

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou



Faculté De Génie Electrique Et D'informatique  
Département D'Electrotechnique

**Mémoire de Fin d'Etudes  
de MASTER ACADEMIQUE**  
Domaine : Sciences et Technologies  
Filière : Electrotechnique  
Spécialité : Electrotechnique Industrielle

*Présenté par*  
**BERREZIGA Nassim**  
**BABOU Smail**

Mémoire dirigé par **M. Ali BECHOUCHE**

**Thème**

**Commande directe par la  
méthode *Incremental Conductance*  
(*Inc-Cond*) d'un panneau  
photovoltaïque**

*Mémoire soutenu publiquement le 17/09/2018 devant le jury composé de :*

**M. SEDDIKI Hamid**  
Professeur, UMMTO, Président

**M. BECHOUCHE Ali**  
MCA, UMMTO, Encadreur

**M. MIOUAT Azzouz**  
MAA, UMMTO, Examineur

**M. RAHOUI Adel**  
MAB, ENSTP Alger, Examineur

# *Remerciements*

*Le plus grand merci s'adresse au bon Dieu, le tout puissant de nous avoir accordé le courage et la volonté pour accomplir ce travail.*

*Nous remercions nos familles et tous nos amis qui nous ont toujours encouragé et soutenu durant nos études.*

*Nous tenons également, à exprimer nos forts remerciements à notre promoteur, Mr BECHOUCHE, pour sa disponibilité à tout instant, ses conseils et son aide, et qui a mis à notre disposition tous les nécessaires pour réaliser ce travail.*

*Nous remercions les membres du jury qui ont bien voulu accepter d'examiner ce mémoire et à cet égard nous leurs présentons nos profonds respects, et notre grande gratitude.*

*Nous rendons grâce à tous les enseignants du département Électrotechnique, qui nous ont suivis durant notre cursus, et tous ceux qui ont contribué, à ce que ce travail prenne forme.*

# *Dédicaces*

*Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie, que je dédie mon travail à mes très chers, respectueux et magnifiques parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien tout au long de mes études.*

*A tous mes amis et toute ma promotion, et en particulier mon binôme SMAIL.*

*NASSIM*

# *Dédicaces*

*Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie, que je dédie mon travail à mes très chers, respectueux et magnifiques parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.*

*A mes frères et mes sœurs, pour leurs appuis et leur encouragement.*

*A tous mes amis et toute ma promotion, et en particulier mon binôme NASSIM .*

*A tous ceux qui de loin ou de près n'ont pas cessé de m'apporter leur soutien, pendant mes années d'études.*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible.*

*SMALL*

# *Sommaire*

# ***SOMMAIRE***

## **Introduction générale**

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

## **Chapitre I : Généralités sur la conversion photovoltaïque**

I.1 Introduction.....	3
I.2 Energie solaire .....	3
I.2.1 Présentation du soleil.....	3
I.2.2 Son énergie : Energie inépuisable .....	4
I.2.3 Mouvement de la terre autour du soleil .....	5
I.2.4 Trajectoire apparente du soleil .....	6
I.3 Rayonnement solaire.....	7
I.3.1 La constante solaire .....	7
I.3.2 Rôle de l'atmosphère .....	7
I.3.3 Masse d'air .....	8
I.4 Différents types de rayonnement solaire.....	9
I.5 Spectre solaire .....	10
I.6 Généralités sur les systèmes PV.....	11
I.6.1 Semi-conducteur .....	11
I.6.2 Cellule solaire .....	13
I.6.3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .....	14
I.6.3.1 L'interaction photon/semi-conducteur.....	14
I.6.3.2 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	15
I.7 Les différentes technologies des cellules solaires.....	17
I.7.1 Les cellules monocristallines.....	17
I.7.2 Les cellules poly-cristallines .....	17
I.7.3 Les cellules amorphes.....	18
I.8 Conclusion .....	18

## **Chapitre II : Modélisation du panneau photovoltaïque**

II.1 Introduction .....	19
-------------------------	----

II.2 Constitution d'un GPV .....	19
II.2.1 Module photovoltaïque .....	19
II.2.1.1 Caractéristique d'un module.....	19
II.2.2 Panneau photovoltaïque .....	20
II.3 Outil Matlab / Simulink .....	22
II.4 Modélisation du module photovoltaïque IFRI 260-60 .....	22
II.4.1 Modélisation du système photovoltaïque .....	24
II.4.2 Caractéristique I(V) et P(V) .....	28
II.4.2.1 Caractéristique I(V) .....	28
II.4.2.2 Caractéristique I(V) .....	29
II.5 Influence des conditions météorologiques sur le fonctionnement du module PV .....	30
II.5.1 Influence de l'éclairement sur le fonctionnement du module PV .....	30
II.5.2 Influence de la température sur le fonctionnement du module PV .....	31
II.6 Conclusion .....	33

### **Chapitre III : Poursuite du point de puissance maximale (MPPT)**

III.1 Introduction .....	34
III.2 Commande MPPT .....	34
III.2.1 Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque .....	34
III.2.2 Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT) .....	35
III.3 Convertisseurs DC-DC (Hacheurs) .....	35
III.3.1 Hacheur survolteur (Boost) .....	36
III.3.2 Modélisation du hacheur survolteur (Boost) .....	37
III.3.2.1 Modèle mathématique équivalent .....	37
III.3.2.2 Modèle approximé du convertisseur Boost .....	38
III.3.2.3 Etude en régime continu .....	39
III.3.2.4 Rapport de conversion .....	40
III.4 Classification des techniques MPPT .....	40
III.4.1 Premiers types de technique MPPT .....	41
III.4.2 Techniques MPPT à algorithmes performants .....	41
III.4.3 Principe de la commande « Incrément de conductance » (Inc-Cond) .....	42
III.5 Elaboration de la méthode Inc-Cond sous MATLAB/SIMULINK .....	45

III.5.1 Modèle de simulation de la méthode Inc-Cond.....	45
III.5.2 Modèle de simulation de l'algorithme Inc-Cond.....	46
III.6 Conclusion.....	46

## **Chapitre IV : Résultats de simulation de la méthode « incrémental conductance »**

IV.1 Introduction .....	47
IV.2 Différents profils de l'éclairement .....	47
IV.2.1 Profil haut et rapide .....	48
IV.2.2 Profil haut et lent .....	49
IV.2.3 Profil bas et rapide.....	50
IV.2.4 Profil bas et lent.....	51
IV.3 Variation de la température.....	52
IV.4 Influence du pas d'incrémentation .....	53
IV.4.1 Zoom du régime transitoire et du régime permanent .....	55
IV.5 Conclusion .....	57

### **Conclusion générale**

Conclusion générale .....	58
---------------------------	----

*Introduction*  
*générale*

## Introduction générale

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie inépuisable qui ont pris naissance depuis les soixante années du vingtième siècle. Parmi ces énergies renouvelables, on trouve l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'hydraulique et la biomasse [17].

L'utilisation de ces énergies pour la production de l'énergie est une option énergétique prometteuse qui répond à la demande croissante en énergie dans le monde, avec des avantages comme l'abondance, l'absence de toute pollution et la disponibilité en plusieurs points du globe terrestre. Cependant le rendement énergétique de la chaîne de conversion de ces énergies est relativement faible [13].

Le type d'énergie étudié dans notre mémoire est l'énergie solaire (conversion photovoltaïque).

La technologie photovoltaïque permet de transformer l'énergie solaire en électricité. Cette transformation s'effectue sans bruit, sans émission de gaz, elle est donc par nature totalement propre avec une grande fiabilité (durée de vie moyenne d'un module estimée à plus de 30 ans). Particulièrement, l'énergie photovoltaïque est disponible dans la plupart des pays situés entre l'équateur et les 45c parallèles. C'est une source d'énergie d'une fiabilité remarquable qui présente un bilan énergétique et environnemental tout à fait favorable. On peut utiliser cette énergie pour l'alimentation des régions isolées ou désertes soit pour l'éclairage, pour le pompage d'eau, pour la charge d'une batterie ou pour la connexion sur le réseau public électrique [25].

En effet, l'énergie solaire est caractérisée par sa fluctuation selon la saison et les heures de la journée. L'énergie fournie par les panneaux solaires dépend des conditions climatiques (l'intensité de l'éclairement et de la température) et de la tension aux bornes du panneau, ce qui engendre une utilisation intermittente et irrégulière [25].

Dans ce sens la puissance délivrée peut ne pas être maximale ce qui peut réduire l'efficacité du système photovoltaïque. Il est donc nécessaire de poursuivre la puissance maximale du panneau solaire par une commande MPPT en utilisant une méthode performante et efficace. Cette puissance est amenée à la charge à travers un convertisseur DC/DC. Ceci permettra d'améliorer la commande de l'interface de puissance et aussi d'optimiser le transfert de l'énergie dans un système photovoltaïque et améliorer son rendement [25].

Le travail présenté dans ce mémoire a porté sur la commande directe par la méthode « incrémental conductance » d'un panneau photovoltaïque. Pour se faire nous avons présenté ce manuscrit de la façon suivante :

Le premier chapitre donne des notions sur l'énergie solaire et ses caractéristiques et les différentes technologies utilisées dans un système photovoltaïque.

Le deuxième chapitre présente la description et le principe de fonctionnement du générateur photovoltaïque, sa modélisation mathématique et sa simulation sous Matlab/Simulink, ainsi que l'effet des variations climatiques (l'éclairement et la température) sur les différentes caractéristiques du générateur photovoltaïque.

Le troisième chapitre aborde la description d'une technique de la commande MPPT qui est la méthode « incrémental conductance », son fonctionnement, son algorithme et sa simulation sous Matlab/Simulink. Cette commande va être associée à un convertisseur DC-DC qui est le hacheur boost qui va être modélisé.

Dans le quatrième chapitre, nous allons donner les résultats de la simulation de la méthode Inc-Cond qui doivent être identiques à ceux trouvés dans le chapitre II pour confirmer la performance et l'efficacité de cette méthode.

Nous terminons ce mémoire par une conclusion générale résumant les principaux résultats obtenus ainsi que les perspectives de ce travail.

# *Chapitre I*

## *Généralités sur la conversion photovoltaïque*

## I.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule [1]. Le nom Photovoltaïque vient du Grec, il est composé de deux parties:

**Photos** : Lumière.

**Volt** : Unité de tension électrique, du nom Alessandro volta.

Ce phénomène fut découvert au 19<sup>ème</sup> siècle par le physicien **Alexandre Edmond Becquerel**.

La première cellule photovoltaïque fut développée début 1954 pour l'alimentation en énergie des satellites. Depuis 1958, les cellules photovoltaïques alimentent seulement le système énergétique des satellites jusqu'à ses premières applications terrestres au début des années 70. Le photovoltaïque fut utilisé pour l'alimentation en énergie de petites maisons isolées et d'équipements de télécommunications [2].

Aujourd'hui, grâce à sa fiabilité et à son concept respectueux de l'environnement, le photovoltaïque prend une place prépondérante.

Pour comprendre ce phénomène, nous avons rappelé dans ce chapitre quelques notions de base sur l'énergie solaire, et les propriétés des semi-conducteurs ; matériaux de base des cellules PV. Ensuite nous avons décrit la cellule solaire et son principe de fonctionnement, ainsi que ses différentes technologies.

## I.2 Energie solaire

### I.2.1 Présentation du soleil

Le soleil est une étoile de forme pseudo-sphérique dont le diamètre atteint 1 391 000 km. Il est situé à une distance moyenne de 149 598 000 km de la Terre. Composé de matière gazeuse, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium, il est le siège de réactions de fusion nucléaire permanentes et sa température de cœur atteint  $10^7$  K [3].

Il demeure notre plus grande source d'énergie même si elle intermittente. Cette dernière

est propre, facilement accessible et virtuellement inépuisable [4].

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

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

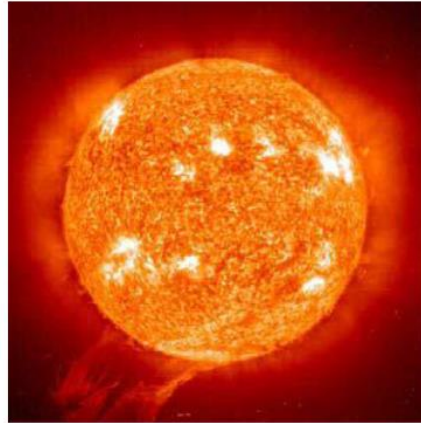
Bien que sa lumière soit 600 000 fois plus élevée que celle de la lune (son miroir), il n'est visible qu'à une distance de 60 al (année-lumière) [5].

### **I.2.2 Son énergie : Energie inépuisable**

Cette gigantesque bombe thermonucléaire dont la puissance émise sous forme de photon, représente un chiffre considérable de  $3,82 \cdot 10^{26}$  Watts. C'est le résultat de la combustion de 596 million de tonnes/seconde d'hydrogène convertis en 592 million de tonnes/seconde d'hélium. La perte de 4 million de tonnes/seconde, se traduit sous forme de rayonnement gamma. Chaque  $\text{cm}^2$  de sa surface émet une énergie de 6 kilowatts, mais il n'arrive sur Terre que 5 milliardièmes ( $5 \cdot 10^{-9}$ ) de cette puissance. Cette pile thermonucléaire fonctionne grâce à la transformation de 4 noyaux d'atomes d'hydrogène qui fusionnent pour fournir 1 noyau d'atome d'hélium avec la libération d'une énergie de 25 000 mégawatts par gramme et par seconde (100 milliards de bombes à hydrogène de 1 mégatonne).

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

Le transfert d'énergie du centre vers la surface s'effectue par rayonnement et par convection. La zone de convection est limitée par la photosphère, épaisse de 200 km, et appelée ainsi parce que presque la totalité du rayonnement visible provient d'elle. Elle a une apparence granuleuse, provoquée par la turbulence de la partie supérieure de la zone de convection. La taille d'une granule peut dépasser celle de la France et la durée de vie peut aller de 10 minutes à plus de 10 heures, selon la taille (figure I.1).



**Figure I.1 : Le soleil [5]**

Cette pression empêche les photons d'atteindre la surface dès leur création. Ainsi, ils mettent 2 millions d'années pour sortir des profondeurs du Soleil, tandis qu'il leur faut 8 minutes pour arriver sur Terre. Quant aux neutrinos, fabriqués en même temps, ils sortent instantanément. Absolument rien, n'est capable de les arrêter. Par conséquent, il est très difficile de les étudier.

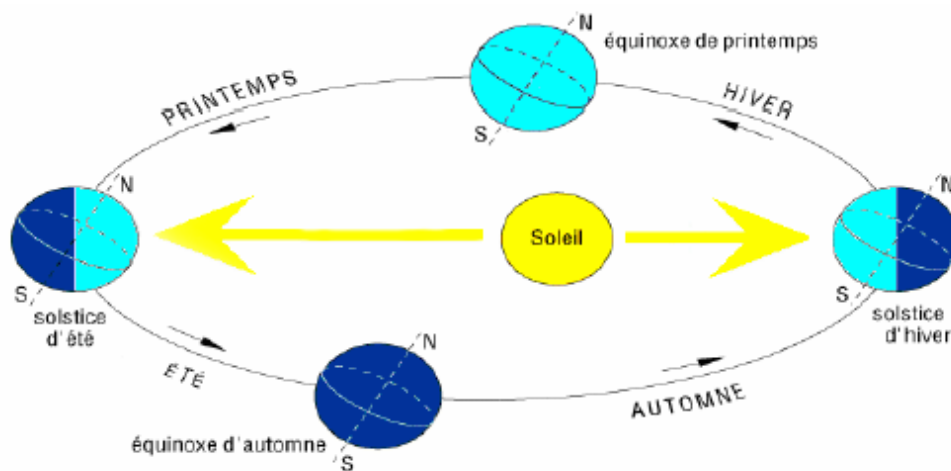
Ainsi, la recherche des neutrinos nous renseigne sur la lumière qui sortira dans 2 millions d'années du Soleil. Aujourd'hui, le taux est inférieur à ce que l'on attendait. Cela peut signifier que dans 2 millions d'années, la température sera plus basse avec des conséquences très importantes sur l'environnement terrestre [5].

### **I.2.3 Mouvement de la terre autour du soleil**

Le mouvement de la terre autour du soleil s'effectue dans un plan nommé le plan de l'écliptique.

L'axe des pôles, autour duquel s'effectue le mouvement de rotation de la terre, n'est pas perpendiculaire au plan de l'écliptique. Le centre de gravité de la terre décrit une ellipse dont le soleil occupe l'un des foyers.

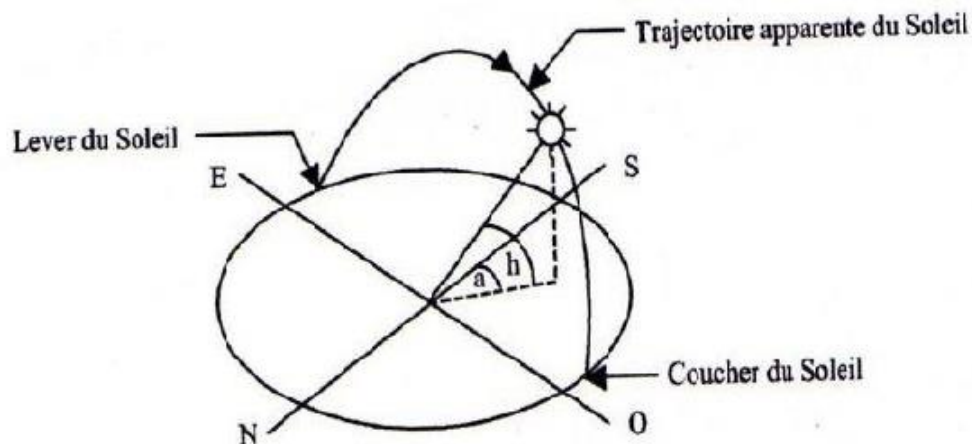
La Terre tourne sur elle-même autour de l'axe des pôles et le plan équatorial, perpendiculaire à cet axe. Ainsi, la rotation et l'inclinaison de la Terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. Elle tourne autour du soleil en 365 jours 5h 48 mn 40s  $\approx$  365,25 jours. Cette dernière tourne avec une vitesse moyenne de 29,77 Km/s (vitesse maximale en hiver 30,27 Km/s et minimale en été 29,77 Km/s). Ce mouvement s'effectue dans le sens trigonométrique et provoque le cycle des saisons (figure I.2) [6].



**Figure I.2 :** Le mouvement de la Terre autour du soleil [6]

#### I.2.4 Trajectoire apparente du soleil

Pour un observateur situé sur la surface de la Terre, le soleil décrit une trajectoire apparente qui dépend de la latitude et longitude du lieu où il se trouve. Rappelons que la latitude est la distance angulaire d'un point quelconque du globe par rapport à l'équateur. Quant à la longitude, c'est également un angle, donné par rapport au méridien de Greenwich en se déplaçant vers l'Est. La position du soleil est définie par deux angles, sa hauteur angulaire  $h$  (l'angle entre la direction du soleil et le plan horizontal du lieu) et son azimut  $a$  : l'angle entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil, compté négativement vers l'Est [7].



**Figure I.3 :** Repérage de la position du soleil [8]

### I.3 Rayonnement solaire

#### I.3.1 La constante solaire

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à  $1367\text{W/m}^2$  [9].

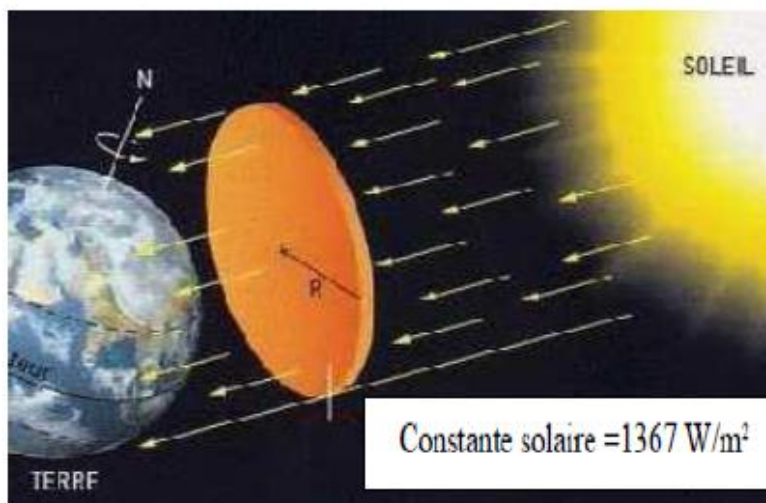


Figure I.4 : La constante solaire [9]

#### I.3.2 Rôle de l'atmosphère

L'énergie lumineuse dite « extraterrestre » c'est-à-dire hors atmosphère a été évalué avec précision par la NASA et vaut  $1\ 367\ \text{W/m}^2$ . Il s'agit de l'irradiance reçue, ou rayonnement solaire instantané, à un instant donné au-dessus de l'atmosphère terrestre, en incidence normale (plan perpendiculaire à la direction du soleil). L'énergie qui descend en ligne droite vers notre planète ne peut pas parvenir sur la terre en intégralité car elle va subir des transformations en traversant l'atmosphère : par absorption et par diffusion.

En effet, l'atmosphère contient, on le sait, une majorité d'azote et d'oxygène (Respectivement 78 et 21%), mais aussi de l'argon, du  $\text{CO}_2$ , de la vapeur d'eau et la fameuse couche d'ozone de la stratosphère, dont de rôle de filtrage des UV les plus durs et si important. Les poussières et les nuages (formés de minuscules gouttelettes d'eau, à ne pas confondre avec la vapeur d'eau, qui est un gaz) ont aussi leur importance dans la diffusion du rayonnement solaire [10].

### I.3.3 Masse d'air

Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus le rayonnement direct qu'il émet va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir de transformation. On appelle masse d'air, le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement direct (distance OM) pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu (distance OA) (figure I.5) [10].

A l'aide des points : O, A et M et l'angle  $h$  tel que c'est illustré par la figure (I.5), la longueur du trajet du rayonnement du soleil à travers l'atmosphère est donné par :

$$OM = \frac{OA}{\sin h} \quad (\text{I.1})$$

Donc l'air masse

$$\frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sin h} \quad (\text{I.2})$$

Les air-masses les plus usuelles sont les suivantes :

**AM1** : Soleil au zénith (au niveau de la mer)

**AM2** : Soleil à  $30^\circ$

**AM3** : Soleil à  $41.8^\circ$

AM0 désigne le rayonnement hors atmosphère.

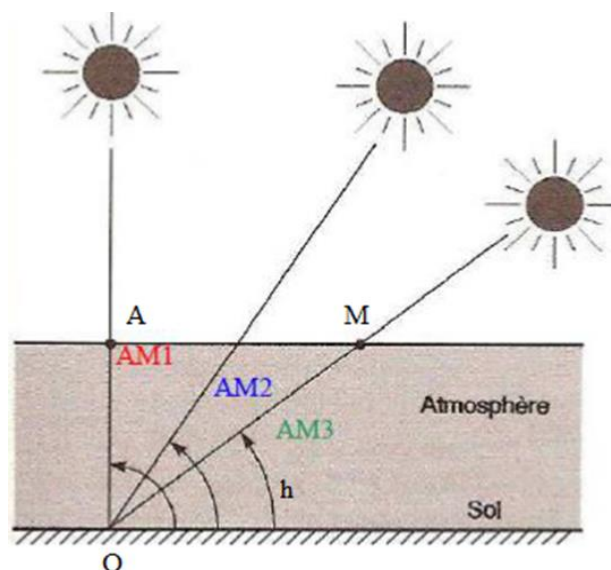


Figure I.5 : Définition de l'air masse [10]

#### I.4 Différents types de rayonnement solaire

Afin de quantifier l'énergie développée par le générateur photovoltaïque dans une application donnée, il est nécessaire de connaître le spectre du rayonnement solaire reçu sur sol. En effet, quatre types de rayonnement ont été répertoriés dans la littérature à savoir [11]:

- **Rayonnement direct**

Le rayonnement direct se définit comme étant le rayonnement provenant du seul disque solaire. Il est donc nul lorsque le soleil est occulté par les nuages.

- **Rayonnement diffus**

Dans sa traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire est diffusé par les molécules de l'air et les particules en suspension. Le rayonnement solaire diffus n'est donc nul que la nuit.

- **Rayonnement réfléchi**

Appelé au même titre Albédo, c'est la capacité d'une surface à réfléchir une lumière notamment celle du soleil. Il est exprimé par un chiffre compris entre 0 et 1. Le « 1 » s'affecte à un corps qui réfléchit totalement la lumière reçue.

- **Rayonnement global**

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements direct, diffus, et reflété par le sol.

Dans la figure ci-dessous (figure I.6) est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçus sur la surface terrestre.

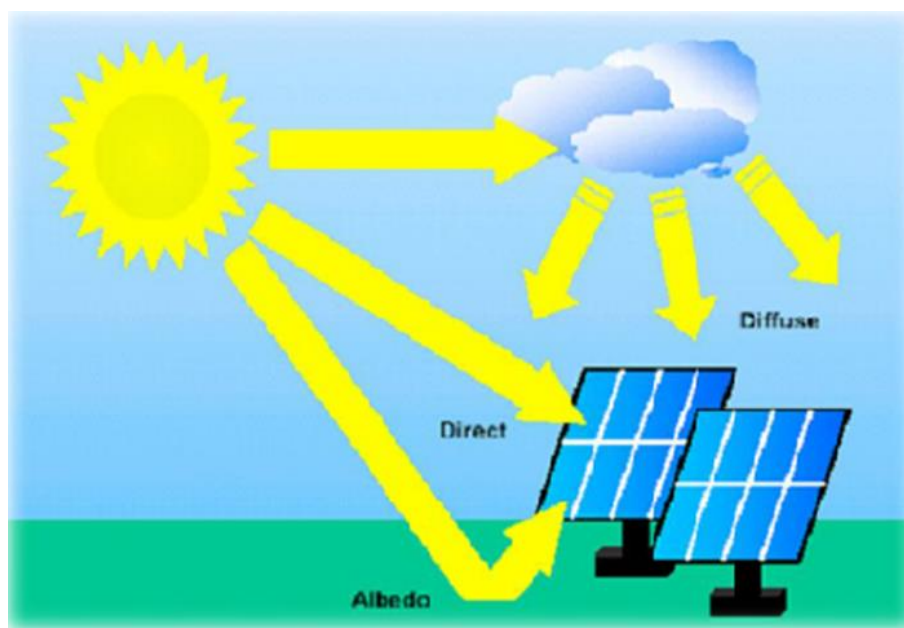


Figure I.6 : Composantes du rayonnement solaire [11]

## I.5 Spectre solaire

Le spectre solaire est sa décomposition en longueur d'onde ou « couleurs ». La lumière solaire est en effet composée de toutes sortes de rayonnement de couleurs différentes, caractérisées par leur longueur d'onde. Les photons, grains de lumières qui composent ce rayonnement électromagnétique, sont porteurs d'une énergie est reliée à leur longueur d'onde par la relation :

$$E = h\nu = h \frac{C}{\lambda} \quad (\text{I.3})$$

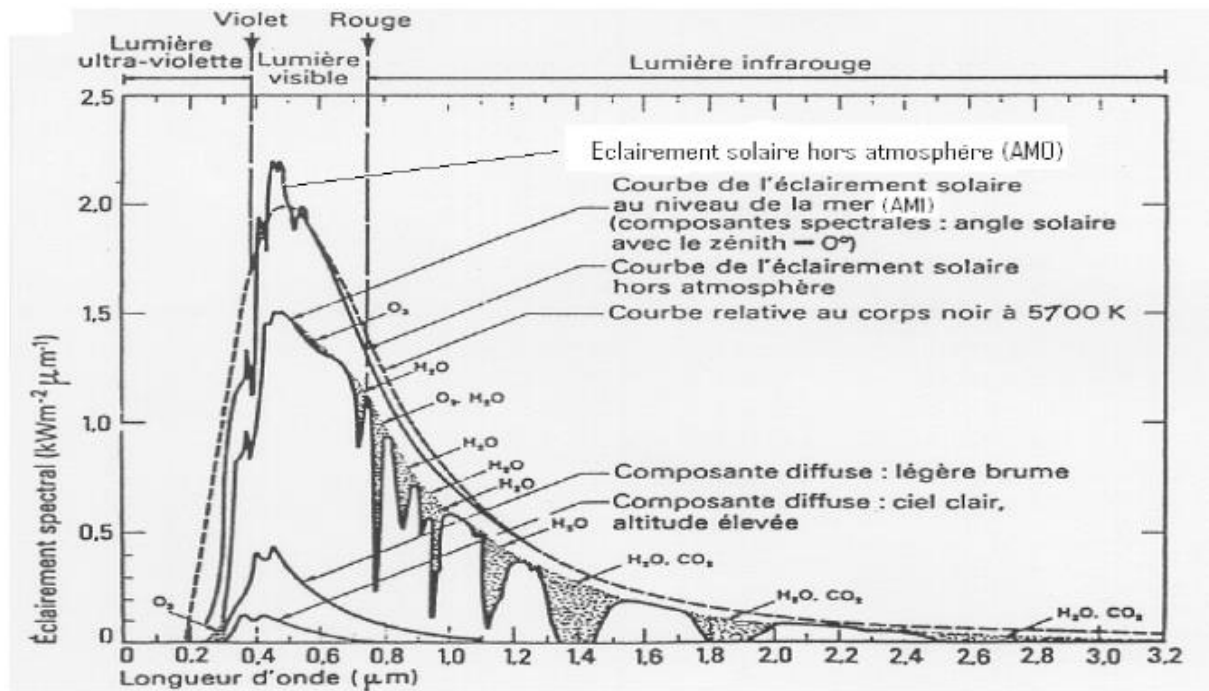
Où  $h$  est la constante de Planck,  $\nu$  la fréquence,  $C$  la vitesse de la lumière et  $\lambda$  la longueur d'onde.

C'est cette relation, mise à jour par **Louis de Broglie** en 1924 qui a confirmé la nature à la fois corpusculaire et ondulatoire de la lumière : présence de capsules (les photons) et propagation d'ondes avec la fréquence de vibration et une longueur d'onde.

Une courbe standard de la répartition spectrale du rayonnement solaire extraterrestre compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de **AM0**. Sa distribution en énergie est répartie comme suit [3] :

ultraviolet UV	$0.20 < \lambda < 0.38 \mu\text{m}$	6.4%
visible	$0.38 < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$	48.0%
Infrarouge IR	$0.78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$	45.6%

La figure(I.7) présente la courbe d'énergie du corps noir à 6000K, le rayonnement solaire hors de l'atmosphère et le rayonnement solaire au niveau de la mer en fonction de la longueur d'onde.



**Figure I.7 :** Eclairage solaire [12]

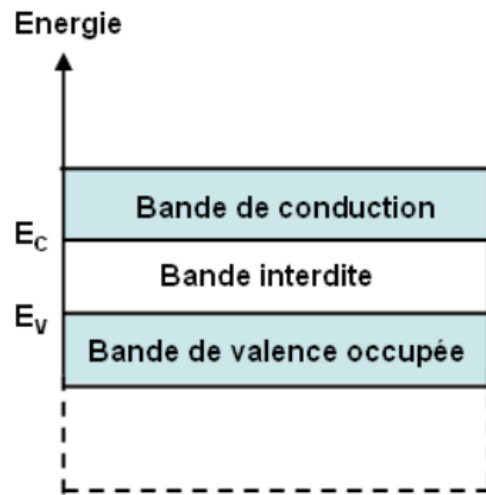
D'après la figure (I.7), nous constatons que le rayonnement solaire peut être réfléchi, diffusé ou absorbé. Par ailleurs, les spectres des rayonnements réfléchi, diffusé, et absorbé sont différents.

A la surface de la terre, le spectre solaire n'est pas le même que dans l'espace, car il est pondéré par l'absorption des molécules présentes dans l'atmosphère ( $\text{O}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,...). Les conditions climatiques ainsi que la présence de particules influencent également la valeur réelle du spectre [12].

## I.6 Généralités sur les systèmes PV

### I.6.1 Semi-conducteur

Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux. Il existe des domaines d'énergie appelés bandes qui seront soit permis, soit interdits. Les énergies que peut prendre l'électron de la couche périphérique de l'atome se répartissent entre deux bandes : bande de valence et bande de conduction, séparées par la bande interdite [7], comme l'illustre la figure (I.8).



**Figure I.8 :** Niveau d'énergie dans un semi-conducteur

Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction). C'est l'énergie du "band gap",  $E_g$ , en électron-volt (eV). Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et va de 1,0 à 1,8 eV pour les applications PV. Elle est de 1,1 eV pour le silicium cristallin, et de 1,7 eV pour le silicium amorphe [13].

Les semi-conducteurs intrinsèques, éléments de la quatrième colonne du tableau périodique des éléments, constituent des cristaux qui peuvent devenir conducteurs sous certaines conditions. Pour expliquer ce phénomène, il convient dans un premier temps de décrire la structure électronique des atomes. Ces différentes bandes d'énergie accessibles sont séparées par des bandes énergétiques interdites appelées « gap » qui constituent de véritables barrières énergétiques :

$$\Delta E = E_C - E_V \quad (\text{I.4})$$

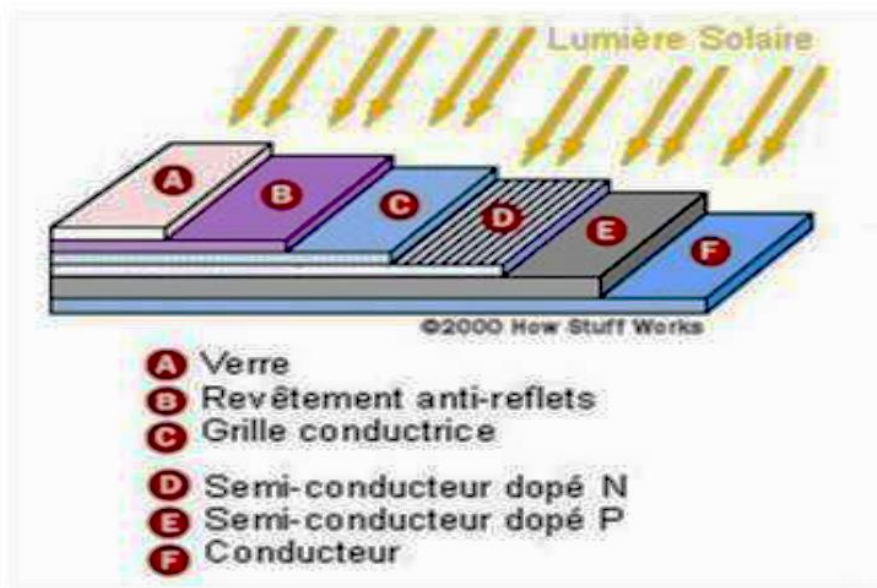
En outre on appelle bande de valence, la bande la plus élevée en énergie occupée par les électrons et bande de conduction, la bande énergétique accessible située au-dessus de la bande interdite.

Lorsqu'il y a apport d'énergie, comme c'est le cas avec un rayon lumineux incident, les électrons de la bande de valence sont susceptibles de traverser la bande interdite et de passer dans la bande de conduction. Dès lors, ces électrons deviennent libres et sont capables de se déplacer à l'intérieur du cristal [7].

## I.6.2 Cellule solaire

Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité [13]. Elles sont constituées :

- d'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- d'une couche anti-reflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- d'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.
- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.



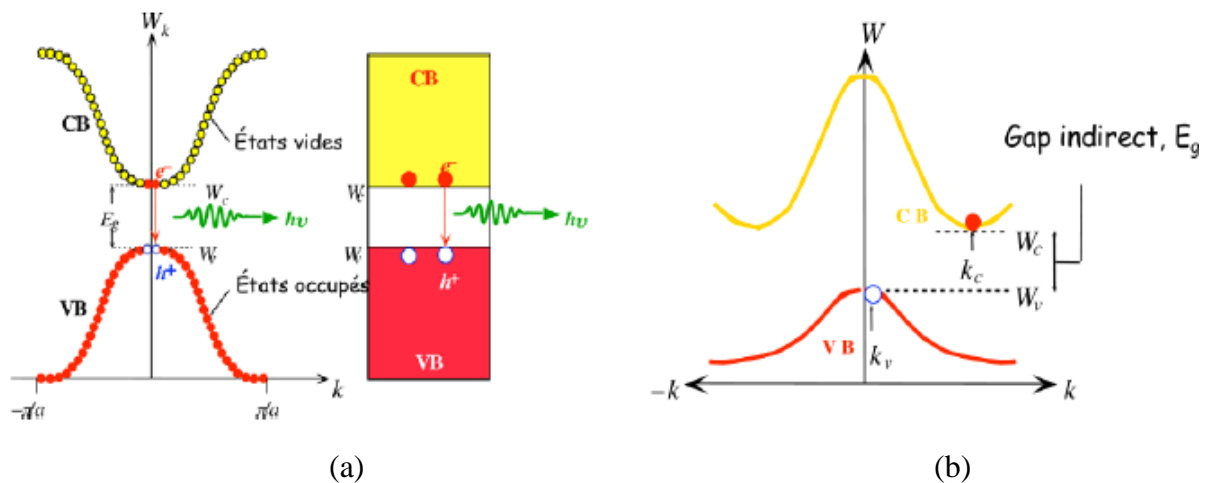
**Figure I.9 :** Structure basique d'une cellule solaire [12]

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [12].

### I.6.3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

#### I.6.3.1 Interaction photon/semi-conducteur

L'écart entre les bandes de valence et de conduction, ou *gap*, représente une caractéristique fondamentale des semi-conducteurs. La figure (I.10) présente les différentes transitions possibles selon la nature du gap. Quand le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence coïncident dans l'espace des  $k$ , il s'agit d'un gap direct. Les transitions inter bandes s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives (figure I.10 (a)). Ceci illustre le fonctionnement des semi-conducteurs binaires III-V, tels que le GaAs, beaucoup utilisés en optoélectronique. Dans le cas du silicium, le gap est indirect : les transitions électroniques entre les extrema des bandes sont obliques, donc non radiatives puisqu'elles impliquent un changement du vecteur d'onde de l'électron. Les électrons du sommet de la bande de valence peuvent toutefois être directement excités vers le minimum relatif central de la bande de conduction grâce à un photon de plus grande énergie. Pour que la transition s'effectue dans le gap indirect, il faut qu'un phonon soit au préalable absorbé (ou émis) par l'électron, afin que le vecteur d'onde de ce dernier corresponde au maximum de la bande de valence, pour absorber un photon (figure I.10 (b)). Notons que la valeur du gap indirect du silicium est de 1,12 eV à 300 K (ce qui correspond à une longueur d'onde de 1107 nm), mais celle du premier gap direct vaut 3,4 eV (soit 365 nm) [14].

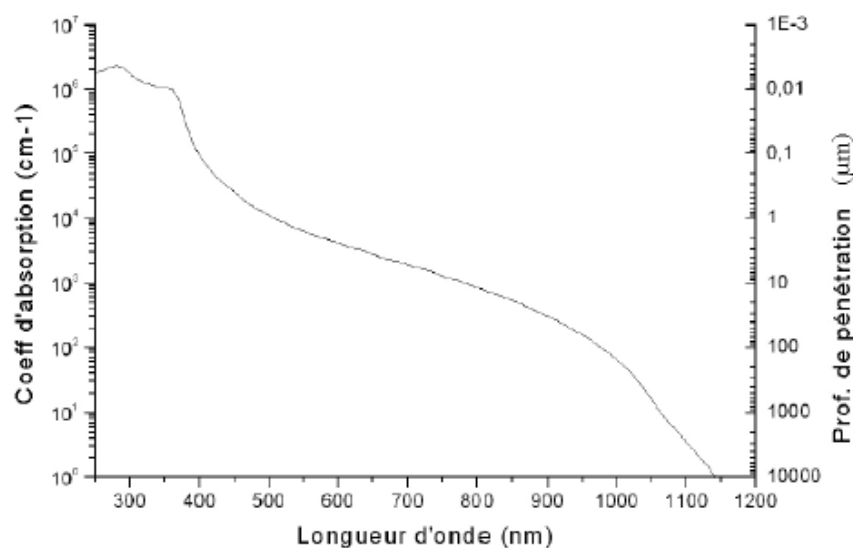


**Figure I.10 :** Représentations schématiques du gap direct (a) et du gap indirect (b) [15]

L'interaction entre les photons et un semi-conducteur se traduit par une caractéristique essentielle du matériau dans le domaine photovoltaïque : le coefficient d'absorption. Il traduit le nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur du matériau en fonction de leur longueur d'onde. La figure (I.11) nous donne celui du silicium. Nous constatons que pour des longueurs

d'ondes inférieures à 365 nm, la majorité des photons incidents est absorbée dans les 100 premiers Å du matériau. Comme nous l'avons vu précédemment, ces transitions directes ne sont plus possibles pour des longueurs d'ondes plus grandes. Il faut alors qu'un phonon au moins vienne assister l'électron pour que ce dernier passe dans la bande de conduction. Ceci réduit la probabilité de transition.

L'augmentation de la longueur d'onde des photons entraîne donc une diminution du coefficient d'absorption. Lorsque l'énergie du photon devient inférieure à celle du gap du matériau (à l'énergie d'un phonon près), la transition n'est plus possible et le photon n'est pas absorbé.



**Figure I.11 :** Coefficient d'absorption du silicium et profondeur de pénétration des photons en fonction de la longueur d'onde [14]

L'interaction photon/électron au sein du semi-conducteur se traduit finalement par la génération d'une paire électron-trou, qui modifie localement la conductivité du matériau.

Notons que nous nous situons dans un régime de faible injection, c'est à dire que la densité de porteurs photo générés est faible devant celle des porteurs majoritaires au sein du matériau. Ainsi cet excès de porteurs est plus sensible dans le cas des porteurs minoritaires (trous dans la région dopée n et électrons dans celle dopée p). La cellule photovoltaïque se comportant comme un générateur, il s'agit à présent de séparer ces deux types de porteurs pour éviter qu'ils ne se recombinent entre eux, et de les collecter dans un circuit électrique extérieur [14].

### I.6.3.2 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

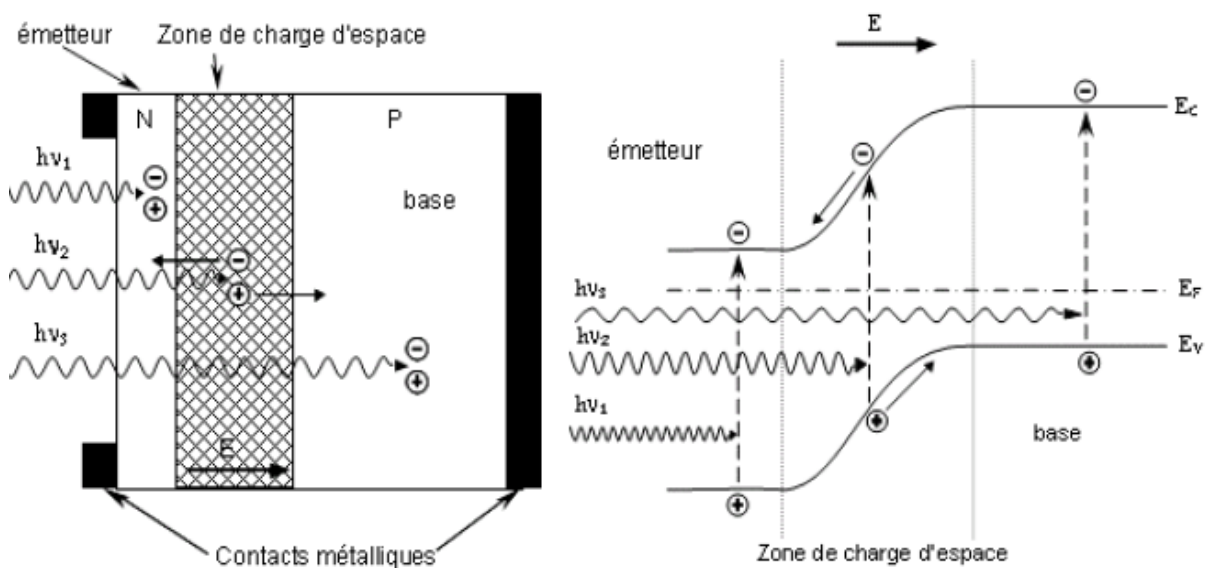
Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire

en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur.
- collecte des particules générées dans le dispositif. Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électron/trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction p-n. D'autres structures, comme les hétérojonctions et les Schottky peuvent également être utilisées.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure (I.12) :



**Figure I.12** : Structure (gauche) et diagramme de bande (droite) d'une cellule photovoltaïque.

Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respectées [14]

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones N et P et dans la zone de charge d'espace. Les photo-porteurs auront un comportement différent suivant la région :

- Dans la zone N ou P, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont envoyés par le champ électrique dans la zone P (pour les trous) ou dans la zone N (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura un photo courant de diffusion.
- Dans la zone de charge d'espace, les paires électron / trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région N, les trous vers la région P. On aura un photo courant de génération [14].

## **I.7 Différentes technologies des cellules solaires**

Pratiquement toutes les cellules solaires disponibles aujourd'hui sont réalisées à base de silicium. Ce semi-conducteur est principalement employé dans la fabrication de puces informatiques.

Les cellules solaires sont construites avec la même matière première et les mêmes procédés de base. Elles existent en différentes formes et technologies :

### **I.7.1 Cellules monocristallines**

La cellule monocristalline est celle qui s'approche le plus du modèle théorique: cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches. Les cellules monocristallines permettent d'obtenir de hauts rendements, de l'ordre de 15 à 22 %.

Ces cellules présentent néanmoins des inconvénients :

- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.
- Une durée d'amortissement de l'investissement en énergie élevée (jusqu'à 7 ans).

### **I.7.2 Cellules poly-cristallines**

Les cellules poly-cristallines sont composées d'un agglomérat de cristaux. Elles aussi proviennent du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et sont dès lors hétérogènes.

Les cellules poly-cristallines sont caractérisées par :

- Coût de production moins élevé.
- Nécessite moins d'énergie.
- Rendement de 13 % et jusqu'à 20 % en laboratoire.

### **I.7.3 Cellules amorphes**

Le silicium amorphe, apparu en 1976. Sa structure atomique est désordonnée, non cristallisée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin.

Cependant, ce qu'il gagne en pouvoir d'absorption, il le perd en mobilité des charges électriques (rendement de conversion faible).

Les cellules amorphes sont caractérisées par :

- Coût de production bien plus bas.
- Rendement de seulement 5 % par module et de 14 % au laboratoire.
- Fonctionne sous très faible éclaircissement.

Ces cellules sont destinées aux appareils de faible puissance et à la production d'énergie (calculatrices et montres solaires).

Grâce à la technologie des nouveaux matériaux le tellurure de cadmium (CdTe), l'arséniure de gallium (GaAs) ainsi que le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS) ont permis d'obtenir des photopiles ayant des rendements 38 % au laboratoire.

## **I.8 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension du sujet en général. Nous avons donné une explication sur le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque, puis nous avons expliqué la variation de l'énergie de bande gap, et à la fin nous avons cité quelques types de cellules solaires.

Dans le chapitre qui suit, nous nous intéresserons à la modélisation d'un générateur photovoltaïque en précisant l'influence des conditions météorologiques (éclairage, température) sur le rendement de la production de l'énergie électrique à partir de l'énergie photovoltaïque.

# *Chapitre II*

## *Modélisation du panneau photovoltaïque*

## II.1 Introduction

La modélisation d'un générateur photovoltaïque (GPV) est une étape importante dans l'analyse et l'évaluation des performances des systèmes PV. Il existe plusieurs modèles mathématiques décrivant le GPV.

Dans ce chapitre, nous exposerons les formules mathématiques « Modèles » du générateur photovoltaïque, puis nous présenterons l'implémentation de ces modèles sous MATLAB/SIMULINK. Les résultats des différentes simulations effectuées seront présentés puis interprétés.

## II.2 Constitution d'un générateur photovoltaïque

### II.2.1 Module photovoltaïque

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et en parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire [16].

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes [17] :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques.
- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur.

#### II.2.1.1 Caractéristiques d'un module

Les modules sont généralement des parallélépipèdes rectangles, rigides, minces (quelques centimètres d'épaisseur), dont les caractéristiques sont les suivantes [18] :

- **La puissance de crête,  $P_C$**  : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards ( $25^\circ\text{C}$  et un éclairement de  $1000\text{ W/m}^2$ ).
- **La caractéristique  $I=f(V)$**  : Courbe représentant le courant  $I$  débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- **Tension à vide,  $V_{OC}$**  : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".
- **Courant de court-circuit,  $I_{CC}$**  : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".
- **Point de fonctionnement optimum,  $P_m (V_m, I_m)$**  : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil,  $P_m = V_m \times I_m$ .
- **Rendement** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale  $P_m$  et la puissance maximale que peut avoir la cellule :  $V_{OC} \times I_{CC}$ .

### II.2.2 Panneau photovoltaïque

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.



**Figure II.1** : Panneau photovoltaïque [17]

Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, ce que fait qu'on aura besoin de boîte de dérivation qui regroupe le tous, Alors cette boîte de dérivation fixée sur une structure du montage a comme rôle d'effectuer les connections entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie [17].



**Figure II.2 :** Boîte de dérivation [17]

La boîte de dérivation est composée également d'un circuit imprimé sur lequel se trouvent :

- Des diodes Schottky séries, placée sur un radiateur, sur chaque entrée, qui empêchent les batteries de se décharger dans les panneaux.
- Des fusibles de protections qui empêcheront les batteries de se décharger dans les modules en cas de destruction des diodes antiparallèles.
- Des diodes lumineuses, en parallèle sur chaque fusible de protection. Ces diodes permettant de contrôler individuellement chaque branche de modules. Par exemple une boîte à 4 entrées de 24 Volts sera constituée de deux branches et de deux modules, il y aura donc deux diodes qui permettront de constater le fonctionnement de chaque branche.
- Une protection parafoudre (Transil ou VDR) en sortie de la boîte.

Le câblage de ces boîtes permet d'avoir une sortie en 12, 24 ou 48 volts selon les modules, elles sont équipées de deux à douze entrées, selon les tensions de sortie. La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants des panneaux PV dépend :

- des besoins en électricité.
- la taille du panneau.

- L'ensoleillement du lieu d'utilisation.
- La saison d'utilisation.

### II.3 Outil Matlab / Simulink

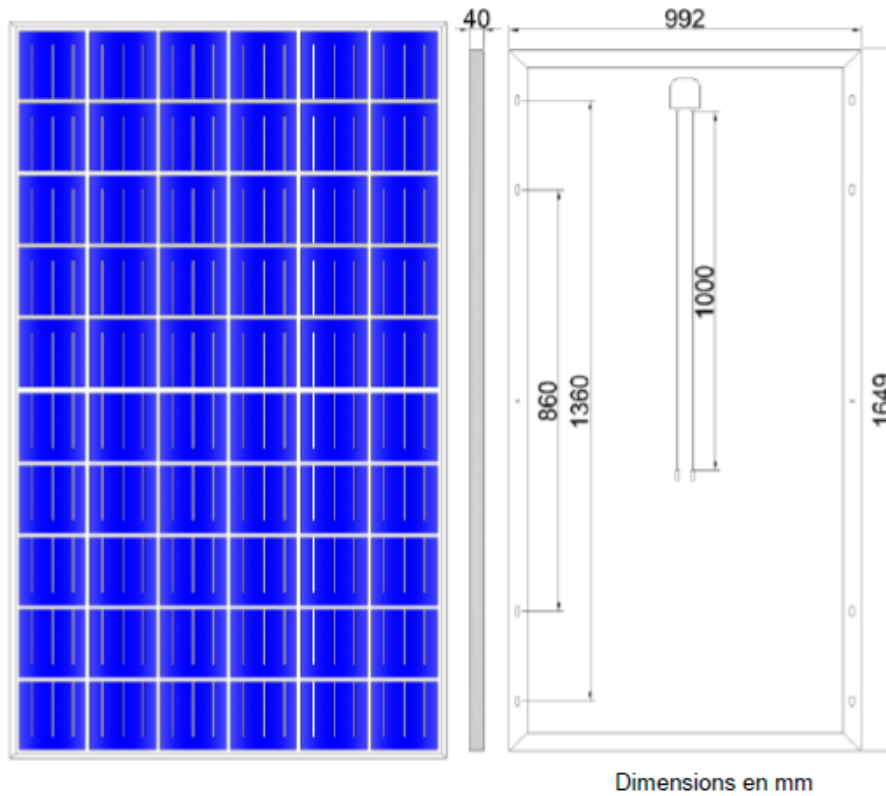
**MATLAB** fait également partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal. En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble :

- Une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Toolboxes).
- Simulink, un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas-blocs et de simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
- Des bibliothèques de blocs Simulations spécialisés (Blocksets).
- D'autres modules dont un Compilateur, un générateur de code C, un accélérateur.
- Un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal : le DSP Workshop.

**SIMULINK** est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la Simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal [19].

### II.4 Modélisation du module photovoltaïque IFRI 260-60

Dans notre travail nous allons simuler sous Matlab Simulink le module PV (IFRI 260-60). Ce module est en silicium polycristallin est constitué de 60 cellules PV élémentaire. Il peut délivrer dans les conditions standards de test (CST) une puissance de 260W, un courant de 8.1A sous une tension optimale de 32.05V.



**Figure II.3** : Module IFRI 260-60

Le tableau II.1 donne les caractéristiques du module IFRI 260-60 sous les conditions standards (irradiation :  $1000\text{W}/\text{m}^2$ , température de cellule :  $25^\circ\text{C}$ , masse d'air : AM 1.5)

Grandeurs	Valeurs
Puissance nominal ( $P_{mp}$ )	260 W
Tension au MPP ( $V_{mp}$ )	32.05 V
Courant au MPP ( $I_{mp}$ )	8.1 A
Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )	8.65 A
Tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ )	38.1 V
Nombre de cellules en série ( $N_s$ )	60
Nombre de cellules en parallèle ( $N_p$ )	1
Résistance série ( $R_s$ )	0.131 $\Omega$
Résistance parallèle ( $R_p$ )	199 $\Omega$

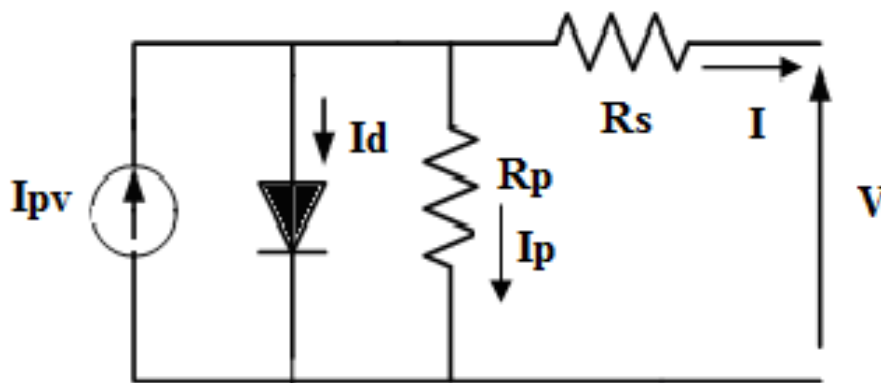
**Tableau II.1** : Caractéristiques du panneau PV IFRI 260-60

### II.4.1 Modélisation du système photovoltaïque

Le module fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation d'une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule, une résistance série  $R_s$  représentant les diverses résistances de contacts et de connexions et une résistance parallèle  $R_p$  caractérisant les divers courants de fuites dus à la diode et aux effets de bords de la jonction.

Le générateur photovoltaïque est représenté par un modèle standard à une seule diode, établi par Schrockley pour une seule cellule PV, et généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série-parallèle.

On représente le schéma du circuit électrique par la figure (II.4) :



**Figure II.4 :** Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque

L'équation reliant le courant délivré par une cellule PV est donnée par la loi de Kirchhoff, tel que :

$$I = I_{pv} - I_d - I_p \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$$I_{pv} = (I_{cc} + K_t \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (\text{II.2})$$

$I_{pv}$  : Courant photovoltaïque.

$I_{cc}$  : Courant de court-circuit à 25°C et 1000 W/m<sup>2</sup>.

$\Delta T = T - T_n$  : Sont respectivement la température ambiante et la température nominale en (Kelvin).

$K_i$  : Coefficient de variation du courant en fonction de la température (A/K).

$G$  : L'irradiation solaire (W/m<sup>2</sup>).

$G_n$  : L'irradiation nominale (W/m<sup>2</sup>).

Le courant de la diode  $I_d$  est donné par la formule de Schrockley, tel que :

$$I_d = I_0 \left[ \exp \left( \frac{V + R_s I}{a V_T} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.3})$$

Le courant traversant la résistance parallèle peut s'écrire sous la formule suivante :

$$I_p = \left( \frac{V + R_s I}{R_p} \right) \quad (\text{II.4})$$

$$I_0 = \frac{I_{CC} + K_i \Delta T}{\exp \left[ \frac{V_{OC} + K_v \Delta T}{a V_T} \right] - 1} \quad (\text{II.5})$$

Donc le courant  $I$  devient :

$$I = I_{pv} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{V + R_s I}{a V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (\text{II.6})$$

$$V_T = \frac{N_s K T}{q} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$I$  : Courant fourni par la cellule.

$V$  : Tension aux bornes de la cellule.

$I_p$  : Le courant dérivé par la résistance parallèle.

$I_0$  : Saturation inverse ou courant de fuite de la diode.

$q$  : Charge électronique ( $1.60217646 \times 10^{-19} \text{ C}$ ).

$K$  : Constante de Boltzmaan ( $1.3806503 \times 10^{-23} \text{ J / K}$ ).

$T$  : Température de la jonction p-n ( en Kelvin ).

$V_{oc}$  : La tension de circuit ouvert.

$a$  : Constante d'idéalité de la diode.

$N_s$  : Nombre de cellules connectées en serie.

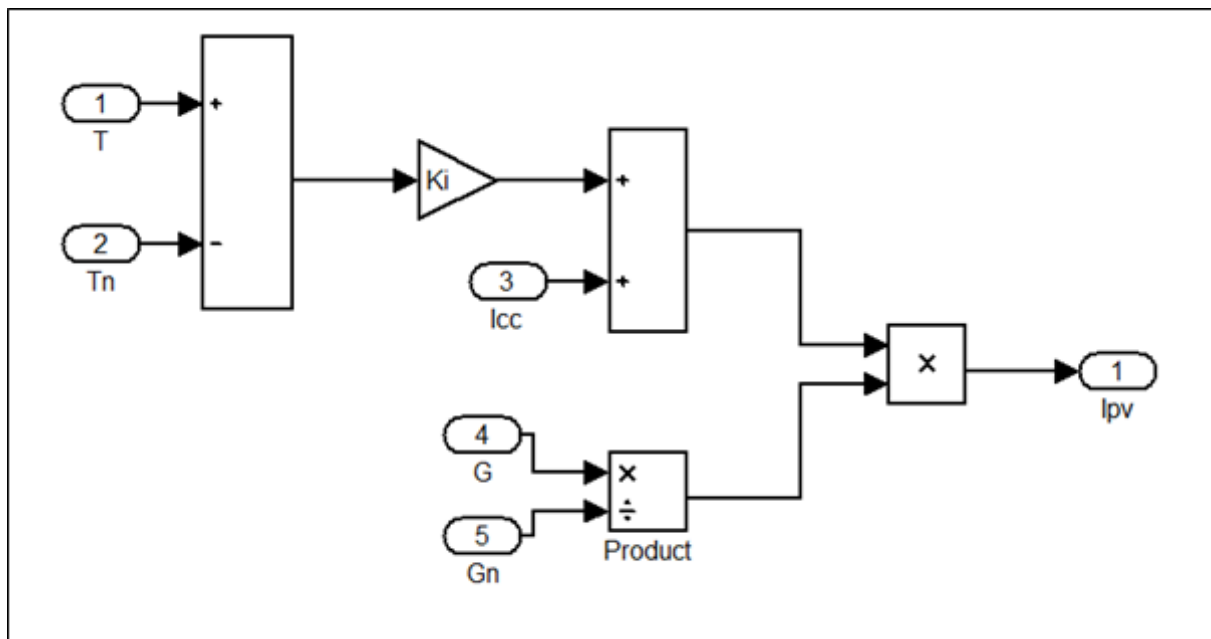
$R_s$  : Résistance en série.

$R_p$  : Résistance en parrallèle.

$K_v$  : Coefficient de variation de la tension en fonction de la température (V/K).

A partir des équations (II.2 - II.3 - II.5) on peut donner le schéma bloc de :  $I_{pv}$ ,  $I_d$  et  $I_0$

- **Le courant photovoltaïque  $I_{pv}$**



**Figure II.5** : Schéma bloc du courant  $I_{pv}$

- Le courant  $I_d$

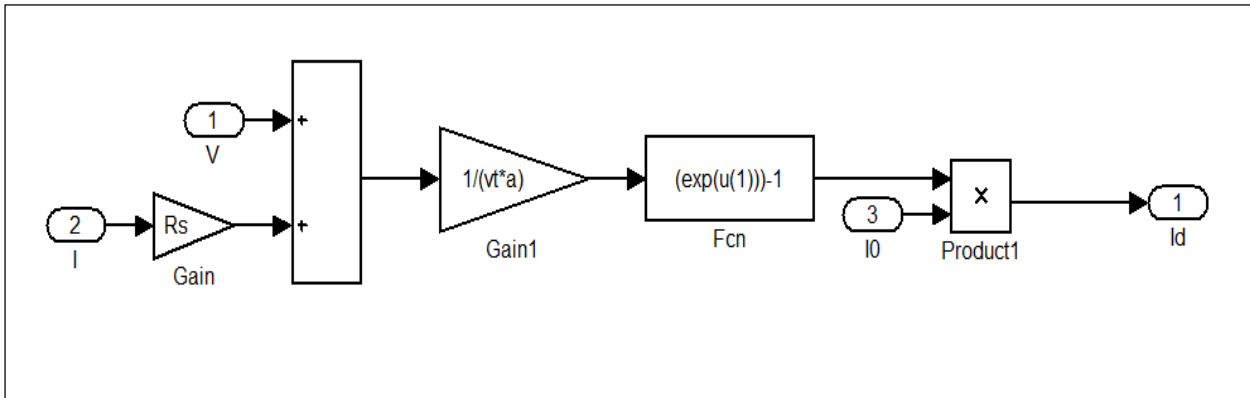


Figure II.6 : Schéma bloc du courant de la diode  $I_d$

- Le courant de saturation  $I_0$

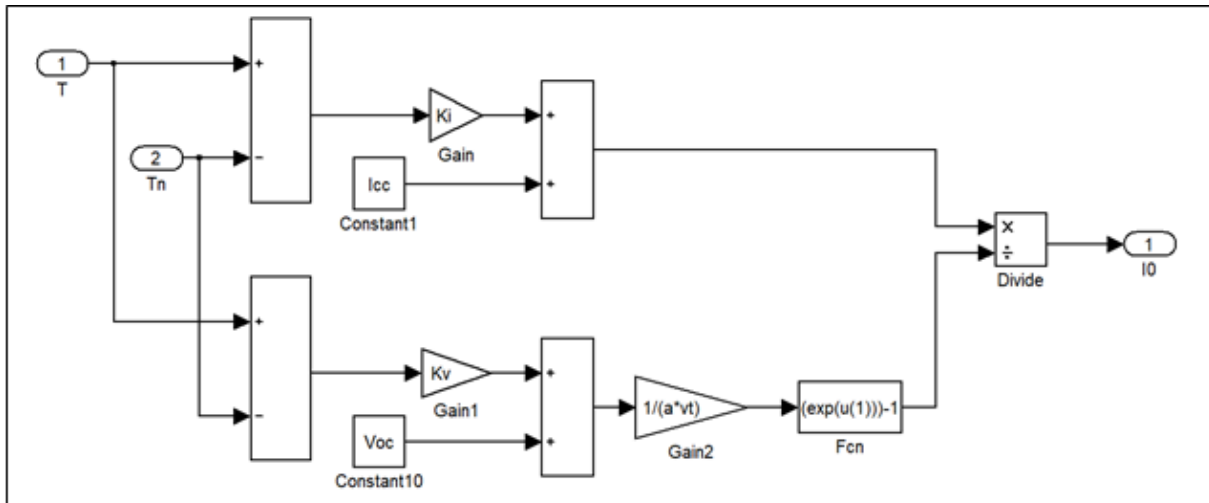
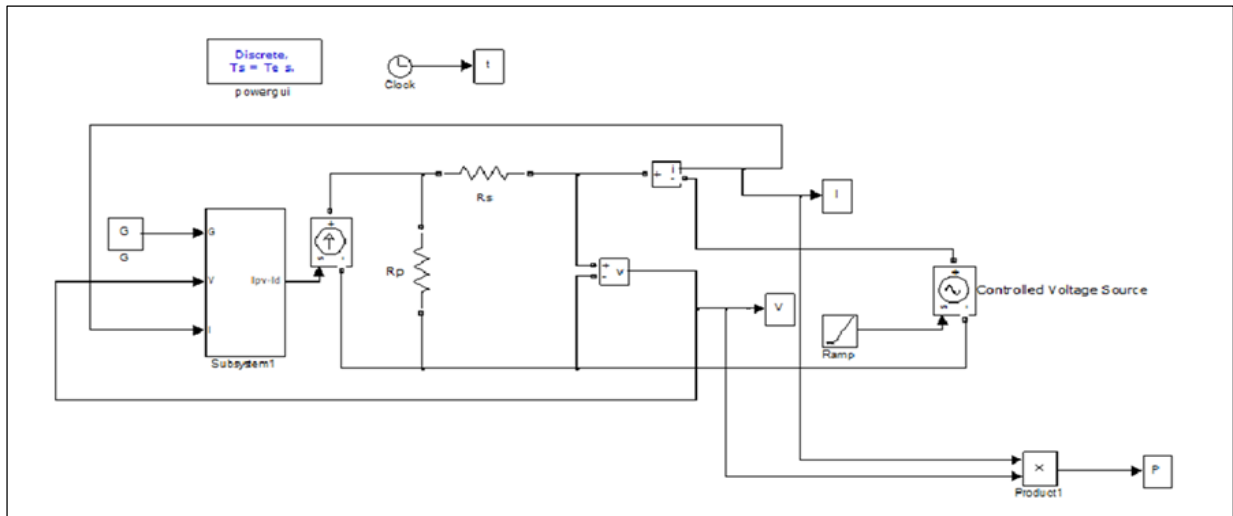


Figure II.7 : Schéma bloc du courant de saturation  $I_0$

Alors, on peut représenter le schéma électrique équivalent du module photovoltaïque par le schéma bloc suivant :



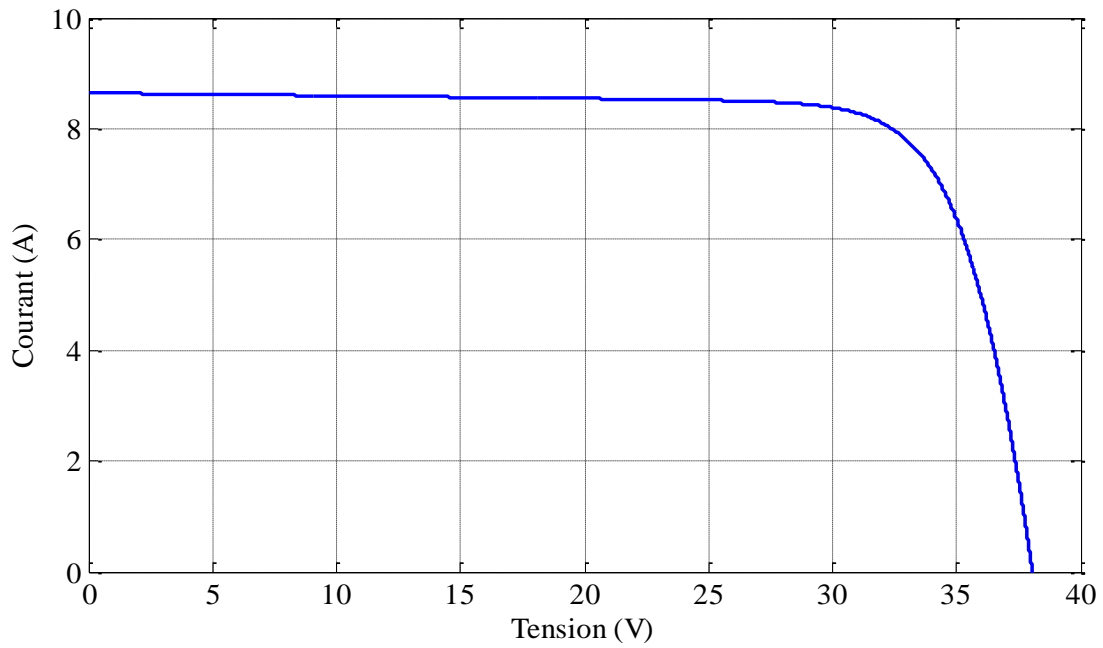
**Figure II.8 :** Schéma bloc du module photovoltaïque

## II.4.2 Caractéristiques I(V) et P(V)

### II.4.2.1 La caractéristique I(V)

La figure suivante représente les variations du courant produit par un module photovoltaïque en fonction de la tension à ses bornes pour une température nominale constante ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ) et un éclairement constant ( $G=1000\text{w}/\text{m}^2$ ).

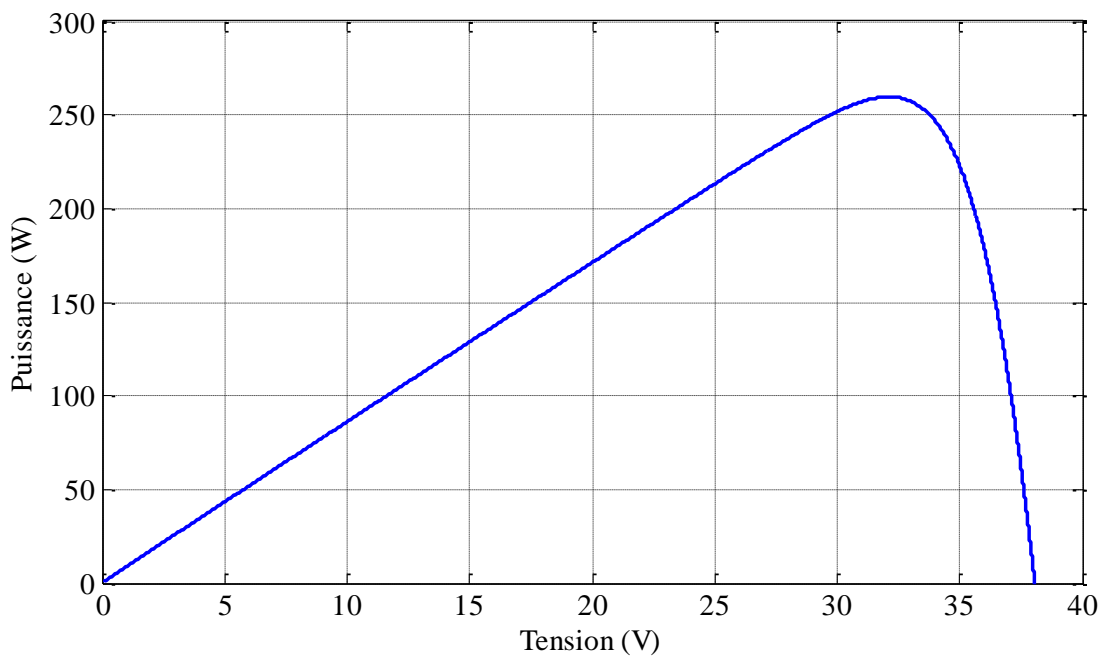
L'évolution du courant commence du courant de court-circuit qui correspond à une tension nulle jusqu'au circuit ouvert dont le courant est nul et la tension atteint sa valeur maximale.



**Figure II.9 :** Caractéristique I(V) du module photovoltaïque

#### II.4.2.2 La caractéristique P(V)

Comme la caractéristique précédente, on garde la même valeur de la température et de l'éclairement ( $T=25^{\circ}\text{C}$  et  $G=1000\text{w/m}^2$ ). La figure qui suit montre les variations de la puissance du module photovoltaïque en fonction de la tension à ses bornes qui prend des valeurs de 0 V jusqu'à la tension de circuit ouvert.



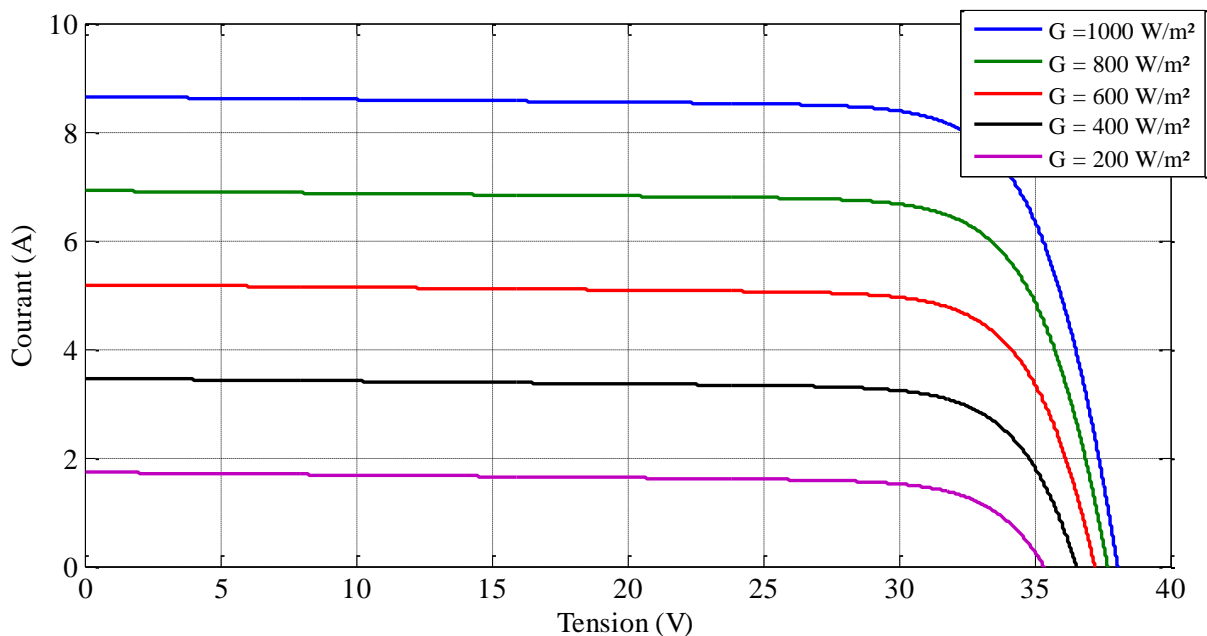
**Figure II.10 :** Caractéristique P(V) du module photovoltaïque

D'après la figure (II.10), on remarque que la puissance atteint une valeur maximale à une tension  $V_{mp}$  (c'est le point de la puissance maximale PPM) puis elle s'annule lorsque la tension atteint sa valeur maximale (tension de circuit ouvert  $V_{oc}$ ).

## II.5 Influence des conditions météorologiques sur le fonctionnement du module PV

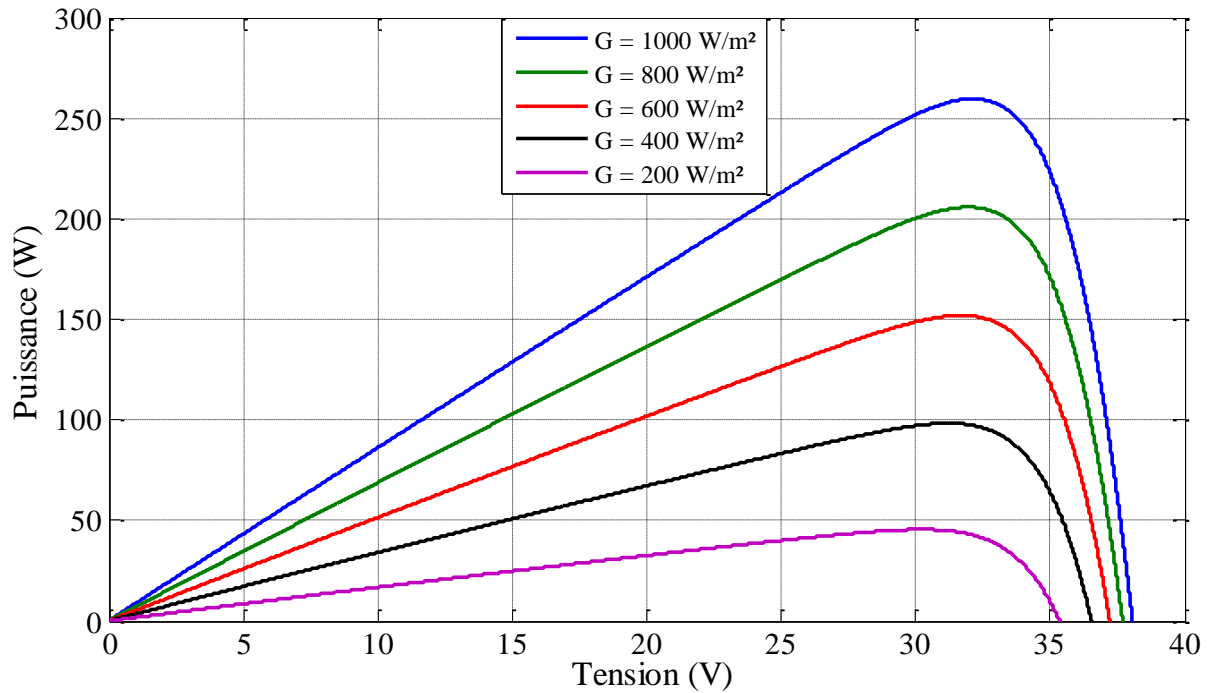
Les deux principaux paramètres qui influent sur le fonctionnement du générateur photovoltaïque sont : l'intensité de l'éclairement et la température. Pour visualiser l'effet de l'éclairement, on fixe la température ambiante à  $T = 25^\circ\text{C}$  puis, on varie l'intensité de l'irradiation  $G$ , et pour voir l'influence de la température, on fixe une valeur pour l'éclairement à  $G = 1000\text{W/m}^2$ , et on varie la température.

### II.5.1 Influence de l'éclairement sur le fonctionnement du module PV



**Figure II.11** : Caractéristique I(V) d'un module photovoltaïque à température constante (25°C) et à différents niveaux d'éclairement

La figure (II.11) montre que la valeur du courant de court-circuit du générateur photovoltaïque est directement proportionnelle à l'intensité de l'éclairement. D'autre part, la tension du circuit ouvert diminue légèrement. On remarque aussi que le courant  $I_{max}$  varie fortement avec l'éclairement contrairement à la tension  $V_{max}$  qui diminue très peu.

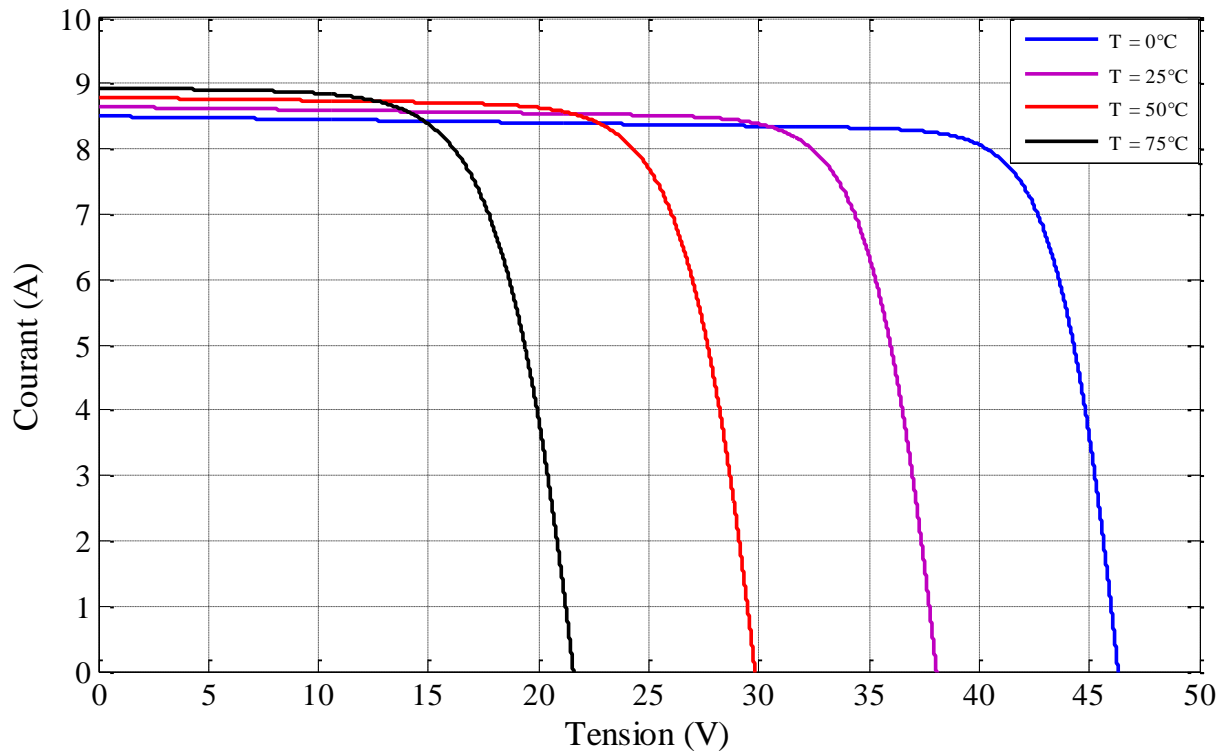


**Figure II.12** : Caractéristique P(V) d'un module photovoltaïque à température constante (25°C) et à différents niveaux d'éclairement

La figure (II.12) montre que la valeur de la puissance optimale est proportionnelle à l'intensité de rayonnement, ce qui permet d'augmenter le rendement du module photovoltaïque. Par contre, la tension de circuit ouvert baisse avec l'augmentation de l'éclairement et elle reste quasiment identique même à l'éclairement faible. Aussi, la valeur de la tension correspondante au point de la puissance maximale diminue très peu.

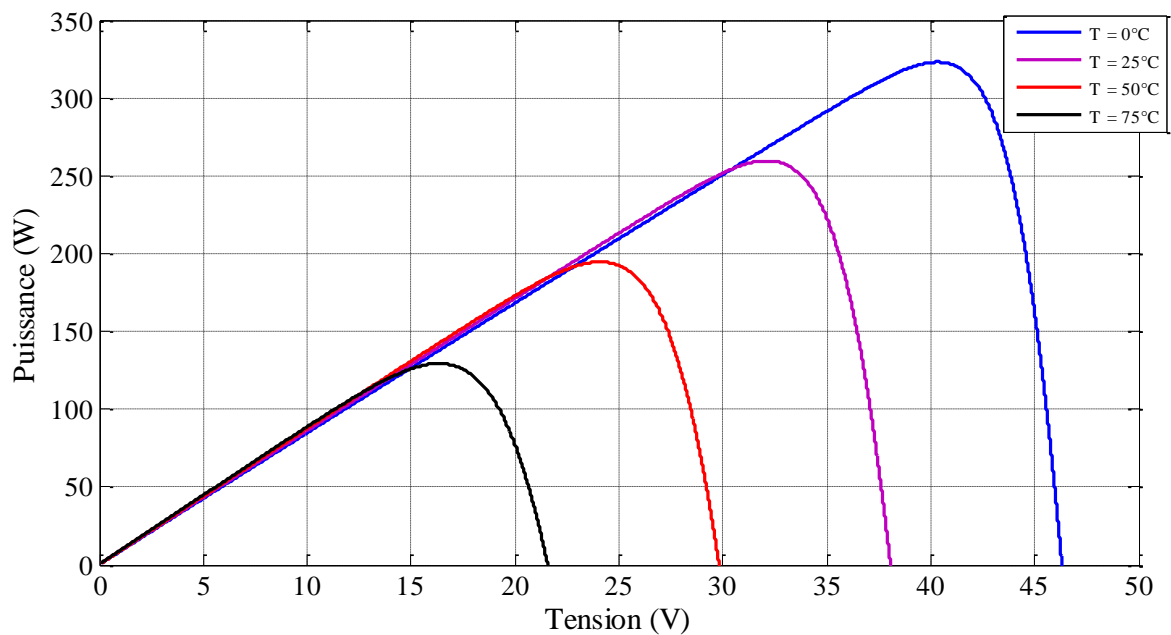
### II.5.2 Influence de la température sur le fonctionnement du module PV

Après avoir fait varier la température en fixant l'intensité de l'éclairement ( $G=1000\text{W/m}^2$ ), on obtient les deux figures suivantes qui représentent successivement la caractéristique courant-tension et la caractéristique puissance-tension.



**Figure II.13 :** Caractéristique I (V) d'un module photovoltaïque à éclairage constant ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) et à différents niveaux de températures

D'après la figure (II.13) on remarque que la tension de circuit ouvert est inversement proportionnelle avec la croissance de la température. Par contre le courant de court-circuit augmente avec l'augmentation de la température.



**Figure II.14 :** Caractéristique P (V) d'un module photovoltaïque à éclairage constant ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) et à différents niveaux de températures

La figure (II.14) montre que l'augmentation de la température cause une diminution de la valeur de la puissance optimale et donc le décroissement du rendement pour le module photovoltaïque.

On peut constater qu'il faut tenir compte de l'effet de la température lors du dimensionnement d'un générateur photovoltaïque pour améliorer sa performance et son rendement.

## **II.6 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté le modèle d'un module photovoltaïque sous MATLAB/SIMULINK qui est tiré à partir d'un schéma électrique équivalent.

Les résultats de la simulation ont montré que la caractéristique de la cellule photovoltaïque est directement liée à des conditions météorologiques en grande partie comme l'éclairement et la température.

En effet, la variation de l'éclairement et de la température modifie le point de puissance maximale ce qui réduit le rendement du générateur PV. Afin de faire fonctionner le GPV à son point de puissance optimal, il est nécessaire de le doter d'un contrôleur MPPT qui permet la poursuite du point de puissance maximale (PPM). La méthode MPPT fait l'objet du chapitre suivant.

# *Chapitre III*

## *Poursuite du point de puissance maximale (MPPT)*

### III.1 Introduction

Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. En effet la caractéristique  $I(V)$  du générateur dépend de l'éclairement solaire et de la température. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale.

A cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un ou plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de poursuivre le point de puissance maximale.

Ces commandes sont, connus sous le nom MPPT c-à-d poursuite du point à puissance maximale, associées à la commande du hacheur, lequel assure le couplage entre le générateur PV et le récepteur en forçant le premier à délivrer sa puissance maximale.

Les techniques MPPT sont utilisées dans les systèmes photovoltaïques pour maximiser la puissance délivrée par le panneau photovoltaïques en poursuivant continuellement le point de puissance maximale, ce qui n'est pas évident à atteindre ; En effet, ce problème de poursuite fait jusqu'à nos jours l'objet de plusieurs recherches. Aussi, plusieurs méthodes ont été élaborées et utilisées.

Dans ce chapitre, nous allons présenter la méthode « Incrémental conductance » pour le suivi du point de fonctionnement à puissance maximale qui est commandé par un hacheur boost pour un système PV.

### III.2 Commande MPPT

La méthode MPPT est une technique permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore avec les générateurs éoliens [20].

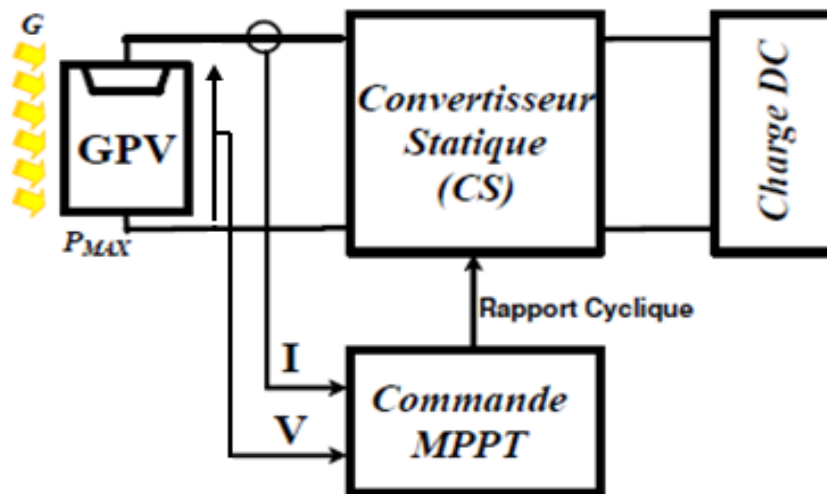
#### III.2.1 Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 date de publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie

renouvelable de type PV. Ces techniques se différencient entre eux par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application [20].

### III.2.2 Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT)

La chaîne de puissance d'un GPV où une charge DC est alimentée par un générateur à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT peut être représentée comme indiquée sur la figure (III.1). La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du CS de telle sorte que la puissance fournie par le GPV soit le  $P_{MAX}$  disponible à ses bornes. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le PPM, mais en général il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS jusqu'à se placer sur le PPM en fonction des évolutions des paramètres d'entrée du CS. [21].



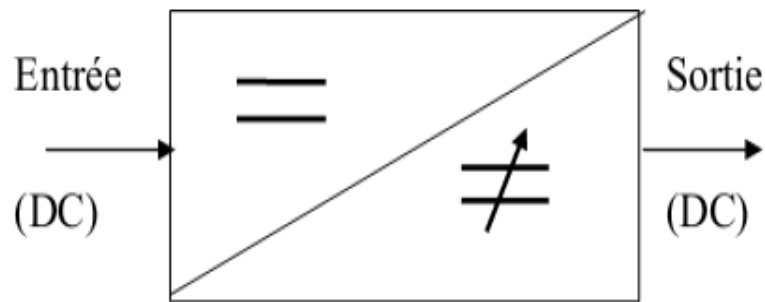
**Figure III.1 :** Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec CS contrôlé par une commande MPPT sur charge DC [21]

### III.3 Convertisseurs DC-DC (Hacheurs)

Les hacheurs présentent la partie essentielle dans le dispositif de commande d'un générateur photovoltaïque, ils sont des convertisseurs statiques continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

D'un point de vue circuit, le hacheur apparaît comme un quadripôle comme le montre la figure (III.1), jouant le rôle d'organe de liaison entre deux parties d'un réseau. On peut le considérer comme un transformateur de grandeurs électriques continues.

La figure (III.1) rappelle le schéma de principe d'un convertisseur DC-DC.

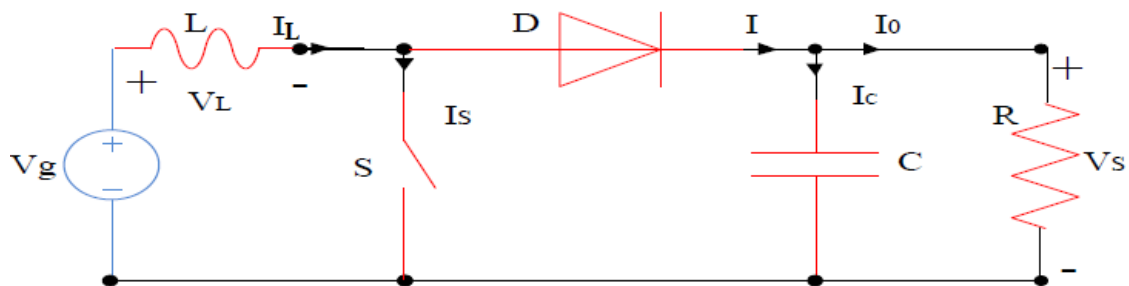


**Figure III.1** : Schéma de principe du hacheur [22]

Il existe plusieurs types des Hacheurs DC-DC (dévolteur, survolteur et mixte). Ils sont utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires avec les différentes charges [22].

### III.3.1 Hacheur survolteur (Boost)

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension. Le schéma de la figure (III.3) représente le circuit électrique du Boost. Au premier temps ( $\alpha T$ ), le transistor (S) est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période. Ensuite, le transistor (S) s'ouvre et l'inductance (L) s'opposant à la diminution de courant ( $I_L$ ), génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge (R) à travers la diode (D) [20].



**Figure III.3** :Circuit électrique de base du hacheur survolteur (Boost) [20]

### III.3.2 Modélisation du hacheur survolteur (Boost)

#### III.3.2.1 Modèle mathématique équivalent

L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donnent :

- Pour la première période  $0 < t < \alpha T$  :

S est fermé, la diode est polariser en inverse et le courant dans l'inductance croît progressivement (c'est une phase d'accumulation d'énergie sous forme magnétique).

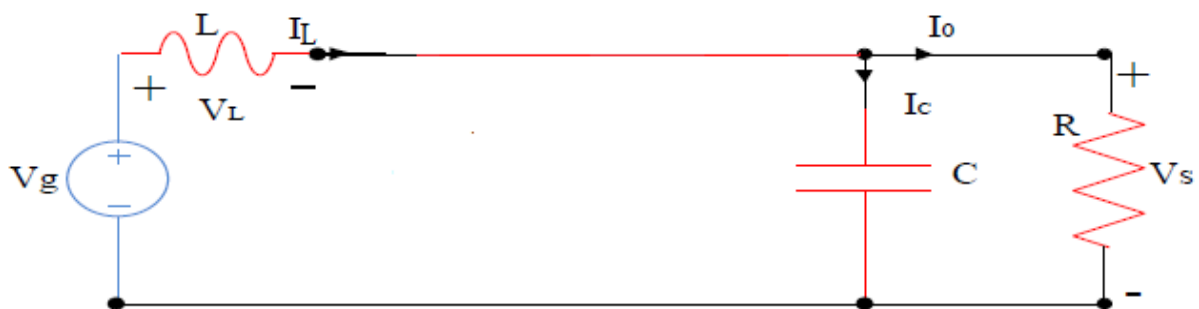


**Figure III.4 :** Circuit équivalent du hacheur parallèle quand S est fermé

$$\begin{cases} I_C = C \frac{dV_s}{dt} = -I_0 \\ V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_g \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

- Pour la deuxième période  $\alpha T < t < T$  :

S est ouvert, la diode est passante et l'inductance libère l'énergie emmagasinée lorsque S était fermé avec diminution du courant  $I_L$ .



**Figure III.5 :** Circuit équivalent du hacheur parallèle quand S est ouvert

$$\begin{cases} I_C = C \frac{dV_s}{dt} = I_L - I_0 \\ V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_g - V_s \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

### III.3.2.2 Modèle approximé du convertisseur Boost

Les systèmes d'équations de base (III.1) et (III.2) représentent le convertisseur Boost pour une période  $\alpha T$  et  $(1-\alpha) T$  respectivement. Le convertisseur oscille entre ces deux états avec une fréquence élevée, nous devons trouver une représentation dynamique approximée valable pour les deux intervalles de temps. Pour cela nous considérons que la variation des variables dynamiques  $I_L$ ,  $V_L$  est de forme linéaire, en d'autres termes nous pouvons faire une approche d'exponentielle par un segment ( $e^\varepsilon \approx 1 + \varepsilon$  si  $\varepsilon \ll 1$ ) et ainsi la dérivée de ces grandeurs sera constante.

Cette approche nous permet de décomposer l'expression de la valeur moyenne de la dérivée de la variable dynamique  $x$  sur les deux laps de temps  $\alpha T$  et  $(1-\alpha) T$ .

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle T = \frac{dx}{dt(\alpha T)} \alpha T + \frac{dx}{dt((1-\alpha)T)} (1-\alpha)T \quad (\text{III.3})$$

Où  $\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle$  est la valeur moyenne de la dérivée de  $x$  sur une période  $T$ . Cette relation est valide

si :

$\frac{dx}{dt(\alpha T)}$  et  $\frac{dx}{dt((1-\alpha)T)}$  sont constants sur les périodes  $\alpha T$  et  $(1-\alpha) T$  respectivement.

En appliquant la relation (III.3) sur les systèmes d'équations (III.1) et (III.2) on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

$$\begin{cases} I_C = C \frac{dV_s}{dt} \alpha T = -\alpha T I_0 + (1-\alpha)T (I_L - I_0) \\ V_L = L \frac{dI_L}{dt} \alpha T = V_g \alpha T + (1-\alpha)T (V_g - V_s) \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

En arrangeant les termes des équations précédentes, on obtient la modélisation dynamique du convertisseur Boost.

$$\begin{cases} I_0 = (1-\alpha)I_L - C \frac{dV_s}{dt} \\ V_g = (1-\alpha)V_s + L \frac{dI_L}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

### III.3.2.3 Etude en régime continu

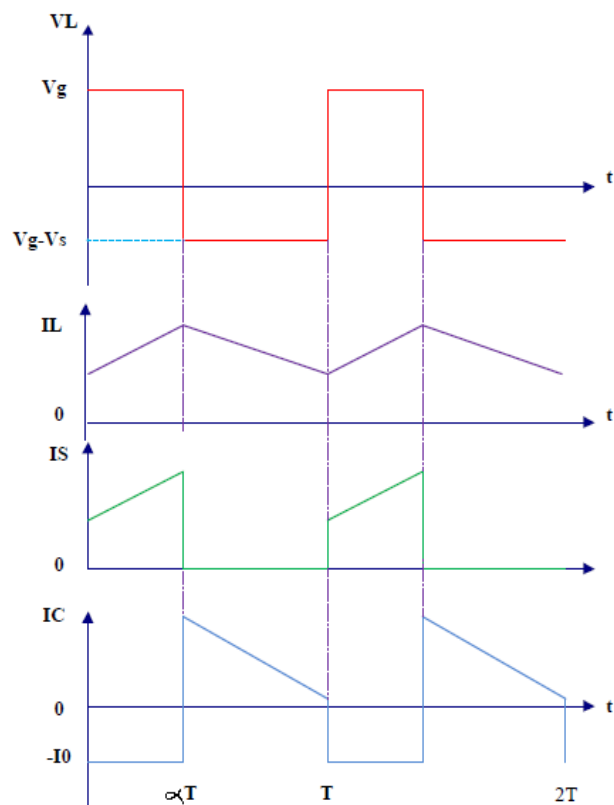
Le régime continu est obtenu en éliminant les dérivées des variables dynamiques, et en remplaçant ces signaux par leurs valeurs moyennes.

Le système d'équations (III.5) donne :

$$\begin{cases} I_0 = (1-\alpha)I_L \\ V_g = (1-\alpha)V_s \end{cases} \quad \text{(III.6)}$$

Comme le présente la figure (III.6), lorsque l'interrupteur du transistor (S) est sur la position (On), le courant de l'inductance du hacheur augmente linéairement et à cet instant la diode (D) est bloquée (Off).

Et lorsque (S) tourne sur la position (Off), l'énergie emmagasinée par l'inductance est dissipée dans le circuit (RC) bien que la diode (D) est passante. Les caractéristiques de tension et du courant de charge du convertisseur Boost dans le cas de la conduction continue sont décrites par la figure (III.6), comme suit :



**Figure III.6 :** Caractéristique de la tension et du courant du hacheur survolteur [20]

### III.3.2.4 Rapport de conversion

En utilisant les équations de l'étude en régime continu, le rapport de conversion est donné par :

$$M(\alpha) = \frac{V_s}{V_g} = \frac{1}{1-\alpha} \quad (\text{III.7})$$

## III.4 Classification des techniques MPPT

Diverses publications sur les commandes assurant un fonctionnement de type commande MPPT apparaissent régulièrement dans la littérature depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce genre, adaptée à une source d'énergie renouvelable de type photovoltaïque.

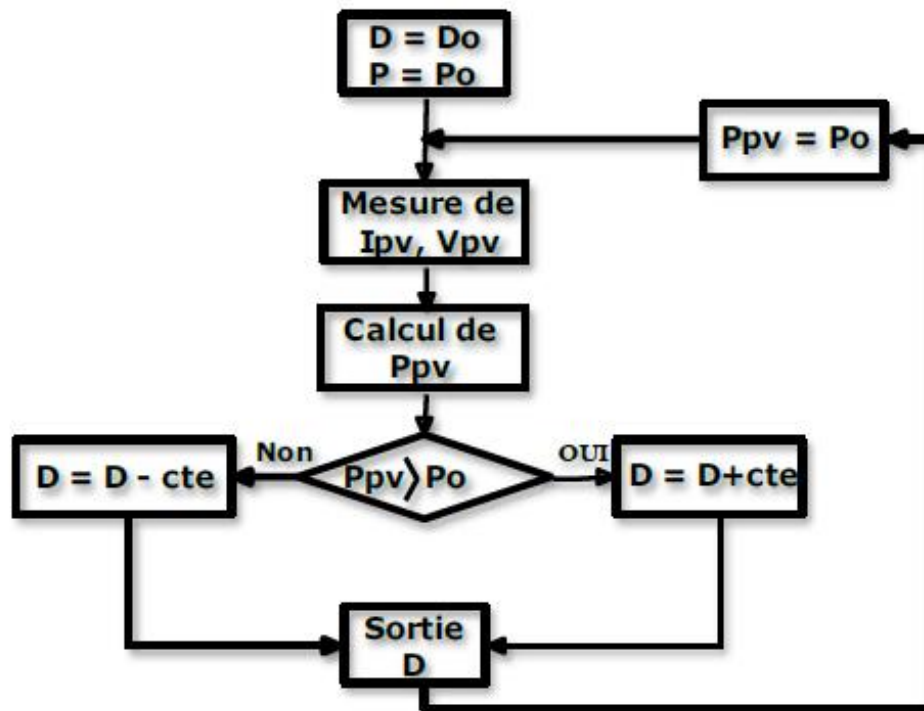
Etant donné le grand nombre de publications dans ce domaine, nous avons fait une classification des différentes MPPT existantes en les regroupant selon leur principe de base. La classification, en plus du principe, s'est effectuée selon des critères comme la précision de la recherche ou sa rapidité pour en faire une évaluation comparative [23].

### III.4.1 Premiers types de technique MPPT

L'algorithme mis en œuvre dans les premières commandes MPPT était relativement simple. En effet, les capacités des microcontrôleurs disponibles à l'époque étaient faibles et les applications, surtout destinées au spatial avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres appliquées initialement.

Pour un système photovoltaïque, son principe a d'abord été décrit par **A.F. Bohringer**. Cette commande est basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permettant de maintenir le système à son point de puissance maximum (PPM).

Ce dernier est décrit en figure (III.7) et peut être implanté entièrement en numérique



**Figure III.7 :** Principe de la première technique MPPT numérique [23]

Il consiste à calculer la puissance à l'instant  $t_n$  à partir des mesures de  $I_{pv}$  et  $V_{pv}$ , et de la comparer à celle stockée en mémoire, correspondant à l'instant  $t_{n-1}$  de là, un nouveau rapport cyclique  $D$  est calculé et est appliqué au convertisseur statique. Ce principe est toujours valable du point de vue théorique et appliqué de nos jours sur des algorithmes numériques plus performants.

Cependant, le temps de réaction a été amélioré ainsi que la précision de la recherche du PPM associée à un certain nombre de précautions pour ne pas perdre le PPM même temporairement [23].

### III.4.2 Techniques MPPT à algorithmes performants

Il y a plusieurs types de commande MPPT existantes en les regroupant selon leur principe de base. Les méthodes les plus couramment rencontrées sont communément appelées respectivement Hill Climbing, Perturb&Observ (P&O), l'incrément de Conductance (Inc-Cond) et par intelligence artificielle (logique floue, réseaux de neurones) [23].

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la méthode de l'incrément de conductance (Inc-Cond).

### III.4.3 Principe de la commande « Incrément de conductance » (Inc-Cond)

Cette technique est basée sur la connaissance de la variation de conductance du GPV et des conséquences sur la position du point de fonctionnement par rapport à un PPM. Ainsi, la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV comme indiqué ci-dessous.

$$G = \frac{I}{V} \quad (\text{III.8})$$

Donc une variation élémentaire (incrément) de conductance peut être définie par :

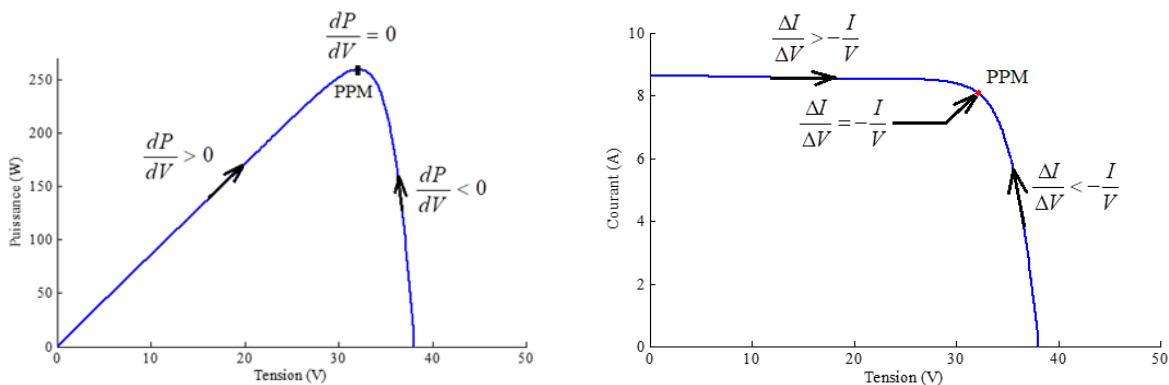
$$dG = \frac{dI}{dV} \quad (\text{III.9})$$

D'autre part, l'évolution de la puissance du GPV par rapport à la tension donne la position du point de fonctionnement par rapport au PPM. Lorsque la dérivée de puissance est nulle, cela signifie que l'on est sur le PPM, si elle est positive le point d'opération se trouve à gauche du maximum, lorsqu'elle est négative, on se situe à droite. La figure (III.8) permet d'écrire les conditions suivantes :

Si  $\frac{dP}{dV} > 0$ , le point de fonctionnement est à gauche du PPM

Si  $\frac{dP}{dV} < 0$ , le point de fonctionnement est à droite du PPM

Si  $\frac{dP}{dV} = 0$ , le point de fonctionnement est sur le PPM



**Figure III.8 :** Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe de la dérivée de la conductance  $G$  et de la puissance  $P$

Le lien entre la conductance donnée par l'équation (III.8) et la dérivée de la puissance  $\frac{dP}{dV}$  peut être décrit par l'équation suivante :

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \cong I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad \text{(III.10)}$$

D'où, on peut alors écrire de nouvelles conditions sur la variation de conductance.

Si  $\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}$  : Le point de fonctionnement est situé à gauche du PPM, donc on augmente la tension V jusqu'à atteindre le PPM et cela en diminuant le rapport cyclique  $\alpha$ .

Si  $\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}$  : Le point de fonctionnement est sur le PPM, donc la tension et le rapport cyclique  $\alpha$  restent constants.

Si  $\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}$  : Le point de fonctionnement est situé à droite du PPM, donc on diminue la tension V jusqu'à atteindre le PPM et cela en augmentant le rapport cyclique  $\alpha$ .

Le maximum de puissance peut être alors traqué en effectuant des comparaisons à chaque instant de la valeur de la conductance  $\left(\frac{I}{V}\right)$  avec celle de l'incrément de conductance  $\left(\frac{\Delta I}{\Delta V}\right)$ , comme l'illustre l'algorithme de la figure (III.9).

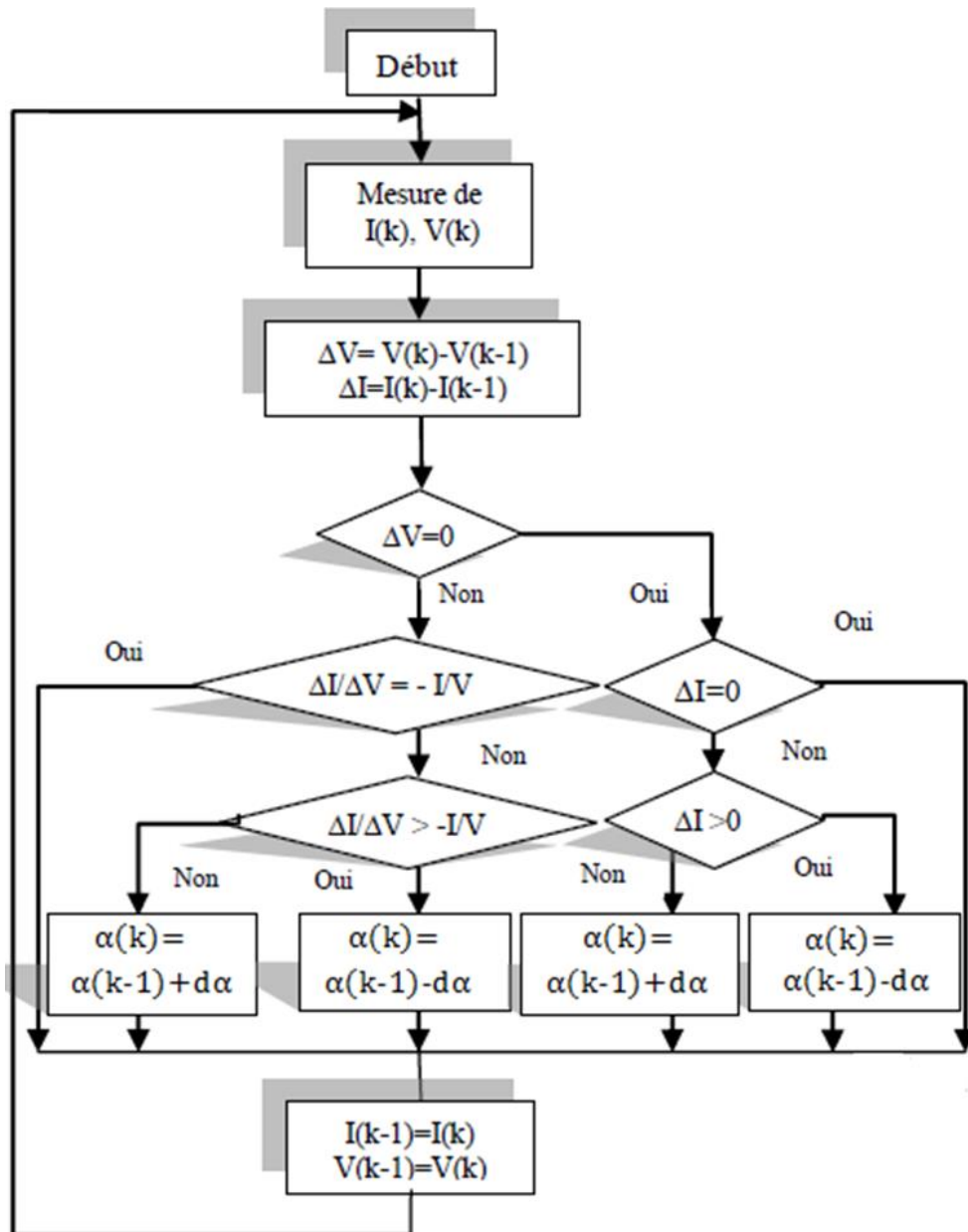


Figure III.9 : Organigramme de l'algorithme Inc-Cond [24]

$d\alpha$  : Pas d'incrément de l'algorithme Inc-Cond.

Le terme  $\left(\frac{I}{V}\right)$  est la conductance instantanée alors que  $\left(\frac{\Delta I}{\Delta V}\right)$  désigne la variation de cette conductance. Pour éviter que la différentielle de la tension du panneau  $\Delta V$  ne devienne nulle, lorsque le *PPM* est atteint dans les précédents cycles ou par une stabilisation du point de fonctionnement, ce qui va conduire à une division par zéro, l'algorithme fait un test de  $\Delta V$ .

Si  $\Delta V$  est nul il teste si le  $\Delta I = 0$ . Si c'est le cas alors le *PPM* est atteint et l'algorithme ne fait aucun changement, dans le cas contraire l'algorithme teste le signe de  $\Delta I$  pour

déterminer la position du *PPM* et ajuste le rapport cyclique  $\alpha$ . Si  $\Delta I > 0$  donc on décrémente le rapport cyclique  $\alpha$ , dans le cas contraire on incrémente ce dernier.

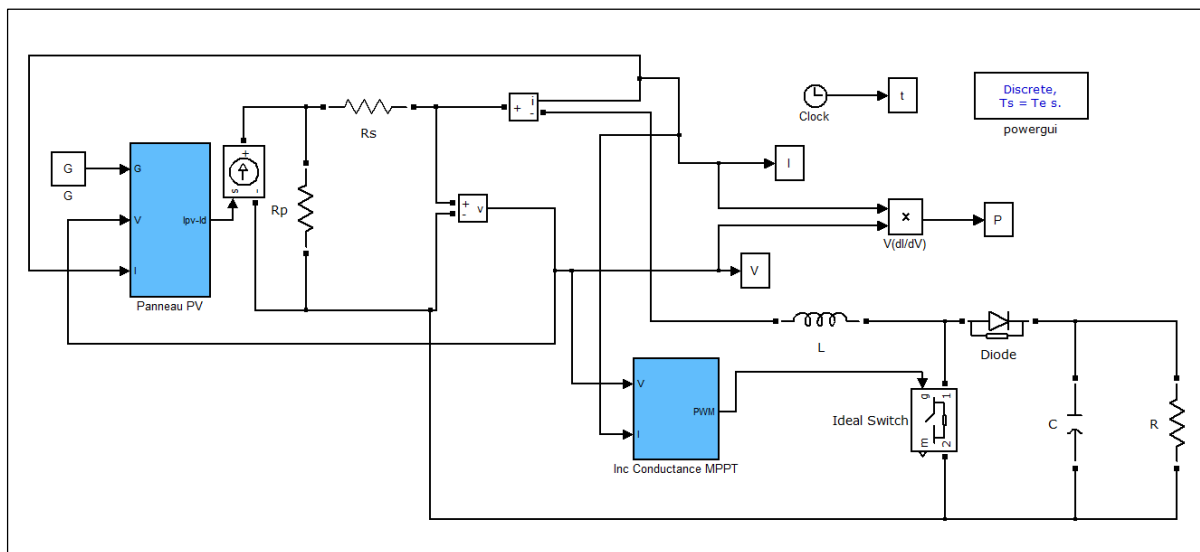
Si  $\Delta V$  est différent de zéro, il teste si  $\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}$ . Si c'est le cas alors le *PPM* est atteint et l'algorithme ne fait aucun changement, dans le cas contraire l'algorithme teste le signe de  $\frac{\Delta I}{\Delta V}$  pour déterminer la position du *PPM* et ajuste le rapport cyclique  $\alpha$ .

Si  $\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}$  donc on décrémente le rapport cyclique  $\alpha$ , dans le cas contraire on incrémente ce dernier.

### III.5 Elaboration de la méthode Inc-Cond sous MATLAB/SIMULINK

#### III.5.1 Modèle de simulation de la méthode Inc-Cond

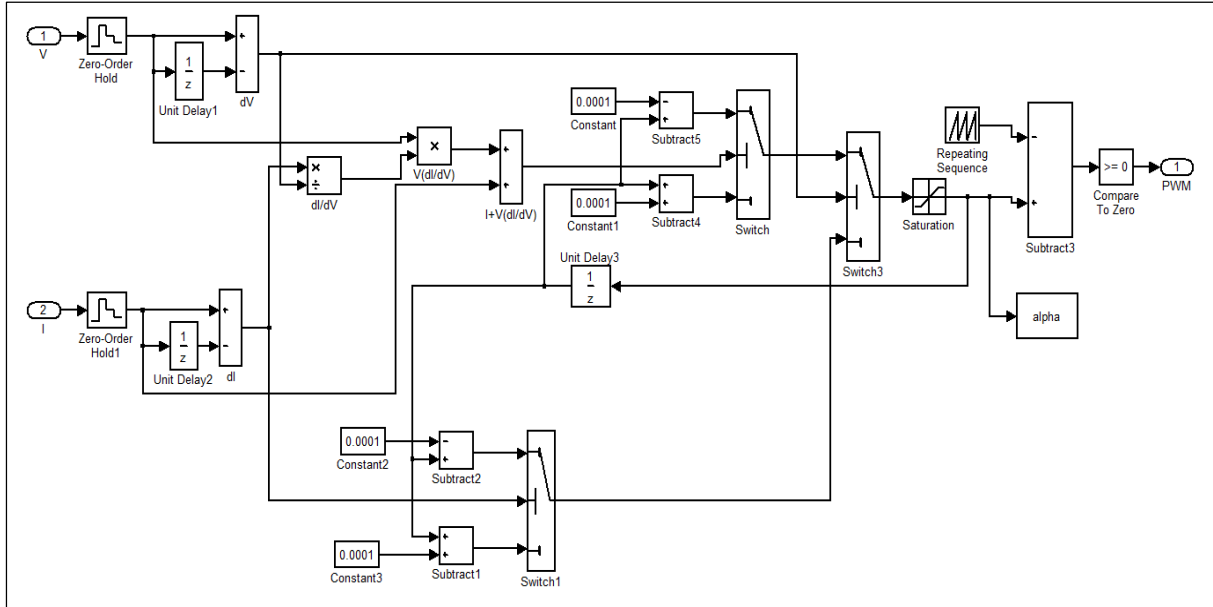
La figure ci-dessous, représente le schéma bloc d'une association PV avec un hacheur boost contrôlé par une commande MPPT (Inc-Cond).



**Figure III.10 :** Schéma bloc d'une association PV avec un hacheur boost contrôlé par une commande MPPT (Inc-Cond)

### III.5.2 Modèle de simulation de l'algorithme Inc-Cond

Le schéma de simulation de l'algorithme Inc-Cond sous Matlab/Simulink est donné par la figure suivante :



**Figure III.11 :** Schéma bloc de l'algorithme Inc-Cond

### III.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons élaboré le modèle du hacheur boost utilisé comme un étage d'adaptation entre le panneau PV et la charge.

En revanche, nous avons étudié en particulier et en détail la technique de l'incrémentale conductance commandée par un hacheur boost ainsi que sa simulation sous Matlab/Simulink.

Dans le prochain chapitre, nous allons donner les résultats de simulation de la méthode Inc-Cond.

# *Chapitre IV*

*Résultats de simulation de  
la méthode « incrémental  
conductance »*

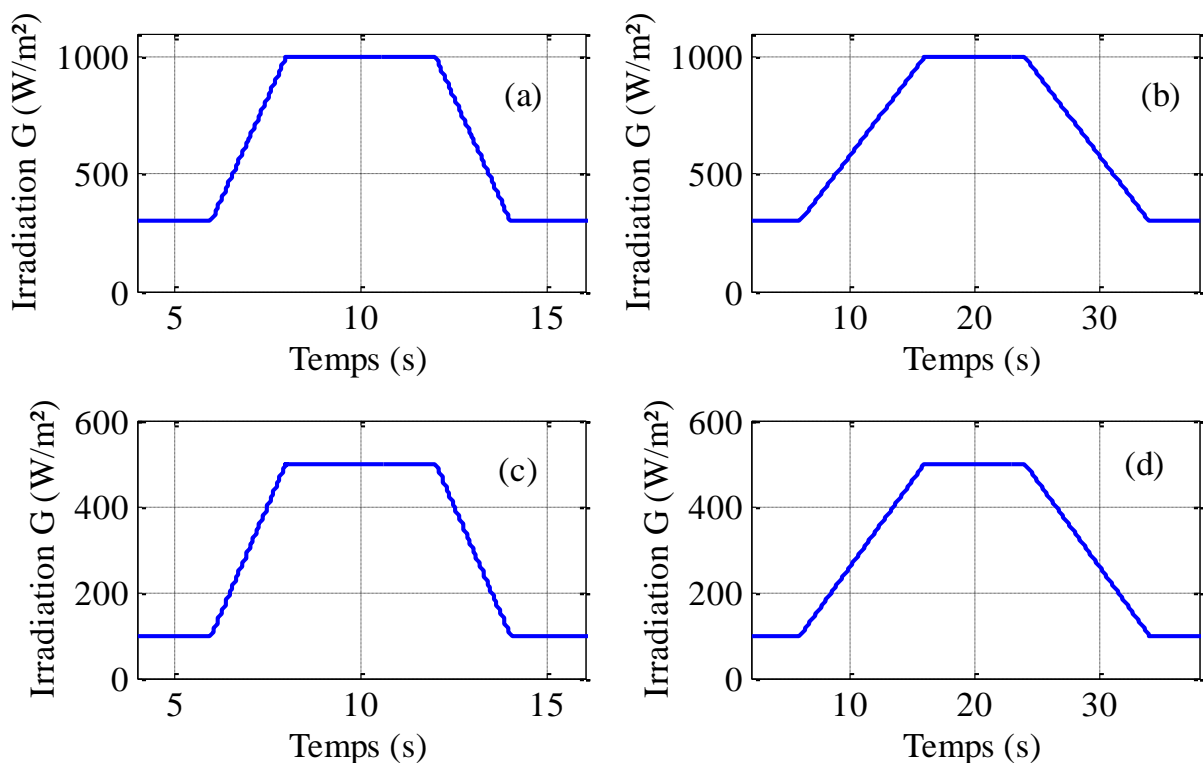
## IV.1 Introduction

La méthode de l'incrémental de conductance est une méthode qui permet de poursuivre le point de la puissance maximale dans une commande MPPT associée au générateur PV à l'aide d'un convertisseur élévateur (hacheur boost). Cette technique permet de produire la puissance maximale en permanence pour améliorer le rendement du générateur photovoltaïque.

Après avoir fait la modélisation et la simulation de l'algorithme Inc-Cond dans le chapitre précédent, nous allons voir les résultats de cette simulation avec les différents profils de l'éclairement (haut et rapide, haut et lent, bas et rapide et bas et lent), et avec la variation instantanée de la température ainsi que le changement du pas d'incrémental. Ces résultats doivent être identiques avec ceux que nous avons trouvés dans les chapitres précédents pour confirmer la performance de notre simulation.

## IV.2 Différents profils de l'éclairement

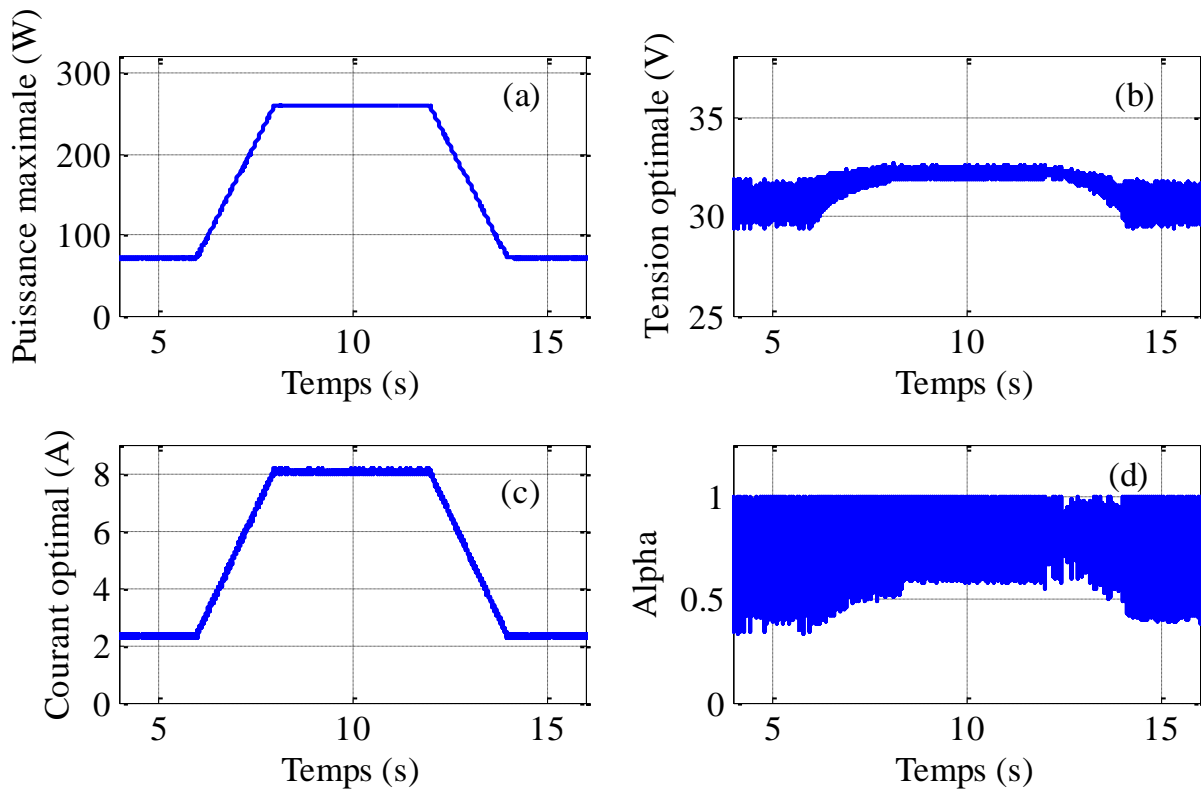
La figure (IV.1) représente la variation de l'irradiation  $G$  en fonction du temps pour différents profils.



**Figure IV.1 :** Différents profils de l'irradiation : a) Profil haut et rapide, b) Profil haut et lent, c) Profil bas et rapide, d) Profil bas et lent en fonction du temps

### IV.2.1 Profil haut et rapide

Dans ce cas, on varie l'éclairement dans cinq périodes en fixant la température à 25°C. La première période [0s,6s] l'éclairement égal à 300W/m<sup>2</sup>, la deuxième période [6s,8s], il varie linéairement de 300W/m<sup>2</sup> à 1000W/m<sup>2</sup> et il reste stable à cette dernière valeur pendant la troisième période [8s,12s], pour la quatrième période [12s,14s], l'ensoleillement décroît linéairement de 1000W/m<sup>2</sup> à 300W/m<sup>2</sup> et reste fixé à cette dernière valeur pendant la cinquième période [14s,18s].



**Figure IV.2 :** Variation : a) Puissance maximale, b) Tension optimale, c) Courant optimal, d) Rapport cyclique alpha pour le profil haut et rapide en fonction du temps

A  $G=300\text{W/m}^2$ , on a les résultats suivants :

- Puissance maximale : 71.65W
- Tension optimale : 30.7V
- Courant optimal : 2.33A

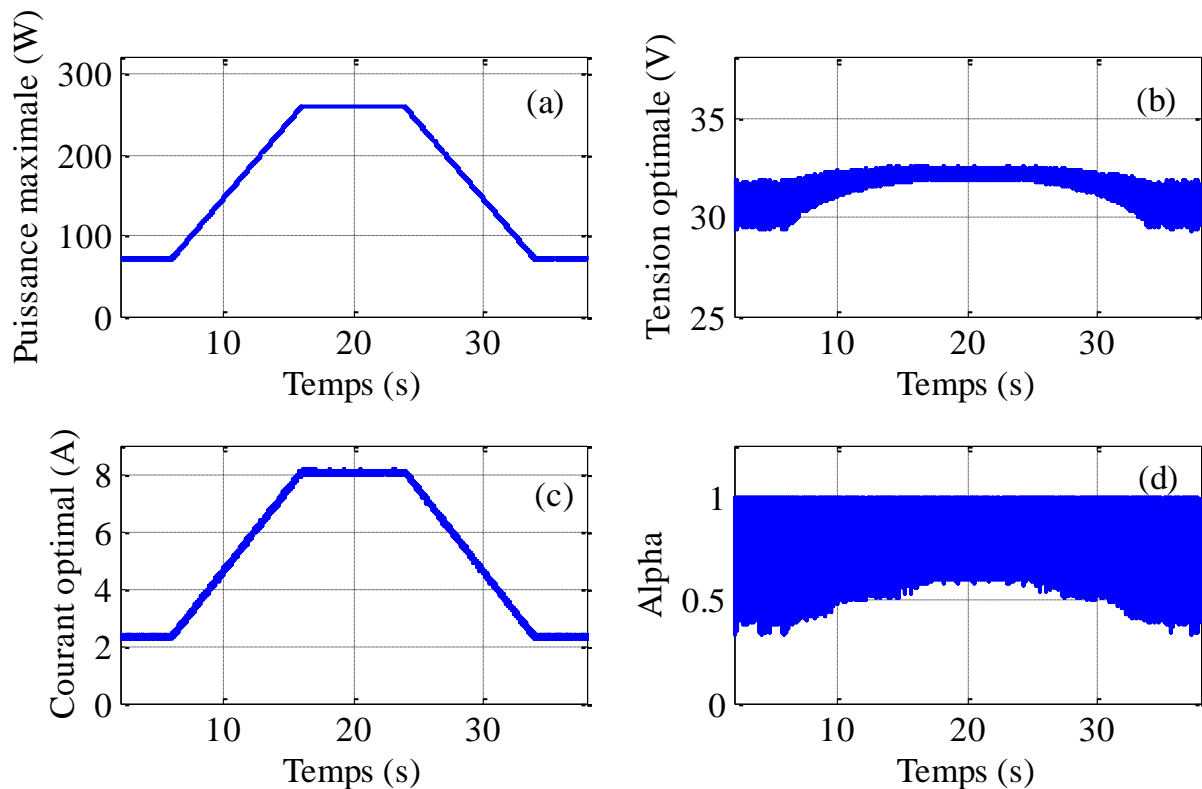
A  $G=1000\text{W/m}^2$ , on a les résultats suivants :

- Puissance maximale : 259.6W
- Tension optimale : 32.15V
- Courant optimal : 8.07A

On remarque dans cette figure que la variation de la puissance maximale et le courant optimale en fonction du temps sont pratiquement proportionnels avec l'évolution instantanée de l'éclairement, tandis que la tension optimale et le rapport cyclique varie très peu (on peut les considérés constants), ce qui confirme les résultats obtenus dans le deuxième chapitre.

#### IV.2.2 Profil haut et lent

Comme le cas précédent, l'ensoleillement varie sur cinq périodes pour la même valeur de la température. La première [0s,6s] l'ensoleillement est fixé à 300W/m, dans la deuxième [6s,16s], il croit linéairement de 300W/m<sup>2</sup> à 1000W/m<sup>2</sup>, la troisième période [16s,24s], l'ensoleillement se stabilise à 1000W/m<sup>2</sup>, pour la quatrième période [24s,34s], il varie linéairement de 1000W/m<sup>2</sup> à 300W/m<sup>2</sup>, puis dans la cinquième période [34s,40s], l'éclairement est fixé à 300W/m<sup>2</sup>.



**Figure IV.3 :** Variation : a) Puissance maximale, b) Tension optimale, c) Courant optimal, d) Rapport cyclique alpha pour le profil haut et lent en fonction du temps

A  $G=300\text{W/m}^2$ , on a les résultats suivants :

- Puissance maximale : 71.3W
- Tension optimale : 30.8V
- Courant optimal : 2.33A

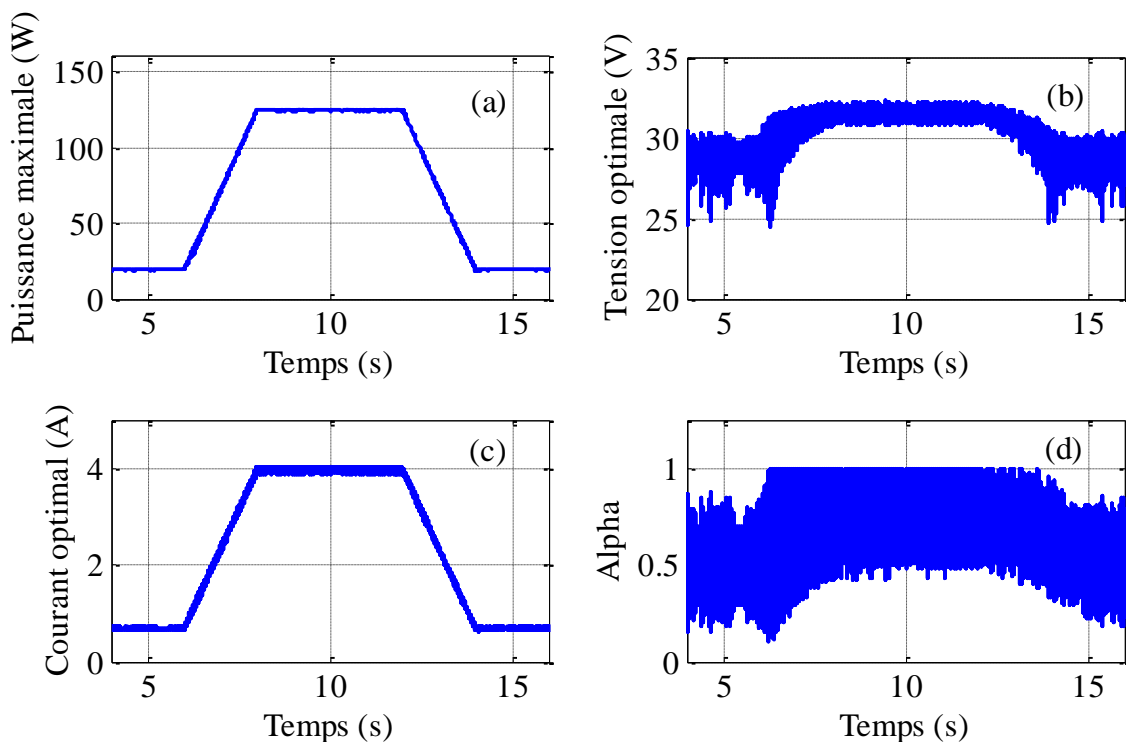
A  $G=1000\text{W/m}^2$ , on a les résultats suivants :

- Puissance maximale : 259.58W
- Tension optimale : 32.14V
- Courant optimal : 8.07A

La figure (IV.3) montre que la puissance maximale instantanée suit les mêmes proportions avec la variation de l'ensoleillement en fonction du temps aussi que le courant optimale. La tension optimale et le rapport cyclique restent quasiment constants (il y a une petite variation mais elle est négligeable).

### IV.2.3 Profil bas et rapide

Dans ce cas, on varie l'éclairement sur cinq périodes en fixant la température à  $25^\circ\text{C}$ . La première période [0s,6s] l'éclairement est égal à  $100\text{W/m}^2$ , la deuxième période [6s,8s], il varie linéairement de  $100\text{W/m}^2$  à  $500\text{W/m}^2$  et il reste stable à cette dernière valeur pendant la troisième période [8s,12s], dans la quatrième période [12,14], l'ensoleillement décroît linéairement de  $500\text{W/m}^2$  à  $100\text{W/m}^2$  et dans la cinquième période [14s,18s] l'éclairement est fixé à  $100\text{W/m}^2$ .



**Figure IV.4 :** Variation : a) Puissance maximale, b) Tension optimale, c) Courant optimal, d) Rapport cyclique alpha pour le profil bas et rapide en fonction du temps

A  $G=100\text{W/m}^2$ , on a les résultats suivants :

- Puissance maximale : 19.93W
- Tension optimale : 28.9V
- Courant optimal : 0.69A

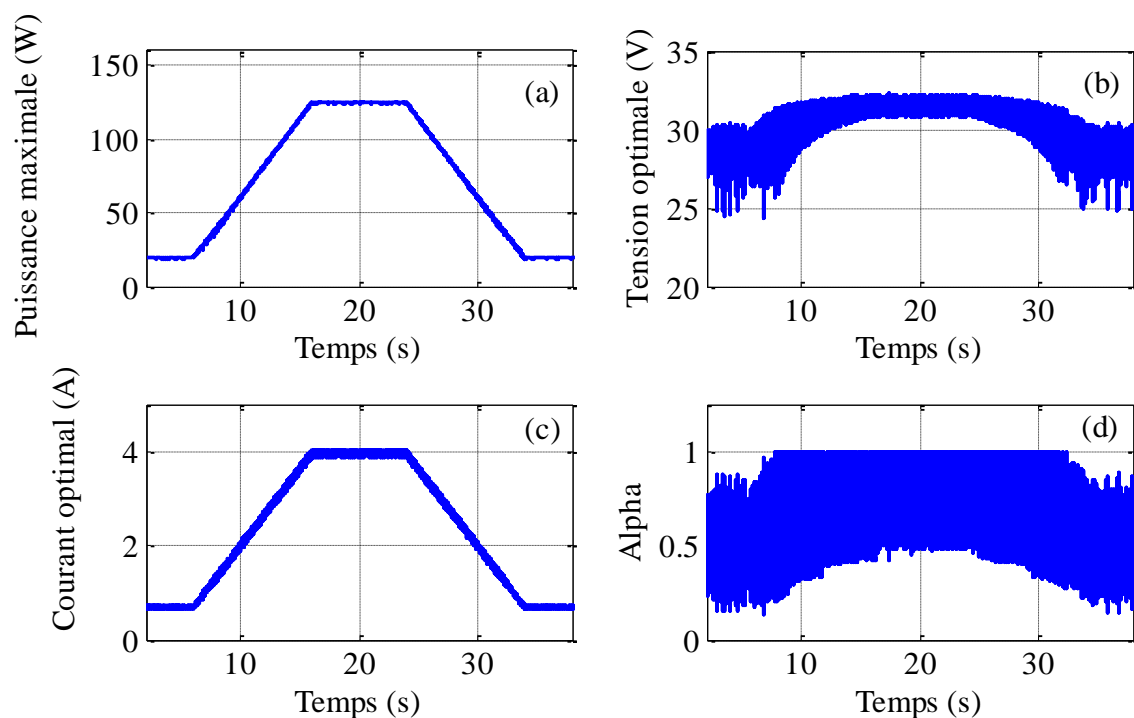
A  $G=500\text{W/m}^2$ , on a les résultats suivants :

- Puissance maximale : 124.97W
- Tension optimale : 31.48V
- Courant optimal : 3.96A

On remarque dans cette figure que la variation de la puissance maximale et le courant optimal en fonction de temps sont proportionnels avec l'évolution instantanée de l'éclairement. D'autre part, la tension optimale et le rapport cyclique varie très peu (on peut les considérés constants).

#### IV.2.4 Profil bas et lent

Aussi dans ce profil, on varie l'éclairement dans cinq périodes à une température fixée à  $25^\circ\text{C}$ . La première [0s,6s] l'ensoleillement est fixé à  $500\text{W/m}^2$ , dans la deuxième [6s,16s], il croit linéairement de  $500\text{W/m}^2$  à  $1000\text{W/m}^2$ , la troisième période [16s,24s], l'ensoleillement se stabilise à  $1000\text{W/m}^2$ , dans la quatrième période [24s,34s], il varie linéairement de  $1000\text{W/m}^2$  à  $500\text{W/m}^2$ , puis dans la cinquième période [34s,40s], l'éclairement est fixé à  $500\text{W/m}^2$ .



**Figure IV.5 :** Variation : a) Puissance maximale, b) Tension optimale, c) Courant optimal, d) Rapport cyclique alpha pour le profil bas et lent en fonction du temps

A  $G=100\text{W/m}^2$ , on a les résultats suivants :

- Puissance maximale : 19.85W
- Tension optimale : 28.8V
- Courant optimal : 0.69A

A  $G=500\text{W/m}^2$ , on a les résultats suivants :

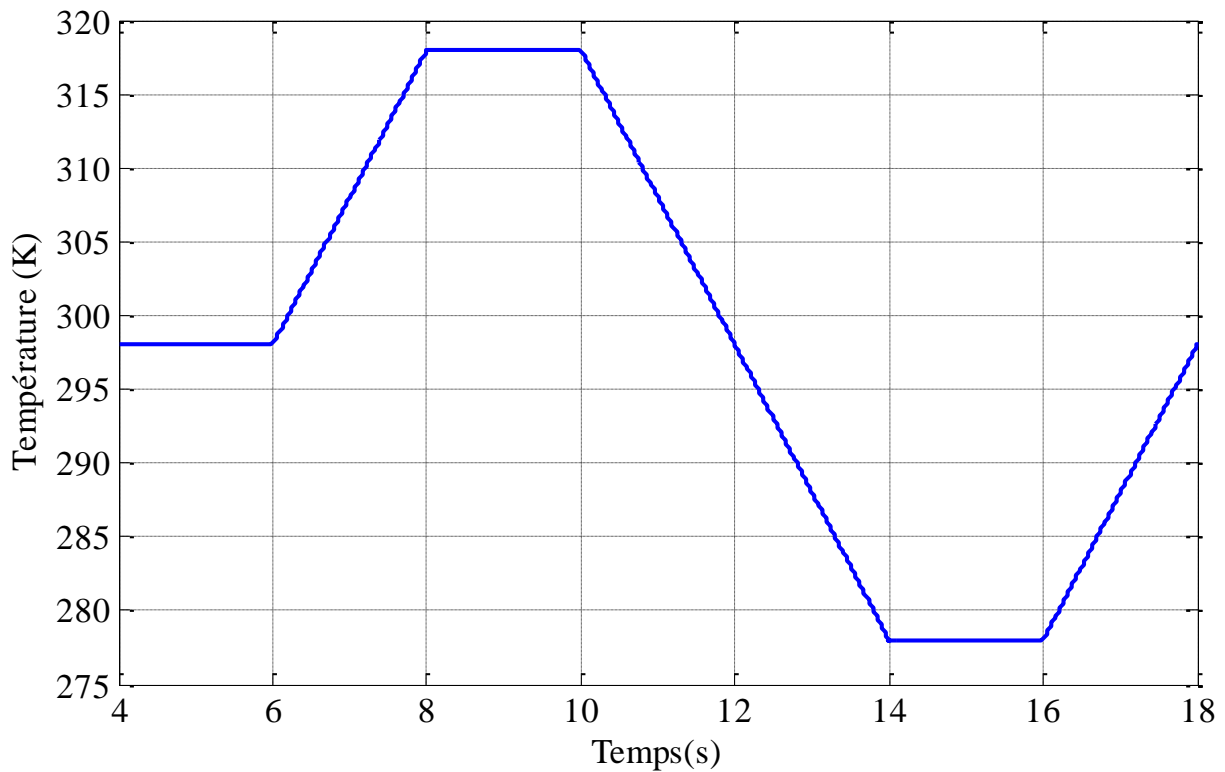
- Puissance maximale : 124.98W
- Tension optimale : 31.49V
- Courant optimal : 3.97A

La figure (IV.5) montre que la puissance maximale instantanée suit les mêmes proportions avec la variation de l'ensoleillement en fonction de temps aussi que le courant optimale, tandis que la tension optimale et le rapport cyclique restent quasiment constante (il y a une petite variation mais elle est négligeable). Ceci est identique aux résultats trouvés dans le chapitre II.

### IV.3 Variation de la température

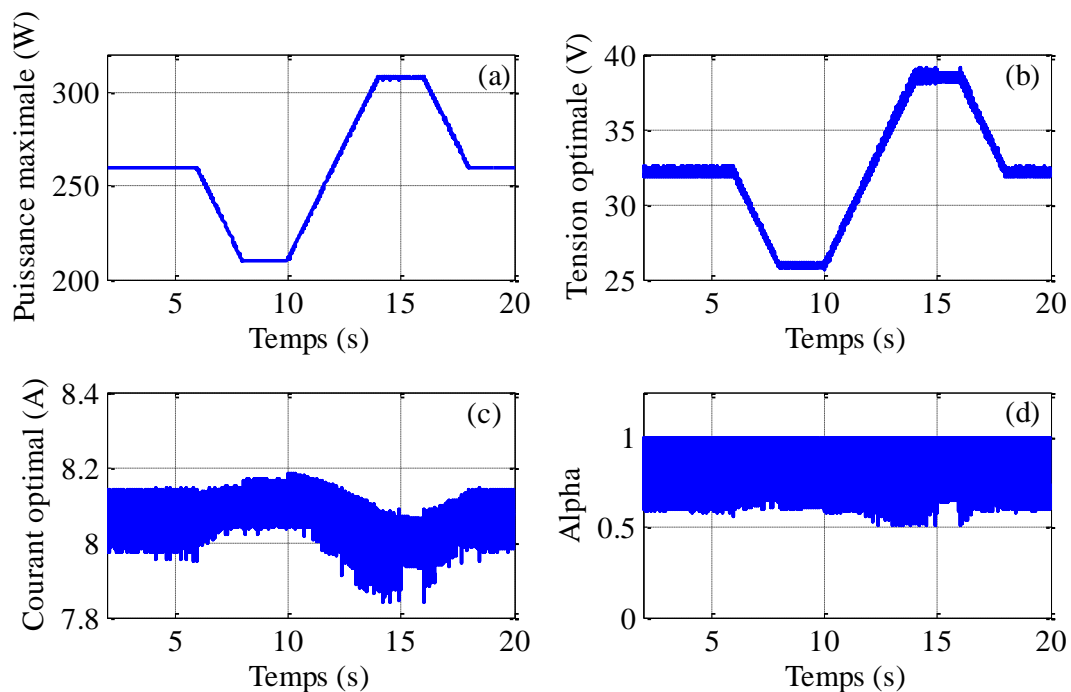
Dans ce cas, on fixe la valeur de l'éclairement à  $1000\text{W/m}^2$  et on fait varier la température selon les périodes suivantes :

La première période [0s,6s] la température reste constante à  $25^\circ\text{C}$  (298K), la deuxième période [6s,8s] la température croit linéairement de  $25^\circ\text{C}$  à  $45^\circ\text{C}$  (318K), dans la troisième période [8s,10s], elle reste constante à  $45^\circ\text{C}$ , pour la quatrième [10s,14s], la température chute d'une façon linéaire de  $45^\circ\text{C}$  à  $5^\circ\text{C}$  (278K), dans la cinquième période [14s,16s] elle est fixée à  $5^\circ\text{C}$ , puis dans la sixième période [16s,18s] , la température augmente linéairement de  $5^\circ\text{C}$  jusqu'à  $25^\circ\text{C}$ .



**Figure IV.6 :** Variation de la température en fonction du temps

La figure (IV.7) montre l'évolution de la puissance maximale, tension et courant optimal et le rapport cyclique alpha en fonction du temps pour différentes variations de la température.



**Figure IV.7 :** Variation : a) Puissance maximale, b) Tension optimale, c) Courant optimal, d) Rapport cyclique alpha en fonction du temps

A  $T=25^{\circ}\text{C}$ , on obtient les résultats suivants :

- Puissance maximale : 259.6W
- Tension optimale : 32.15V
- Courant optimal : 8.07A

A  $T=45^{\circ}\text{C}$ , on a les résultats suivants :

- Puissance maximale : 210.13W
- Tension optimale : 25.9V
- Courant optimal : 8.11A

A  $T=5^{\circ}\text{C}$ , les résultats sont comme suit :

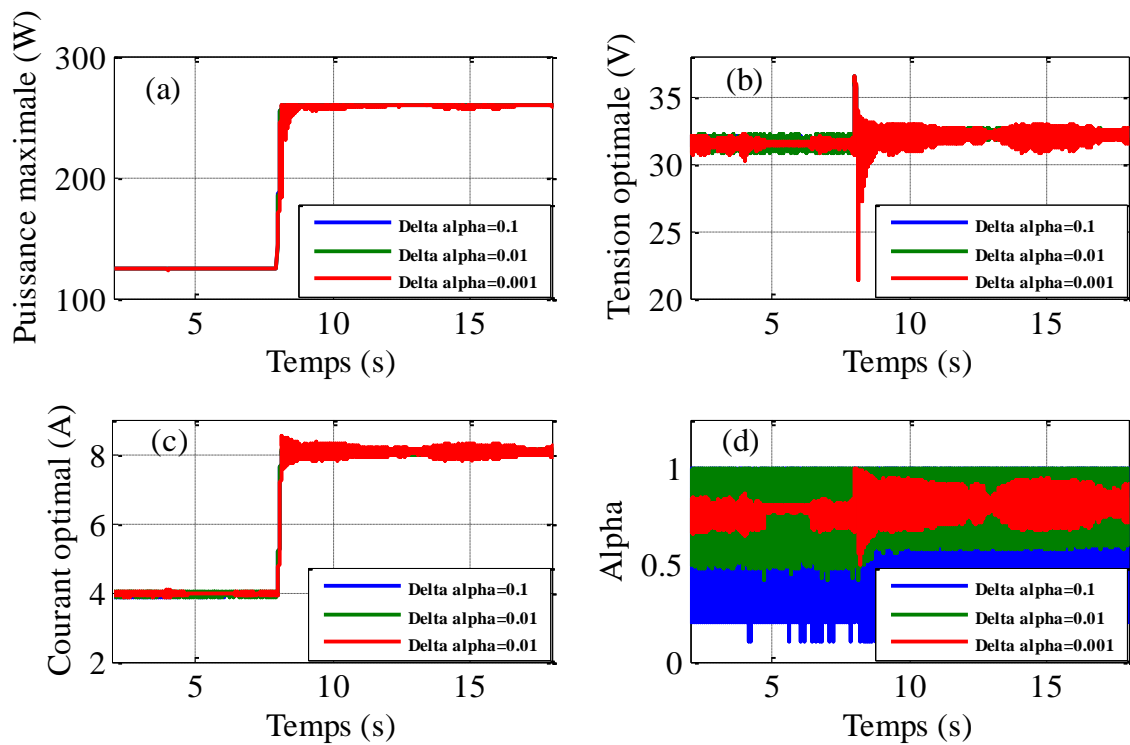
- Puissance maximale : 307.7W
- Tension optimale : 38.41V
- Courant optimal : 8.01A

D'après la figure(IV.7), on constate que la variation de la puissance maximale et la tension optimale en fonction de temps sont inversement proportionnelles avec l'évolution instantanée de la température. Le courant optimal reste quasiment constant. Ceci confirme les résultats obtenus dans le chapitre II sur l'étude de l'influence de la température sur la caractéristique « puissance-tension » et la caractéristique « courant-tension ».

#### **IV.4 Influence du pas d'incrémental**

Dans ce cas, on fixe la température à  $T=25^{\circ}\text{C}$  et l'irradiation varie sur deux périodes, de  $[0\text{s},8\text{s}]$  pour  $G=500\text{W}/\text{m}^2$  et de  $[8\text{s},18\text{s}]$  pour  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$  pour différents pas d'incrémental.

La figure (IV.8) montre l'évolution de la puissance maximale, tension et courant optimal ainsi que le rapport cyclique alpha en fonction du temps.

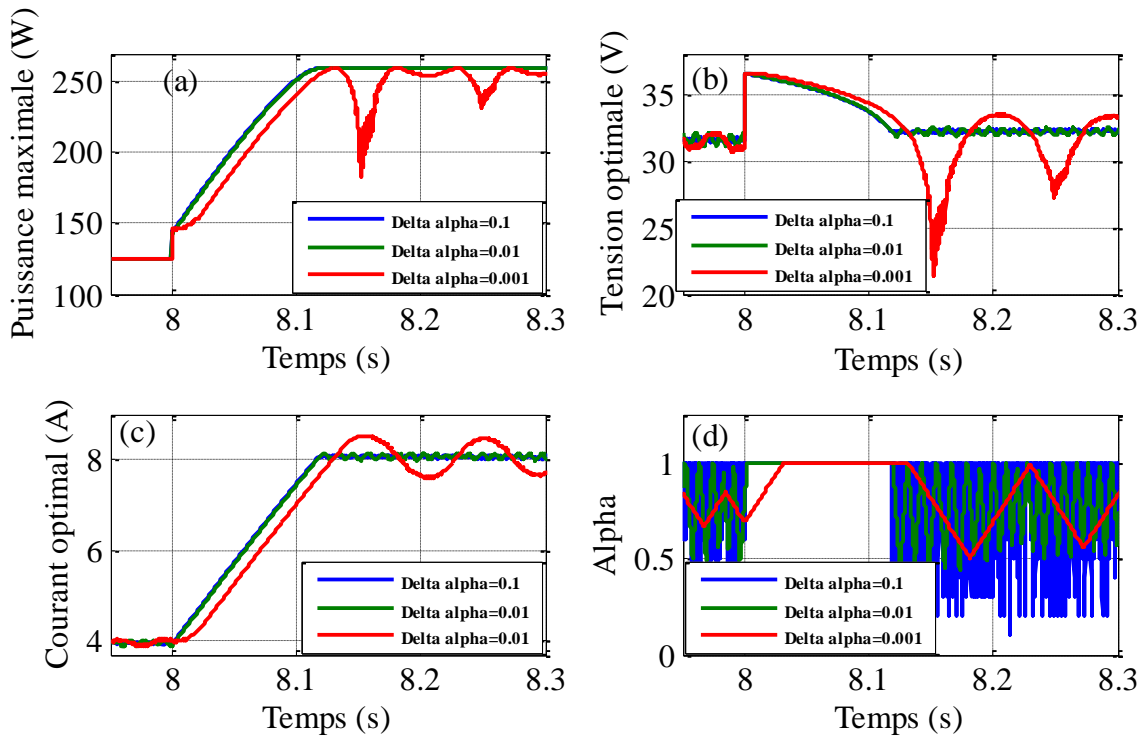


**Figure IV.8 :** Variation : a) Puissance maximale, b) Tension optimale, c) Courant optimal, d) Rapport cyclique alpha en fonction du temps pour différents pas d'incrémentations

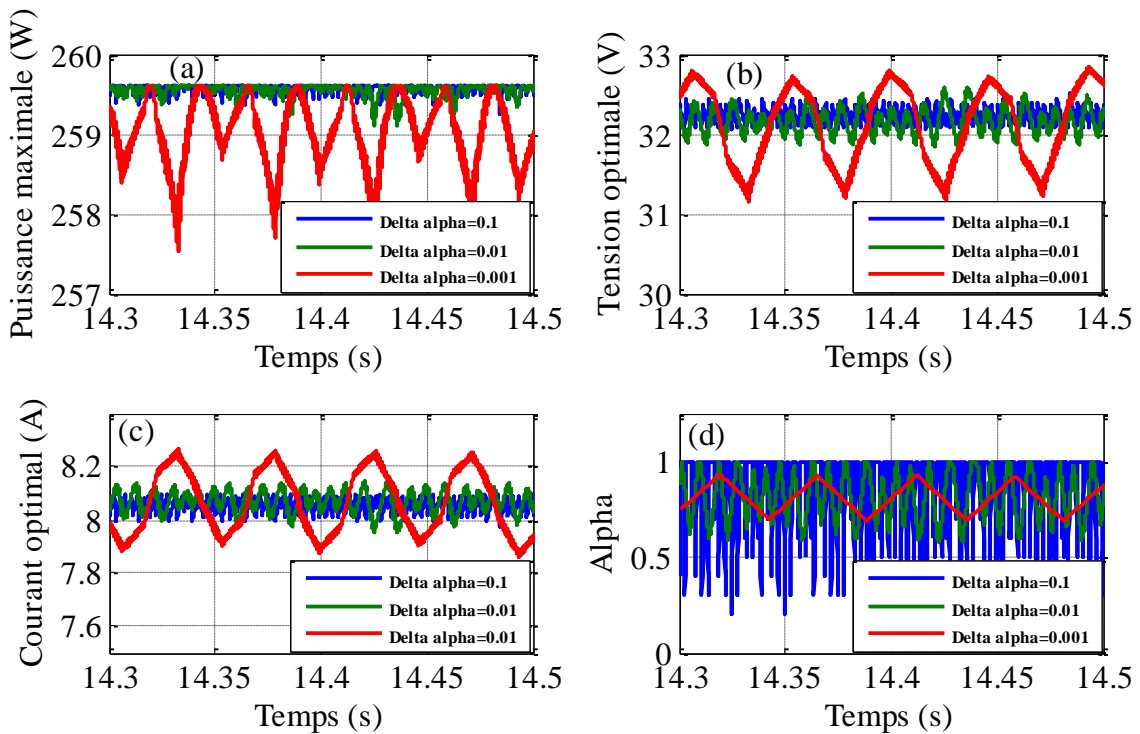
On constate que lorsque le pas d'incrémentations est faible, l'évolution instantanée de la puissance maximale, tension optimale et le courant optimal engendre beaucoup d'oscillations contrairement à la variation du rapport cyclique où ces oscillations diminuent lorsqu'on baisse le pas d'incrémentations.

#### IV.4.1 Zoom au régime transitoire et au régime permanent

Les figures (IV.9) et (IV.10) montrent respectivement la variation de la puissance maximale, tension et courant optimal et le rapport cyclique alpha pour un zoom au régime transitoire et au régime permanent à différents pas d'incrémentations.



**FigureIV.9 :** Variation : a) Puissance maximale, b) Tension optimale, c) Courant optimal, d) Rapport cyclique alpha en fonction du temps au régime transitoire pour différents pas d'incrément



**FigureIV.10 :** Variation : a) Puissance maximale, b) Tension optimale, c) Courant optimal, d) Rapport cyclique alpha en fonction du temps au régime permanent pour différents pas d'incrément

Au régime transitoire, les oscillations sont importantes et plus perturbantes surtout dans le cas où le pas d'incrémentation est faible, par contre, pour le régime permanent, les oscillations sont moins importantes et plus stables.

Aussi, on remarque que la durée du régime transitoire est très faible ce qui confirme la rapidité de l'algorithme de l'incrémental conductance et son efficacité.

#### **IV.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons donné les résultats de simulation de l'algorithme de l'incrémental conductance pour les différents tests (variation de l'éclairement et de la température en fonction du temps et le changement du pas d'incrémentation).

Les résultats obtenus montrent la performance de la méthode incrémental conductance surtout dans le cas où le pas d'incrémentation est faible ainsi que sa rapidité quel que soit les conditions climatiques (l'irradiation et la température).

Pour la commande MPPT, on constate que cette technique est efficace pour la poursuite du point de puissance maximale PPM, et ceci va permettre de produire la puissance maximale en permanence et améliorer le rendement du panneau photovoltaïque.

*Conclusion  
générale*

## Conclusion générale

Aujourd'hui, la demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles diminuent à cause du développement démographique et du développement de l'industrie. Pour résoudre ce problème, les chercheurs se sont intéressés à l'exploitation des énergies renouvelables. Parmi celles-ci, on trouve l'énergie solaire, qui se trouve dans la plupart des régions du monde.

Cependant, cette énergie souffre encore du coût élevé des cellules solaires, du faible rendement et de la puissance intermittente à cause de la variation des conditions météorologiques. Ces problèmes doivent être pris en considération lors de la conception d'un système photovoltaïque et pour améliorer son rendement. Dans ce sens, nous avons étudié un système photovoltaïque associé à une commande MPPT par la méthode de l'incrémental conductance (Inc-Cond) connecté à un convertisseur élévateur (Hacheur boost).

Initialement, nous avons présenté d'une façon générale le principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique qui est réalisée à travers de matériaux semi-conducteurs, puis nous avons présenté la cellule solaire et ses différentes technologies.

Après avoir fait la modélisation d'un générateur PV, nous avons vu le comportement du système photovoltaïque (caractéristique puissance-tension et caractéristique courant-tension) par rapport aux variations climatiques. Les résultats de la simulation ont montré que la caractéristique du panneau photovoltaïque est directement liée essentiellement à ses conditions climatiques (l'éclairement et la température).

Pour que le système photovoltaïque fonctionne à sa puissance maximale, il doit comporter un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge associé à une commande MPPT. Pour se faire, nous avons utilisé un algorithme MPPT qui est l'algorithme « Incrémental Conductance » (Inc-Cond) commandée par un convertisseur élévateur (hacheur boost). Après avoir modélisé et simuler cette technique, nous avons donné les résultats de simulation.

Les résultats obtenus pour les différents tests (les différents profils de l'éclairement, la variation instantanée de la température et le changement du pas d'incrémental) montrent l'efficacité et la performance de la méthode de l'incrémental conductance (Inc-Cond) dans un système photovoltaïque dans le but de produire la puissance maximale en permanence qui va permettre d'améliorer son rendement.

Pour une éventuelle continuité du présent travail, il est possible d'énumérer quelques perspectives comme suite de cette étude dont on peut citer:

- Exploitation de nouveaux algorithmes MPPT.
- Introduction d'autres types de convertisseurs DC-DC.
- Implanter des batteries de stockage d'énergie.

*Références  
bibliographiques*

## Références Bibliographiques

- [1] **Alain Bilbao Learretta** « Réalisation de commandes MPPT Numériques ». Rapport de stage de fin d'études, Universtat Rovira Virgili, 2006.
- [2] **Boualem Dendid** « Technique conventionnelles et avancée de poursuites MPPT pour des applications photovoltaïque : Etude comparative ». Mémoire de magister en électronique, Université Ferhat Abbas, Sétif, 2007.
- [3] **Anne Labouret et Michel Villosz** « Energie solaire photovoltaïque » 3<sup>ème</sup> édition DUNOD, 2006.
- [4] **Wassim Hojeij** « Réalisation et caractérisation optoélectronique de cellules photovoltaïques organiques ». Thèse de doctorat, Université de Limoge, 2007.
- [5] **Benoit Brousse** « Réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïques organiques obtenues par dépôt physique ». Thèse de doctorat, Université de Limoge, 2004.
- [6] **Missoum Mohammed** « Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance énergétique en Algérie ». Mémoire de magister, Université Hassiba Benbouali de Chlef, 2011.
- [7] **M.Orgeret, préface de F.D'Allest** « Les piles solaires, le composant et ses application ». Edition Masson, 2014.
- [8] **Chenni Rachid** « Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire ». Université Mentouri de constantine, 2007.
- [9] **Zerguine Bilal** « Modélisation d'un système de production électrique par la cellule photovoltaïque ». Université Badji Mokhtar d'Annaba, 2010.
- [10] **T.Dahdouh et Faouzi M<sup>ed</sup> Lamine Boukaf** « Modélisation et commande d'un système électrique utilisant des panneaux photovoltaïques ». Mémoire de master, UMMTO, 2011.
- [11] **Bachsais Iméne et Sebbagh Asma** « Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque pour l'irrigation d'un hectare de palmier dattier en utilisant les méthodes méta heuristiques ». Mémoire de master, Université M'Hamed Bougara de Boumerdes, 2017.
- [12] **Helali Kamélia** « Modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude comparative ». Mémoire de magister, UMMTO, 2010.
- [13] **Tahar Tafticht** « Analyse et commande d'un système hybride photovoltaïque éolien ». Thèse de doctorat, Université du Québec à Trois Rivières, 2006.
- [14] **Nichiporuk Oleksiy** « Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités ». Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005.
- [15] **Thomas Mambrini** « Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction de différentes technologies ». Thèse de doctorat, Université Paris-Sud, 2014.
-

- [16] **Semasson Clarence** « Aide à la décision pour le choix de sites et systèmes énergétiques adaptés aux besoins du Bénin ». Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, 2011.
- [17] **Belhadj Mohammed** « modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome ». Mémoire de magister, Université de Bechar, 2005.
- [18] **Touil Nacer Eddin et Ghenbazi Slimane** « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque ». Mémoire de master, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, 2015.
- [19] **Hannou Fatiha et Rouabah Aicha** « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque ». Mémoire de master, Université Kasdi Merbah de Ouargla, 2014.
- [20] **Slama Fateh** « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique ». Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2011.
- [21] **Angel Cid Pastor** « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques ». Thèse de doctorat, INSA de Toulouse, 2006.
- [22] **Belboula Abdelkader** « Commande MPPT avancée d'un système de conversion d'énergie solaire : photovoltaïque et thermoélectrique ». Mémoire de magister, Université Hassiba Ben Bouali de Chlef, 2014.
- [23] **Cabal Cedric** « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008.
- [24] **H.Abbes, H.Abid, K.Loukil, A.Toumi, M.Abid** « Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque ». Conférence Internationale des Energies Renouvelables (CIER'13) Sousse, Tunisie, 2013
- [25] **Abdallah Jelali** « Interconnexion d'un système photovoltaïque sur le réseau électrique ». Thèse de doctorat, Université du Québec, 2012.
-