur une surface horizontale, et dont le spectre se situe approximativement entre $0.3\mu\text{m}$ et $3\mu\text{m}$ (lumière visible et proche-infrarouge); par contre dans le deuxième cas, la surface réceptrice se compose de deux anneaux concentriques en argent. L'anneau intérieur est recouvert en noir, celui de l'extérieur est recouvert en blanc. La différence de température entre ces anneaux, mesurée par des thermocouples est proportionnelle au flux lumineux incident. Ce type d'instruments possède une grande sensibilité telle que la tension de sortie pour l'éclairement maximal est de l'ordre du millivolt [4, 2].

I.4.b L'héliographe

Cet instrument mesure la durée d'ensoleillement journalière. L'instrument actuel enregistre l'irradiation au dessus d'un seuil de 210w/m^2 (soit un cinquième du maximum possible), et dont le plus répandue est celui de Campbell-stockes. Il se compose d'une sphère en verre d'environ 10cm de diamètre permettant de concentrer les rayons solaires sur une bande de carton bleu foncé, où le rayonnement laisse une trace de brûlure [2, 4, 17].

I.5 Modèle simplifié de l'éclairement

Ce modèle quantifie le flux lumineux pour une journée claire, et qui fait simuler la forme en cloche de l'éclairement à une fonction « sinus » du temps solaire vrai [2].

L'expression mathématique du modèle est :

$$E = E_M \cdot \sin h \quad (I.1)$$

Avec:

$$t = t_{sr} + \frac{h}{15} \quad (I.2)$$

où

E_M : est la valeur maximale de l'éclairement sur site (obtenue à midi).

t_{sr} : est le temps solaire correspondant au levé du soleil (en heures).

t et h : désignent respectivement le temps solaire vrai et l'angle (en degrés), sont définis par :

a. Temps solaire vrai (TSV)

Le temps solaire vrai à un lieu et à un instant donné est l'angle horaire du soleil en ce lieu et à cet instant. C'est une notion qui traduit à la fois le mouvement de rotation de la terre et de son mouvement de translation. Par définition, le temps solaire vrai (TSV) est évalué par :

$$TSV = 12 + \frac{h}{15} \quad (I.3)$$

b. Angle horaire

C'est l'angle que font sur le plan équatorial les projections de la direction du soleil et de la direction du sud pour un lieu donné. Il est lié directement au temps solaire vrai par la relation :

$$h = \frac{360^\circ}{24} (TSV - 12) \quad (I.4)$$

Où une heure de temps correspond à 15° d'angle horaire.

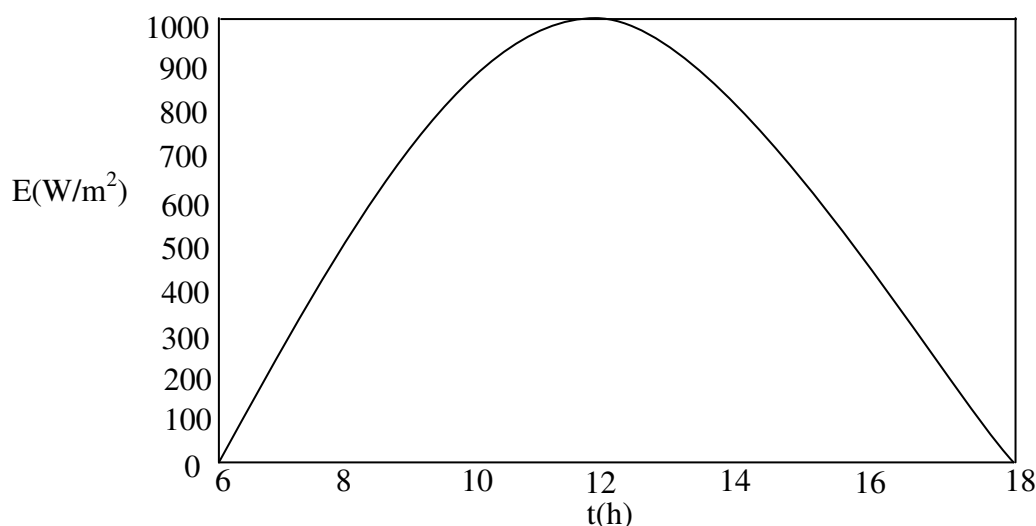


Figure I.1 : Modèle de l'éclairage

II. Energie Photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque », a été formé à partir des mots « photo », un mot grec signifiant lumière, et « Volta », le nom du physicien italien Alessandro Volta, qui a inventé la pile électrochimique en 1800 [11, 12, 24].

Les systèmes photovoltaïques ne contiennent aucune pièce mobile. Ils sont fiables, requièrent peu d'entretien, silencieux et ne produisent aucune émission de polluants. Ce sont des systèmes modulaires : les éléments de base (modules de cellules solaires) sont vendus dans un vaste éventail de capacités d'alimentation électrique qui vont d'une fraction de watt (par exemple les montres et les calculettes à pile solaire) à plus de 300 watts. L'interconnexion des modules permet d'obtenir la puissance qu'exige notre application. Certaines centrales photovoltaïques de démonstration produisent une puissance allant jusqu'à plusieurs mégawatts, bien que la plupart des systèmes installés soient de dimension beaucoup plus modeste. Le développement de la production d'électricité photovoltaïque est beaucoup au niveau domestique en particulier dans les pays où les problèmes environnementaux sont pris au sérieux (Japon, Allemagne, Suisse...) et dans les pays en voie de développement [7, 25, 27].

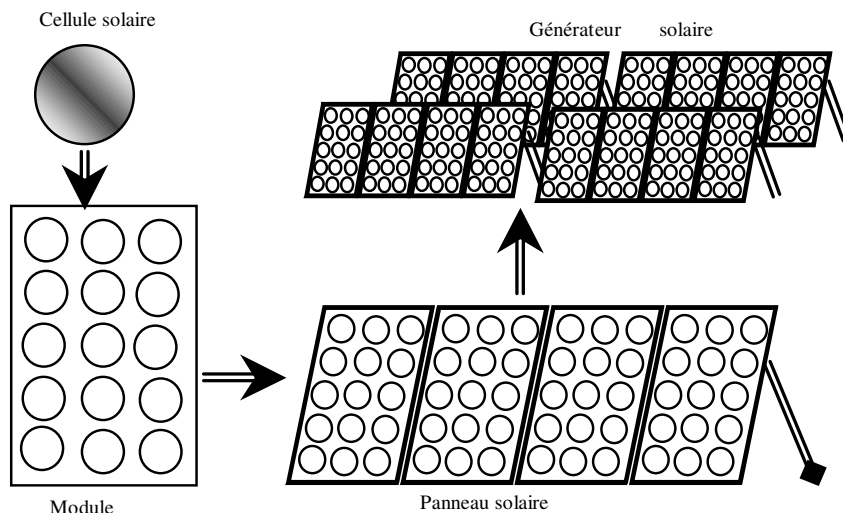


Figure I.2 : Structure d’un générateur photovoltaïque

II.1 Fonctionnement

En général, les cellules photovoltaïques sont constituées de matériaux semi-conducteurs spéciaux qui permettent aux électrons, qui sont excités lorsque le matériel est exposé à la lumière du soleil, d’être libérés de leurs atomes c’est une jonction semi-conductrice P-N. Une fois libérés, ils se déplacent dans le matériau et forment un courant électrique. Le courant circule dans une seule direction (comme aux bornes d’une pile) et c’est pourquoi on dit que cette électricité est à courant continu (c.c). Cette conversion directe de l’énergie lumineuse (flux de photons) en énergie électrique s’appelle l’effet photovoltaïque [17, 20].

II.1.1 Schéma équivalent d’une cellule solaire

Le schéma d’une cellule solaire est représenté sur la (Fig. I.3). Sous un éclairement, la caractéristique d’une cellule peut être représentée par les relations suivantes [16, 17, 20].

$$I(V) = I_p - I_d - \frac{V_j}{R_{sh}} \tag{I.5}$$

$$I_d = I_o \cdot [\exp [\frac{q \cdot V_j}{(a \cdot K \cdot T)}] - 1] \tag{I.6}$$

$$V_j = V + R_s I \tag{I.7}$$

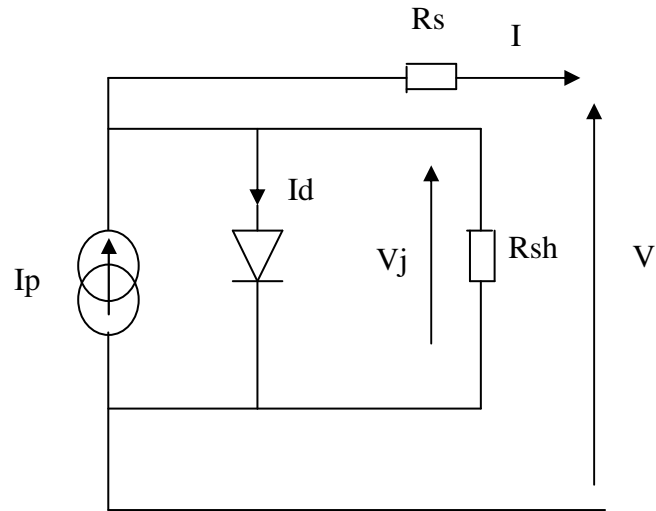


Figure I.3 : Circuit équivalent d'une cellule solaire

Dans notre étude nous allons supposé que R_{sh} est assez grande pour qu'on puisse négligé son courant de fuite [16, 17, 20]. Dans ce cas nous allons réécrire les équations précédentes comme suit :

$$I(V) = I_p - I_d(V_j) \quad (I.8)$$

$$I_d = I_o \cdot [\exp[\frac{q \cdot V_j}{(a \cdot K \cdot T)}] - 1] \quad (I.9)$$

$$V_j = V + R_s I \quad (I.10)$$

L'expression donnant la relation tension-courant est donnée par :

$$V = -R_s I + (\frac{a \cdot K \cdot T}{q}) \ln(1 + \frac{I_p - I}{I_o}) \quad (I.11)$$

Et le circuit équivalent de la cellule sera réduit à celui de la (Fig. I.4)

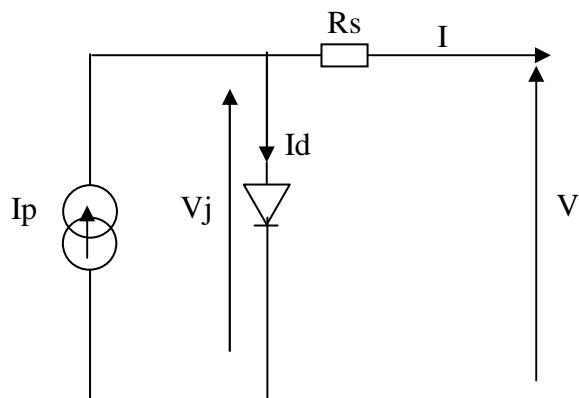


Figure I.4 : Circuit simplifié de la cellule

Si la charge est infinie (circuit ouvert), la cellule présentera à ses bornes la tension à vide V_o dont la valeur est donnée comme suit :

$$V_o = (a.K.T/q) \cdot \ln(1 + \frac{I_p}{I_o}) \tag{I.12}$$

Comme l'ordre de grandeur de (I_p/I_o) est environ $10^{10} : 10^{14}$, l'équation précédente devient :

$$V_o = (\frac{1}{A}) \cdot \ln(\frac{I_p}{I_o}) \tag{I.13}$$

avec :

$$A = \frac{q}{(a.K.T)} \tag{I.14}$$

II.2 Module photovoltaïque

A la base, une cellule photovoltaïque fournit un courant sous une faible tension (de l'ordre de 0.6V en circuit ouvert). Pour obtenir une tension plus importante il est nécessaire de raccorder plusieurs cellules en série. Cet ensemble de cellules est encapsulé de façon étanche afin de les protéger de l'humidité et des chocs [16, 19, 24], l'assemblage constitue un module Photovoltaïque.

a- Association des cellules photovoltaïques en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. la caractéristique résultante (I_{scc}, V_{sco}) obtenue en associant en série n_s cellules identiques (I_{cc}, V_{co}) :

$$I_{sc} = I_{cc} \quad \text{et} \quad V_{sco} = n_s V_{co} \quad (\text{I.15})$$

b- Association de cellules photovoltaïques en parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée. La caractéristique résultante (I_{pcc} , V_{pco}) obtenue en associant en parallèle n_p cellules identiques (I_{cc} , V_{co}) :

$$I_{pcc} = n_p I_{cc} \quad \text{et} \quad V_{pco} = V_{co} \quad (\text{I.16})$$

Pour obtenir une énergie électrique exploitable, plusieurs modules peuvent être raccordés ensemble pour former un panneau Photovoltaïque. Ces modules sont généralement composés de 33 à 72 cellules connectées en série et/ou en parallèle assurant une tension adaptée en général à la charge des batteries (12 ou 24V).

c. Caractéristiques d'un module solaire

c.1 Caractéristique courant -tension (I-V)

C'est une caractéristique fondamentale du module solaire définissant cet élément comme générateur. Elle est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalé le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement [16, 17, 20]. Elle se trace sous un éclairement fixe et une température constante (Fig. I.5).

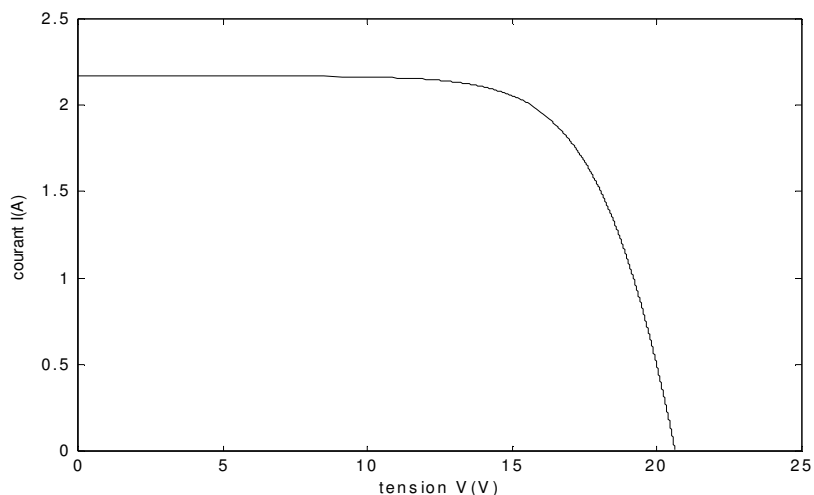


Figure I.5 : Caractéristique courant-tension

c.2 Caractéristique puissance-tension (P-V)

La puissance débitée par le module dépend de son point de fonctionnement. Le point M représente la puissance maximale débitée par le module qui est donnée par :

$$P_{\max} = I_{op} \cdot V_{op} \tag{I.17}$$

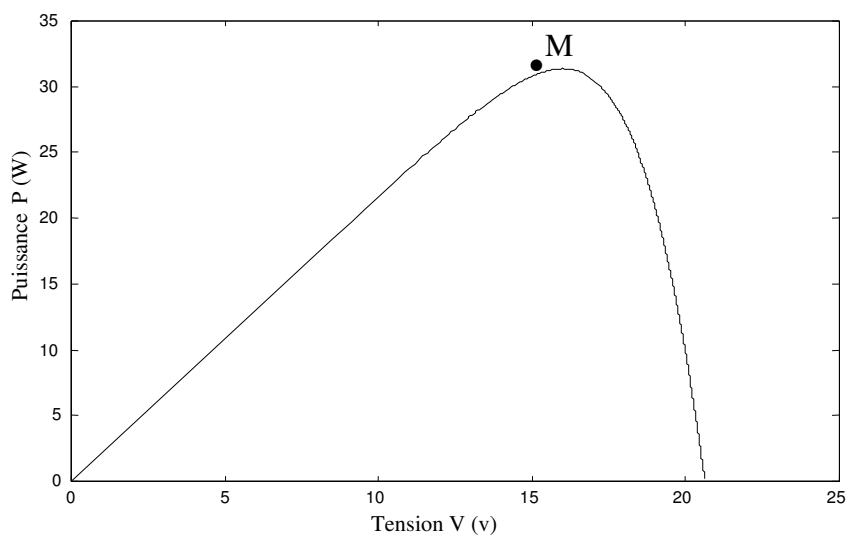


Figure I.6 : Caractéristique puissance-tension

c.3 Le rendement

Ce facteur définit le taux de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique, il représente le rapport de la puissance fournie rapportée à celle du rayonnement incident [14, 16, 17, 20].

$$\eta = \frac{I.V}{E.A_1} \quad (\text{I.18})$$

A_1 : surface effective du module.

E : l'éclairement.

c.4 Facteur de forme

C'est un facteur de performances des cellules solaires, plus il s'approche de l'unité, plus les cellules sont meilleurs.

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{sc}.V_{oc}} \quad (\text{I.19})$$

c.5 Zones de fonctionnement du module solaire

Ce fonctionnement est caractérisé essentiellement par trois zones comme il est montré sur la (Fig. I.7).

- fonctionnement comme générateur de courant : Dans ce cas le point de fonctionnement appartient à la zone AB.
- fonctionnement comme générateur de tension : le point de fonctionnement appartient à la zone CD. La tension est proche de la tension à vide V_{oc} et le courant est faible.
- fonctionnement optimal : quand le point de fonctionnement appartient à la zone BC, l'exploitation d'énergie est maximale et la puissance délivrée est maximisée par rapport aux deux autres zones(AB,CD).

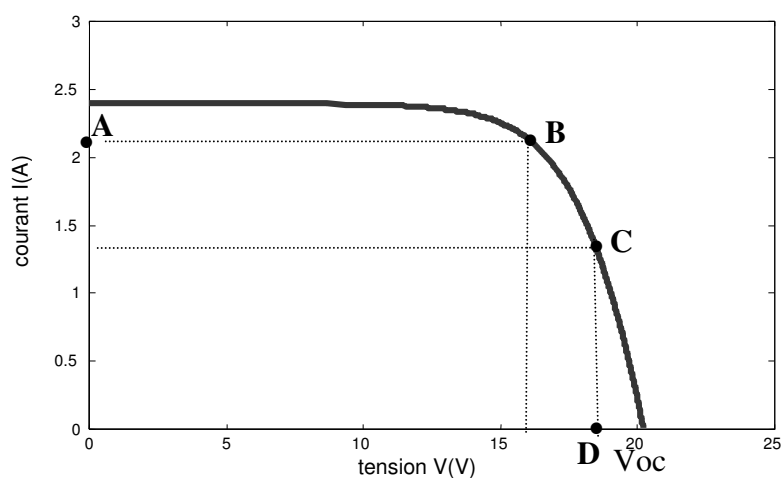


Figure I.7 : Zones de fonctionnement d'un module

d. Effet de l'éclairement

L'augmentation du flux lumineux se traduit en somme par le déplacement de la caractéristique (I-V) suivant l'axe des courants. L'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que celui de la tension à circuit ouvert étant donné que le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement, alors que celle de la tension à circuit ouvert est logarithmique [16, 17, 20].

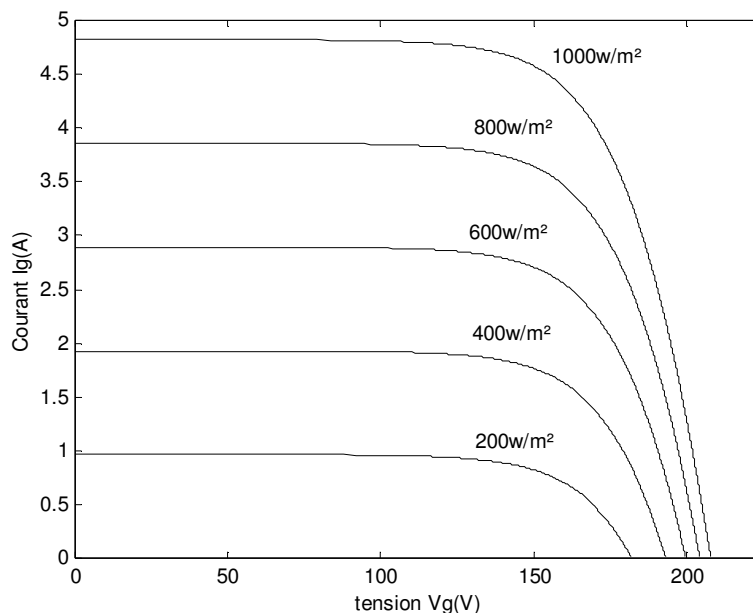
Ce faisceau de courbes se trace à température constante, et est illustré un tracé correspondant à une température $T_c = 25^\circ\text{C}$ sur la (Fig. I.8).

e. Effet de la température

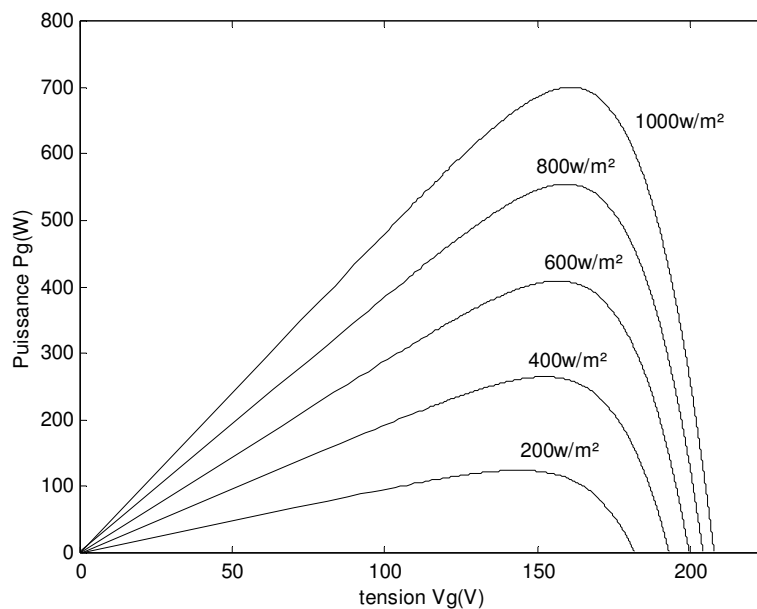
Si la température de la cellule augmente, le courant photovoltaïque généré I_{ph} augmente par suite de la diminution de la largeur de la bande interdite du matériau. Cette augmentation est de l'ordre de $0.1\%/^\circ\text{C}$. Le courant direct de la jonction augmente aussi, mais beaucoup plus vite entraînant une diminution de la tension de circuit ouvert de l'ordre de 2mV par cellule. La puissance maximale disponible se trouve ainsi diminuée de $0.35\% / ^\circ\text{C}$. Ce faisceau de courbes se trace à un éclairement constant, et est illustré pour à un éclairement $E = 1000\text{W/m}^2$ sur la (Fig. I.9), [16, 17, 20].

f. Effet simultané de l'éclairement et de la température

En pratique, une variation importante de l'éclairement entraînant forcément une variation de température, les faisceaux de courbes aléatoirement choisis sont illustrés sur la (Fig. I.10), [16, 17, 20].



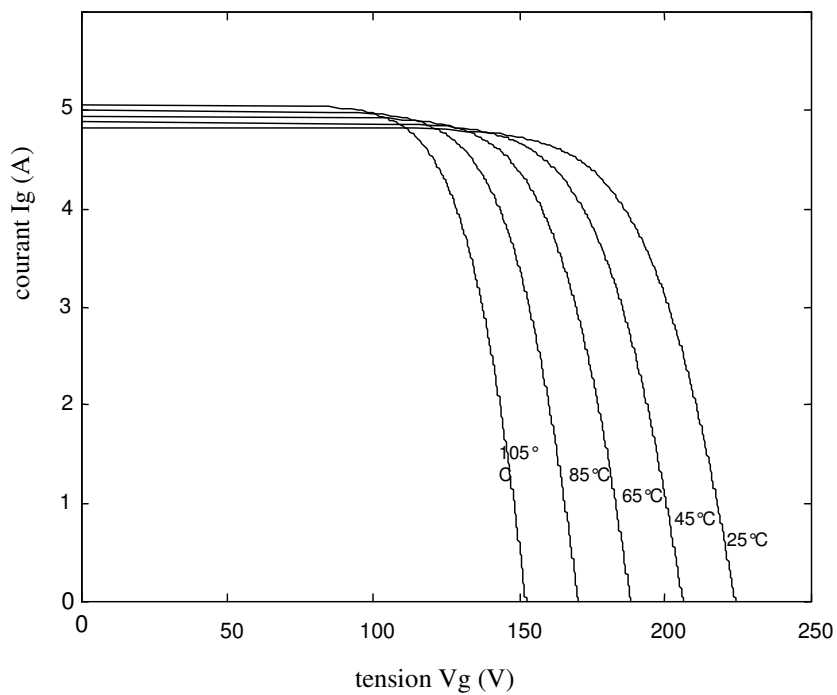
a)



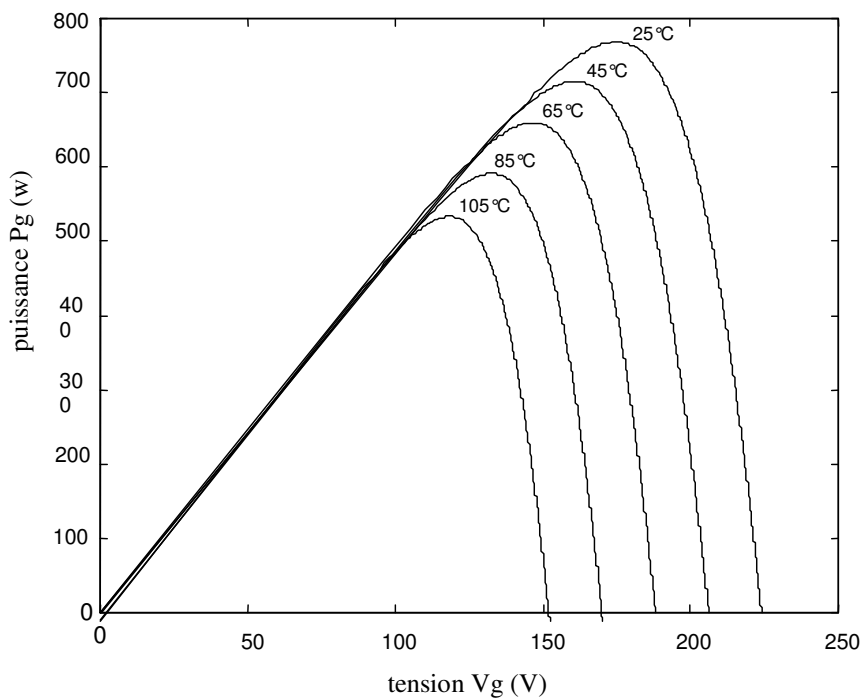
b)

Figure I.8 : Effet de l'éclairement sur les caractéristiques à $T_c=25c^\circ$

a) courant-tension b) puissance-tension



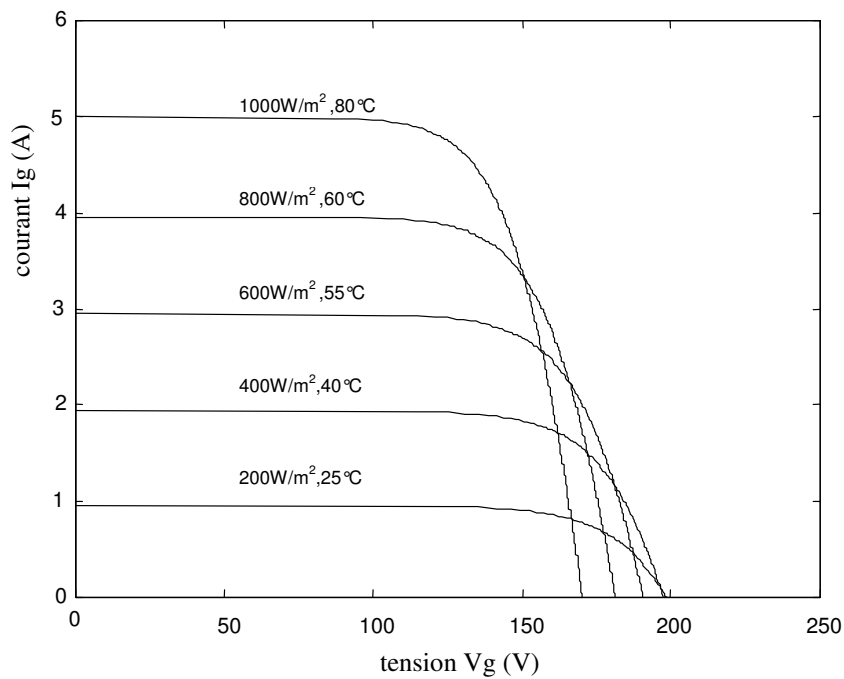
a)



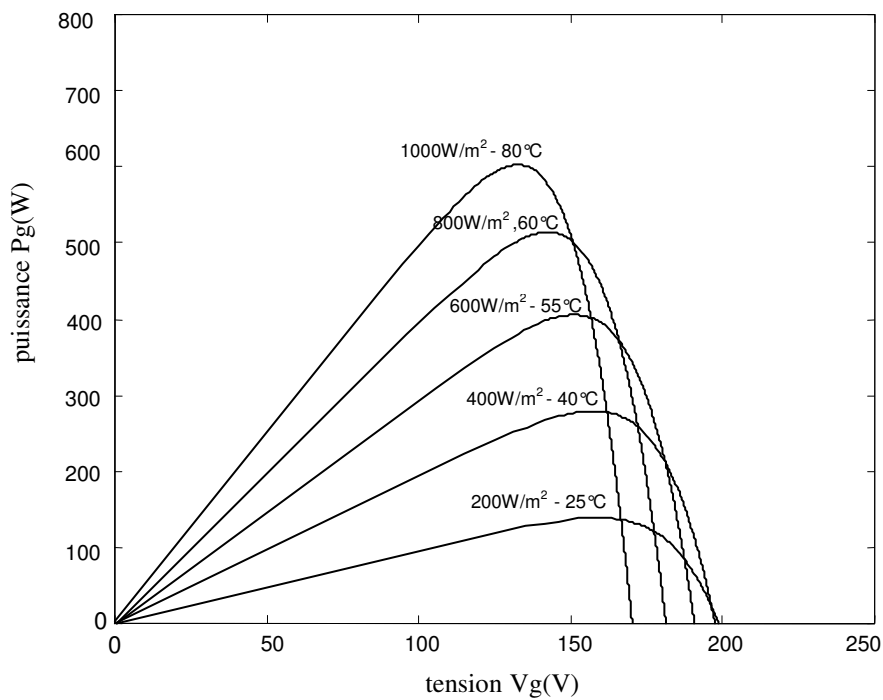
b)

Figure I.9 : Effet de la température sur les caractéristiques à $E=1000W/m^2$

a) courant-tension b) puissance-tension



a)



b)

Figure I.10 : Effet simultané de l'éclairement et la température

a) courant-tension b) puissance-tension

II.3 Générateur photovoltaïque

Le générateur Photovoltaïque est une matrice formée de N_s modules en série et de N_p rangés en parallèles sa caractéristique courant-tension est données par [14, 16, 17, 20] :

$$I_g = I_{scg} - I_{og} \left[\exp\left(\frac{V + R_{sg} \cdot I}{V_{thg}}\right) - 1 \right] \quad (I.20)$$

Avec:

$$I_{scg} = N_p \cdot I_{sc} \quad (I.21)$$

$$I_{og} = N_p \cdot I_0 \quad (I.22)$$

$$V_{thg} = N_s \cdot V_{th} \quad (I.23)$$

$$R_{sg} = \frac{N_s}{N_p} \cdot R_s \quad (I.24)$$

La tension thermique V_{th} et le courant I_0 sont respectivement identifiés par [16, 17, 20] :

$$V_{th} = \frac{V_{op} + R_s \cdot I_{op} - V_{oc}}{\log\left(1 - \frac{I_{op}}{I_{sc}}\right)} \quad (I.25)$$

$$I_0 = (I_{sc} - I_{op}) \exp\left(-\frac{V_{op} + R_s \cdot I_{op}}{V_{th}}\right) \quad (I.26)$$

a- Coût d'un générateur photovoltaïque

Les consommateurs qui songent à acheter un générateur photovoltaïque doivent tenir compte des faits suivants :

-L'énergie photovoltaïque a fait ses preuves. Les générateurs sont fiables et ont une durée de vie utile de 30 ans.

-Ils sont évolutifs : on peut ajouter des panneaux pour accroître la puissance électrique et répondre à des besoins nouveaux. Leur attrait est indiscutable dans les localités isolées qui ne sont pas rattachées à des services publics, où le coût d'installation d'une ligne de transport

d'électricité peut atteindre entre 18 000 \$ et 60 000 \$ le kilomètre, selon le terrain. Un générateur de base portable, doté d'un panneau de 50 watts, d'un onduleur de faible puissance et d'une batterie, coûte environ 700 \$ et peut alimenter trois lampes à haut rendement énergétique, un petit téléviseur et une pompe à eau. Les générateurs plus puissants, coûtant environ 8 000 \$, peuvent alimenter plusieurs lampes, un téléviseur, une chaîne stéréo, un four à micro-ondes et une pompe à eau, mais pas tous en même temps [11, 12, 13].

Grâce à de nouvelles techniques de production, les générateurs photovoltaïques coûtent de moins en moins cher et se prêtent à un nombre accru d'applications - deux facteurs qui devraient propager l'emploi de cette source d'énergie écologique.

b- Fonctionnement optimal du generateur

Dans les conditions données, c'est au point de puissance maximale que l'on exploite au mieux la puissance crête installée. C'est pourquoi ce point est souvent qualifié de point de puissance optimale, terme traduisant mieux le caractère relatif aux conditions d'éclairement et de température de la puissance fournie, l'utilisation du générateur étant le plus souvent considérée comme optimale en ce point. Ce point est alors noté (V_{opt}, I_{opt}) .

Le point de fonctionnement (V_p, I_p) du générateur est défini par l'intersection de sa caractéristique électrique avec celle de la charge. Seule une charge dont la caractéristique passe par le point (V_{opt}, I_{opt}) permet d'en extraire la puissance optimale disponible dans les conditions considérées et l'impédance statique optimale de charge vaut alors [28] :

$$R_{opt} = \frac{V_m - V_{opt}}{I_m - I_{opt}} \quad (I.27)$$

Etant donné que ce point dépend totalement des conditions considérées telles que l'éclairement E et la température T , il en est de même de l'impédance de charge optimale.

L'utilisation optimale du générateur consiste alors à ce que sa charge conserve à chaque instant les valeurs optimales R_{opt} lorsque les conditions varient : il y a donc lieu d'effectuer en permanence l'adaptation d'impédance nécessaire.

II.4 Adaptation d'impédance entre générateur et charge. Poursuite du point optimal

Le point de fonctionnement optimal varie en temps réel, à cause de ça une adaptation d'impédance doit être réalisée en insérant entre le générateur et la charge électrique un dispositif adaptateur d'impédance (Fig. I.11). La commande de cet adaptateur doit alors agir en temps réel de manière que le générateur voit une impédance optimale à ses bornes. Une approche équivalente consiste à considérer que le système d'adaptation réalise la poursuite en temps réel du point de puissance maximale du générateur, d'ailleurs exprimée par la terminologie Anglaise consacrée pour ce type de système : Maximum Power Point Tracking (MPPT) [30].

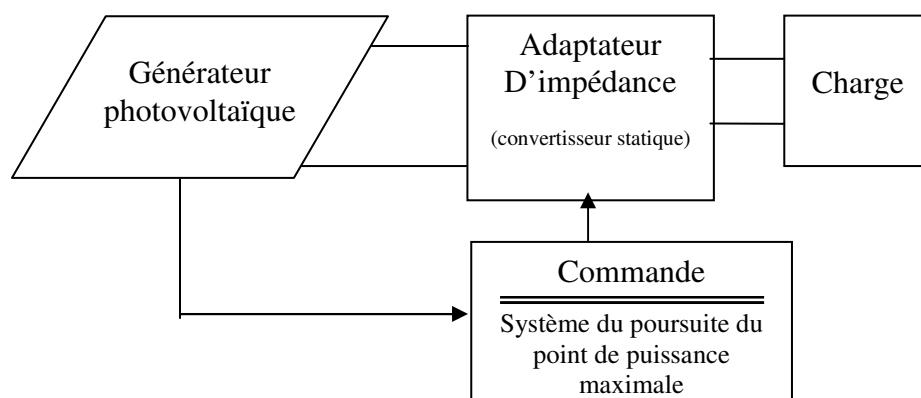


Figure I.11 : Adaptation d'impédance en temps réel générateur/charge.

II.5 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

Malgré les avantages qu'elle présente, l'énergie photovoltaïque présente certains inconvénients. Ceux-ci peuvent être résumés comme suit [31, 32] :

a- Avantages

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages à savoir :

- Une haute fiabilité - elle 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 milli Watt au MégaWatt.

- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

b- 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 (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.

Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire dans certaines démonstrations, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

II.6 Domaine d'application du photovoltaïque

Divers domaines d'application des systèmes PV peuvent être énumérés, tel que [41, 45] :

- Centrales d'énergie.
- Résidence urbaine.
- Domaine spatial.
- Habitation isolée.
- Industrie isolée.
- Biens de consommation.

II.7 Avenir du photovoltaïque

Source d'énergie 100% propre et fiable pour des usages très variés, elle figurera à l'avenir parmi les principales sources mondiales. Son handicap majeur reste un coût encore élevé comparé aux sources conventionnelles et aux filières renouvelables plus mûres. Ce coût diminue

de 10% par an, et pour accélérer cette baisse, les autorités nationales et internationales doivent engagés une politique de soutien à long terme de la filière photovoltaïque. C'est précisément l'objectif des programmes lancés depuis quelques années dans plusieurs pays industrialisés. Dans notre pays, l'application du PV reste encore modeste. La première utilisation été dans le domaine des télécommunications. Après certain puits dans les hauts plateaux ont été équipés par des systèmes de pompes PV. A nos jours, quelques dizaine de village saharien de la régions de Tamanraset jouissent des avantages de cette source d'énergie [54, 59].