

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

FACULTE : Sciences de l'Ingéniorat  
DEPARTEMENT : Électrotechnique

## MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Électrotechnique

OPTION : commande des systèmes industriels

### Thème

**Modélisation et contrôle d'un système photovoltaïque**

**Présenté par :**

Karkarine Abdelkader

**Dirigé par :**

Bahi Tahar

**Jury de soutenance :**

- |                    |            |     |                     |
|--------------------|------------|-----|---------------------|
| - Chine Abdelghani | Président  | MMA | Université d'Annaba |
| - Bahi Tahar       | Rapporteur | Pr  | Université d'Annaba |
| - Mohammedi Moufid | Examineur  | MCB | Université d'Annaba |

**Promotion : juin 2017**

*Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de  
m'avoir donné le courage et la patience pour  
réaliser ce travail malgré toutes les difficultés  
rencontrées.*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes très chers parents, que dieu les garde et  
les protège pour leur soutien moral et financier,  
pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils  
ont endurés.*

*A mes frères*

*A ma grande famille*

*Aux chers amis Wissem, Zaineb, Mondher,  
Salah*

*A tous les amis (es) d'études surtout ceux  
d'électrotechnique promotion 2017*

## **Remerciements**

Je me dois remercier ALLAH le Tout Puissant pour toute la volonté et le courage qu'il m'a donné pour l'achèvement de ce travail.

Je tiens tout d'abord à remercier vivement le Professeur BAHY TAHAR, qui a manifesté son entière disponibilité pour son aide, son orientation et sa disponibilité, aussi pour la confiance et la compréhension qu'il m'a toujours prouvée.

Mes remerciements les plus sincères sont adressés à Monsieur CHINE ABDELGHANI pour me faire l'honneur de présider le jury de mon mémoire de Master 02, ainsi que les membres du jury Mr. MOHAMMEDI MOUFID de l'intérêt dont ils font preuve à mon égard pour lire ce mémoire et en assistant à ma soutenance.

Mes vifs remerciements s'adressent également à tous les membres de ma famille notamment ma chère mère et mon cher père qui m'ont aidé et pour leur soutien précieux plus que je ne peux le dire durant les longues années de ma formation, ce qui leur fait valoir ma grande reconnaissance.

Je tiens à remercier vivement mes amis DRIDI WISSEM, KHOUALDIA ZAINEB, KHLAIFIA MONDHER et AMMARA SALAH pour son soutien.

Enfin, je remercie toutes les personnes (dont le nombre est très élevé pour les citer toutes ici), qui ont contribué de près ou de loin, directement ou indirectement à l'aboutissement de ce travail, je les remercie tous.

**SOMMAIRE**

Introduction général	01	
<b>CHAPITRE I : NOTIONS SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES</b>		
I.1	Introduction	03
I.2	Potentiel solaire	03
I.2.1	Potentiel et rayonnement solaire extraterrestre	03
I.2.2	Temps solaire vrai	05
I.2.3	Position du soleil	05
I.2.4	Géométrie d'orientation	06
I.2.5	Rayonnement solaire	07
I.2.5.1	Spectre solaire	07
I.2.5.2	Masse d'air	09
I.2.6	Gisement solaire en Algérie	10
I.3	Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	11
I.3.1	Types et rendement des cellules photovoltaïques	12
I.3.2	Protections classiques d'un générateur photovoltaïque	12
I.4	Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	13
I.4.1	inconvénients	13
I.4.2	Avantages	14
I.5	Conclusion	14
<b>CHAPITRE II : MODELISATION D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE</b>		
II.1	Introduction	15

---

II.2	Circuit équivalent d'une cellule solaire	15
II.2.1	Cas d'une cellule idéale	15
II.2.2	Cas d'une cellule réelle	16
II.3	Caractéristique du GPV	18
II.3.1	Influence de l'éclairement	19
II.3.2	Influence de la température	20
II.4	Constitution d'un générateur photovoltaïque	21
II.4.1	Connexion de cellules photovoltaïques en parallèle	21
II.4.2	Connexion de cellules photovoltaïques en série	22
II.4.3	Connexion mixte de cellules photovoltaïques	23
II.5	Conclusion	26

## **CHAPITRE II : CONVERTISSEUR CONTINU-CONTINU**

III.1	Introduction	27
III.2	Fonctionnement d'un GPV à sa puissance maximale	28
III.3	Hacheurs	29
III.3.1	Type des hacheurs	29
III.3.2	Hacheur élévateur (boost)	30
III.3.3	Avantages de convertisseur boost	34
III.4	Simulation	35
III.5	Conclusion	37

## **CHAPITRE IV : STRATEGIES DE COMMANDES MPPT**

IV.1	Introduction	38
------	--------------	----

---

IV.2	Commande MPPT	38
IV.2.1	Classification d'algorithmes de suiveur de point maximum	39
IV.2.1.1	Méthode contre réaction de tension	39
IV.2.1.2	Méthode a contre réaction du courant	40
A)	Méthode à courant de référence en fonction du courant de court-circuit $I_{SC}$	40
B)	Méthode à courant de référence externe	40
IV.2.1.3	Méthodes classiques de commande MPPT	40
A)	Algorithme perturbation et observation	41
A.1	Résultat de simulation	42
B)	Méthode par incrémentation de la conductance	44
B.1	Résultat de simulation	45
C)	Méthodes modernes de commande	47
C.1)	Fuzzification	47
C.2)	Méthode d'inférence	48
C.3)	Défuzzification	50
C.4)	Résultat de simulation	50
IV.3	Conclusion	53

---

# Listes des figures

---

## Chapitre I

**Fig I.1 :** *Géométrie schématique des rapports terre-soleil.*

**Fig I.2 :** *Position du soleil observée d'après l'origine O.*

**Fig I.3 :** *Position du soleil observée d'après collecteur incliné.*

**Fig I.4 :** *Types de rayonnement solaire reçus au sol.*

**Fig I.5 :** *Rayonnement solaire capté par un plan horizontal et incliné.*

**Fig I.6 :** *Intensité de l'ensoleillement reçu sur un plan horizontal et incliné*

**Fig 1.7** *Description du nombre de masse d'air*

**Fig I.8 :** *Carte d'éclairement solaire de L'Algérie.*

**Fig I.9 :** *Structure d'une cellule photovoltaïque.*

**Fig 1.10 :** *Schématisation d'un GPV avec diodes by-pass et diode anti-retour.*

## Chapitre II

**Fig 2.1 :** *Schéma équivalent d'une cellule idéale.*

**Fig 2.2 :** *Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.*

**Fig 2.3 :** *Caractéristique I-V.*

**Fig 2.4 :** *Caractéristique P-V.*

**Fig 2.5 :** *Caractéristique  $I=f(V)$  pour différents éclairements.*

**Fig 2.6 :** *Caractéristique  $P=f(V)$  pour différents éclairagements.*

**Fig 2.7 :** *Caractéristique  $I=f(V)$  pour différents températures.*

**Fig 2.8 :** *Caractéristique  $I=f(V)$  pour différents températures.*

**Fig 2.9 :** *Schéma et caractéristique de deux (2) cellules PV en parallèles.*

**Fig 2.10 :** *Schéma et caractéristique de deux (2) cellules PV en série.*

**Fig 2.11 :** *Schéma générateur photovoltaïque*

**Fig 2.12 :** *Caractéristique  $I-V$  d'un générateur photovoltaïque.*

**Fig 2.13 :** *Caractéristique  $P-V$  d'un générateur photovoltaïque.*

### Chapitre III

**Fig 3.1 :** *Système de conversion photovoltaïque.*

**Fig 3.2 :** *Connexion directe GPV – charge.*

**Fig 3.3 :** *Convertisseur Boost (hacheur élévateur).*

**Fig 3.4 :** *Système photovoltaïque suivi par un hacheur de type Boost.*

**Fig 3.5 :** *Convertisseur Boost durant l'état "ON".*

**Fig 3.6 :** *Convertisseur Boost durant l'état "OFF".*

**Fig 3.7 :** *tension d'entrée et de la sortie du hacheur.*

**Fig 3.8 :** *puissance d'entrée et de la sortie du hacheur.*



## Chapitre IV

**Fig 4.1 :** *Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec hacheur.*

**Fig 4.2 :** *Méthode avec Contre-réaction de tension.*

**Fig 4.3 :** *Méthode « perturbation et observation ».*

**Fig 4.4 :** *Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation.*

**Fig 4.5 :**  *$V(t)$  b) :  $I(t)$  c) :  $P(t)$ .*

**Fig 4.6 :** *Organigramme de l'algorithme incrémentation de conductance.*

**Fig 4.7 :** *a) :  $V(t)$  b) :  $I(t)$  c) :  $P(t)$ .*

**Fig 4.8 :** *Schéma synoptique général d'un contrôleur flou.*

**Fig 4.9 :** *Fonctions d'appartenance de chacune des variables linguistiques.*

**Fig 4.10 :** *a) :  $V(t)$  b) :  $I(t)$  c) :  $P(t)$ .*

---

# Liste des tableaux

---

## Chapitre I

**Tableau I.1 :** *Performance des différentes technologies des cellules photovoltaïques.*

## Chapitre II

**Tableau 2.1 :** *Valeurs des paramètres de simulation.*

**Tableau 2.2 :** *paramètres du PV.*

## Chapitre VI

**Tableau 4.1 :** *Table de règles à cinq classes (matrice d'inférences).*

**Tableau 4.2 :** *Comparaison des techniques MPPT.*

**Résumé :**

La puissance de sortie d'un panneau dépend d'un certain nombre de paramètres lesquels l'intensité du rayonnement solaire, la température des cellules, etc. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules PV et de leurs associations, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des solutions à base des techniques MPPT. Il existe des méthodes MPPT conventionnelles souvent utilisées, à savoir la méthode de perturbation et d'observation (P&O) et la méthode de conductance incrémentale (IncCond) et les méthodes dites avancées, telle que la MPPT floue. Ce mémoire présente une étude comparative entre ces différentes techniques MPPT afin d'analyser, simuler, et évaluer le système global d'alimentation PV sous des conditions de fonctionnement variables. Pour ce faire les modèles mathématiques des composants du système (panneau) ont été développés. Les résultats de simulation, obtenus à l'aide de l'outil Matlab Simulink, ont prouvé en général que les performances du contrôleur MPPT flou sont bien meilleures que ceux du contrôleur MPPT conventionnel.

**Mots clés :** PV, convertisseur DC-DC, MPPT. P&O, IncCond, logique floue.

**Abstract:**

The output power of a GPV depends on a number of parameters including the intensity of solar radiation, cell temperature, etc. Because of the highly nonlinear electrical characteristics of PV cells and their associations, the system performance can be improved by PV based solutions MPPT techniques. There are methods MPPT conventional commonly used, namely the perturbation and observation (P & O) and the method of conductance incremental (IncCond) and the methods called advanced, such as fuzzy MPPT. This thesis presents a comparative study of different techniques MPPT to analyze, simulate, and evaluate the overall system PV power under varying operating conditions. To do the mathematical models of system components PV (panel) have been developed. Simulation results, obtained using Matlab Simulink tool, that in general the performances of fuzzy controller in maximum power tracking of PV array is much better than the conventional MPPT controller.

**Key words:** PV, converter DC-DC, MPPT, P&O, IncCond, fuzzy logic.





---

## Introduction générale

L'augmentation du Coût des énergies classiques d'une part, et la limitation de leurs ressources d'autre part, font que l'énergie renouvelable devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses avec des avantages comme l'abondance, l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout point du globe terrestre.

Les énergies renouvelables sont des énergies issues du soleil, du vent, de la géothermie, des chutes d'eau, des marées ou de la biomasse. Leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes ; ce sont les énergies de l'avenir. Ces énergies regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.

La filière étudiée dans ce mémoire est l'énergie photovoltaïque. Cependant les inconvénients majeurs de cette énergie sont le prix du générateur qui reste encore élevé ainsi que le rendement énergétique relativement bas. Pour surmonter ces problèmes, deux voies sont souvent suivies:

- Augmente le rendement énergétique en adoptant des technologies de très haut niveau lors de la fabrication des cellules photovoltaïques.
- Maximise la puissance délivrée par le générateur.

### Objectif du travail

Le présent travail est basé sur l'étude et la comparaison entre trois techniques de maximisation de la puissance délivrée par le panneau photovoltaïque (Perturbation et Observation, Incrémentation de Conductance et logique floue), pour atteindre cet objectif, nous avons scindé notre mémoire en quatre chapitres.

### Structure de la mémoire

Le premier chapitre présente d'une manière générale les systèmes photovoltaïques et leurs composants, et leurs avantages et leurs inconvénients.

Ensuite, nous passerons au deuxième chapitre consacré à la modélisation du panneau photovoltaïque, ainsi le principe de la conversion photovoltaïque puis nous donnerons les principales caractéristiques d'un PV

Le troisième chapitre est consacré à une modélisation de convertisseurs DC\_DC à savoir, le convertisseur Boost.

En fin dans le quatrième chapitre, on a fait quelques techniques de poursuite du point de puissance maximale (MPPT), et nous nous intéresserons à l'étude de la méthode "Perturbation-Observation", "IncCond" et "logique floue".

Un modèle de recherche de point de puissance maximal d'un panneau photovoltaïque basé sur un hacheur élévateur est présenté dans l'environnement MATLAB/ SIMULINK. La simulation du modèle avec les algorithmes des trois techniques perturbations et observation (P&O), incrémentation de conductance (Inc.CoN) et la Logique Floue (L.F) sous les mêmes conductions météorologique et la comparaison des résultats obtenus. En conclusion générale, nous présentons une synthèse des travaux effectués ainsi que les principaux résultats obtenus.

# **Chapitre I**

---

**Notions sur les systèmes photovoltaïques**

---

# Chapitre I

## Notions sur les systèmes photovoltaïques

### I.1 Introduction

Le soleil est une source d'énergie inépuisable pouvant satisfaire nos besoins en consommation énergétique. Alors, il est possible de mettre au profit de la population sa diffusion sur l'ensemble de la planète, en extrayant son énergie importante grâce à l'utilisation des cellules photovoltaïques. Le nom Photovoltaïque vient du Grec, il est composé de deux parties : **Photos** : Lumière ; **Volt** : Unité de tension électrique, du nom Alessandro Volta [1]. La première cellule photovoltaïque fut développée au début de l'année 1954 par le physicien Alexandre Edmond Becquerel.

Toutefois, ce n'est qu'au début des années 70 que les premiers, du photovoltaïque fut utiliser pour l'alimentation en énergie d'habitations en sites isolés et d'équipements de télécommunications [2]. Par la suite, l'avance génieuse de la recherche dans le domaine des énergies renouvelables a permis l'amélioration de la fiabilité et de mettre en place des concepts respectueux de l'environnement des systèmes photovoltaïques ce qui leurs a accordé une considération prépondérante dans les systèmes de production d'énergie électrique.

Pour expliquer le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque en passant au système photovoltaïque complet et à ses trois types à savoir [3] :

- ✓ Les systèmes autonomes ;
- ✓ Les systèmes connectés au réseau ;
- ✓ Les systèmes fonctionnant au fil du soleil (Pompage PV).

### I.2 Potentiel solaire

#### I.2.1 Potentiel et rayonnement solaire extraterrestre

Le corps noir est à la fois un absorbeur et un émetteur de rayonnement électromagnétique avec 100 % d'efficacité à toutes les longueurs d'ondes. Sa distribution théorique des longueurs d'ondes du rayonnement est décrite par l'équation de Planck [4].

$$E_{\lambda} = \frac{A\lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{\beta}{\lambda T}\right) - 1} \quad (1.1)$$



Avec :

$$A = 3.74 \times 10^{-16} \text{ W/m}^2 ;$$

$$\beta = 14.39 \times 10^{-3} \text{ m.K} ;$$

$\lambda$  : longueur d'onde en mètre ;

T : température absolue en °K du corps noir.

L'ensoleillement est donné par la loi de Stefan-Boltzmann qui représente le flux d'énergie émis par unité de temps et par unité de surface du soleil [5] :

$$E_s = \sigma T^4 \quad (1.2)$$

Où :  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$  : est la constante de Stefan-Boltzmann ;

T est la température absolue du corps noir.

Si on suppose que le soleil est un corps noir l'ensoleillement reçu en dehors de l'atmosphère terrestre, nommée la constante solaire, peut être exprimé par la relation suivante :

$$E_0 = \frac{E_s A_s}{A_{OT}} \quad (1.3)$$

Avec :

$E_s$  : éclairement de la surface du soleil ;

$E_0$  : éclairement en dehors de l'atmosphère terrestre, appelé constante solaire ;

$A_s$  : surface du soleil ;

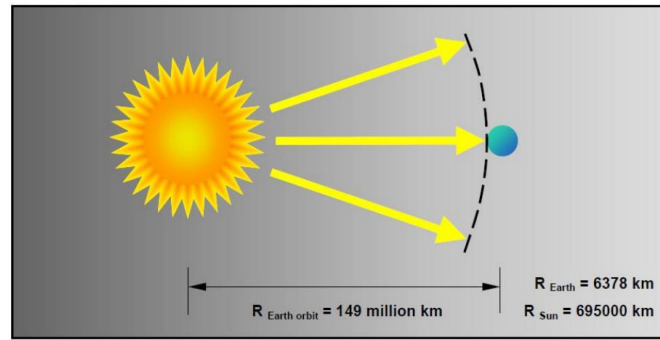
$A_{OT}$  : surface de la sphère dont le rayon est l'orbite de la terre/soleil ;

La figure (I.1) présente la géométrie schématique des rapports terre-soleil. En substituant  $E_s$  par l'équation (I.2) et T par 5762°K, on obtient :  $E_0 = 1360 \text{ W/m}^2$ . Puisque l'orbite de la terre ROT n'est pas entièrement constant,  $E_0$  change légèrement tout au long de l'année, on peut déduire que  $1300 \text{ W/m}^2 < E_0 < 1390 \text{ W/m}^2$ .

Les mesures, par satellite, indiquent que la valeur moyenne de l'année  $E_0$  est de  $1367 \text{ W/m}^2$  ; qui est dans la gamme précédente.

En raison de l'orbite elliptique de la terre, l'ensoleillement extraterrestre  $E_0$  sur une surface perpendiculaire au faisceau du soleil dans le jour « n » de l'année est donné (n variant de 1 à 365 et ce du 01/01 au 31/12 de l'année) par l'équation suivante [6] :

$$E_0(n) = \left( 1 + 0.033 \frac{2\pi n}{365} \right) E_0 \quad (1.4)$$



**Fig 1.1** Géométrie schématique des rapports terre-soleil.

### I.2.2 Temps solaire vrai

C'est le temps (en heures) appliqué par le calcul d'énergie solaire, quand le soleil croise le méridien de l'observateur à 12:00, la conversion du temps standard local

(TSL) au TSV est :

$$T_{TSV} = T_{TSL} + \frac{12h}{\pi} (\Lambda_{ref} - \Lambda) + B_t(n) \quad (1.5)$$

Avec :

$\Lambda$  : longitude géographique du site ;

$\Lambda_{ref}$  : longitude de référence du TSL ;

$B_t(n)$ , en heures, est un facteur additionnel qui compte pour les perturbations de rotation de la terre, (on peut ajouter jusqu'à 1H) ; il est donné par l'équation (1.6) [7] :

$$B_t(n) = 0.1645 \sin\left(\frac{2\pi(n-81)}{364}\right) - 1255 \cos\left(\frac{2\pi(n-81)}{364}\right) - 0.025 \sin\left(\frac{2\pi(n-81)}{364}\right) \quad (1.6)$$

### I.2.3 Position du soleil

La position du soleil sur la sphère céleste est donnée par l'angle d'altitude ( $\gamma$ ) et l'angle d'azimut ( $\psi$ ) (voir la figure 1.2) dépend de la date, la période du jour, et de la position géographique de l'observateur [7].

La date, en nombre de jours « n », détermine l'angle solaire de déclinaison ( $\delta$ ) de la terre, qui est au point O en radian. Elle est exprimée par l'équation suivante :

$$\delta = 23.45 \frac{\pi}{180} \sin\left(2\pi \frac{284+n}{365}\right) \quad (1.7)$$

Le temps de la journée, en heures, est le reflet d'un angle nommé angle horaire du soleil, en radian équivalant à l'heure, qui est donné par l'équation suivante :

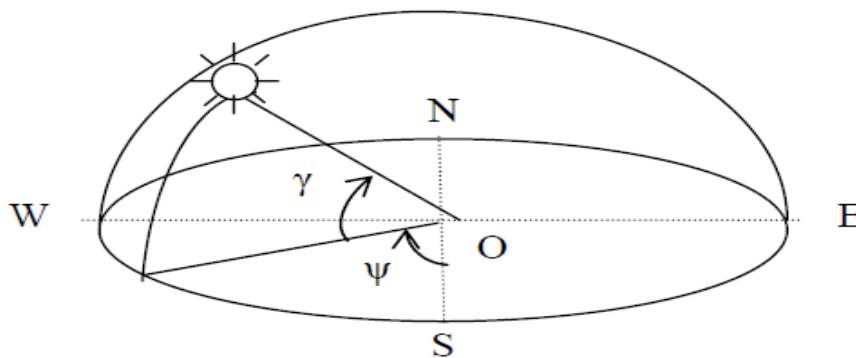
$$\omega = (T_{sv} - 12h) \frac{\pi}{12h} \quad (1.8)$$

L'altitude  $\gamma$  et l'azimut  $\psi$  à un certain temps et date, à longitude  $\Lambda$  et à latitude  $\varphi$ , sont alors calculés à partir des équations I.9 et I.10 [6] :

$$\sin(\gamma) = \sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\cos(\omega) \quad (1.9)$$

$$\cos(\psi) = \frac{\sin(\varphi)\sin(\gamma) - \sin(\delta)}{\cos(\varphi)\cos(\gamma)} \quad (1.10)$$

On note que l'azimut solaire  $\psi$  est négatif le matin et positif l'après-midi. Pour des positions sur l'hémisphère nordique, l'angle d'altitude  $\gamma$  est positif entre le lever et le coucher du soleil ; Tandis que sur l'hémisphère méridional, il est négatif. L'angle de déclinaison  $\delta$  est défini positif pendant l'été sur l'hémisphère nordique. L'angle de latitude géographique  $\varphi$  est positif sur l'hémisphère nord et négatif sur l'hémisphère sud.



**Fig 1.2** Position du soleil observée d'après l'origine  $O$ .

#### I.2.4 Géométrie d'orientation

La position du soleil vis-à-vis d'un collecteur orienté arbitrairement est déterminée par l'angle d'incidence  $\theta_i$  du rayon du soleil (Figure 1.3). Pour le plan d'horizon, l'angle d'incidence est égal à l'angle zénith, équation (1.11) :

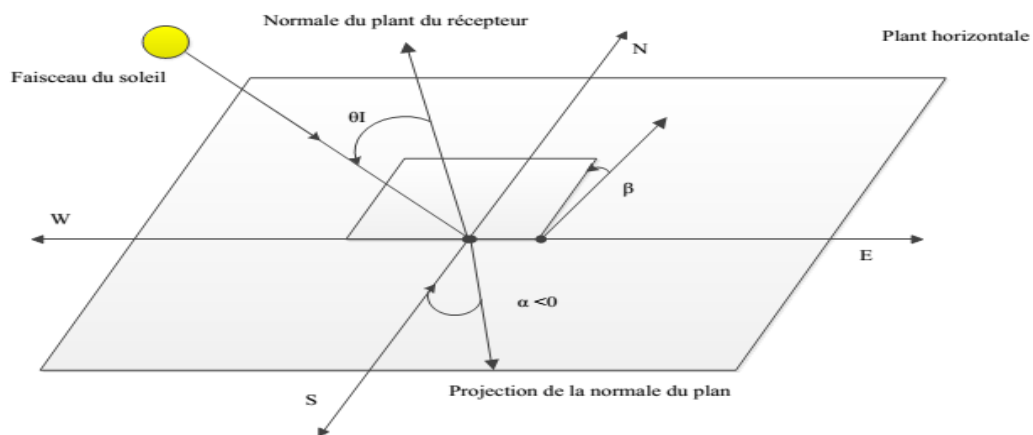
$$\cos(\theta_i) = \sin(\gamma) \quad (1.11)$$

Pour un collecteur incliné avec l'angle  $\beta$  et l'azimut  $\alpha$ , l'angle d'incidence  $\theta_i$  est calculé à partir de :

$$\cos(\theta_i) = \sin(\gamma) \cos(\beta) + \cos(\gamma) \sin(\beta) \cos(\alpha - \psi) \quad (1.12)$$

Là où l'angle d'azimut  $\alpha$  erre d'est-ouest et zéro pour l'orientation sud. L'ensoleillement extraterrestre  $E_0$  reçu par un collecteur arbitrairement orienté est donnée par l'équation (I.13) :

$$E_{0\alpha\beta} = E_0 \cos(\theta_i) \quad (1.13)$$



**Fig 1.3** Position du soleil observée d'après collecteur incliné.

## I.2.5 Rayonnement solaire

### I.2.5.1 Spectre 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 [8] :

✓ Le rayonnement direct : la conversion du rayonnement direct  $E_D$  est une question trigonométrique. Le rayonnement direct, sur le plan horizontal, est la différence entre le rayonnement global et le rayonnement diffus.

Le rayonnement direct est converti pour un plan avec un angle d'azimut ( $\alpha$ ) et d'inclinaison ( $\beta$ ) selon l'équation suivante :

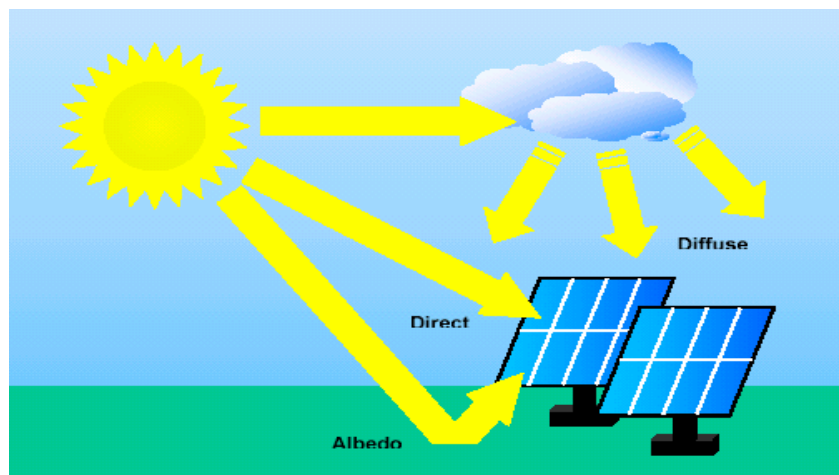
$$E_{D\alpha\beta} = E_D \frac{\cos(\theta_i)}{\sin(\gamma)} \quad (1.14)$$

Avec :

$\gamma$  et  $\theta_i$  sont donnés selon les équations (1.9) et (1.12).

On note que le paramètre  $E_{D\alpha\beta}$  peut être mesuré par un instrument nommé (Pyrohéliomètre) qui doit être monté sur la monture du générateur PV [8].

- ✓ Le rayonnement diffus : c'est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols.
- ✓ Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol : c'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc....).
- ✓ Le rayonnement global : le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et réfléti par le sol) [6]. Dans la figure 1.4 est représenté l'ensemble des rayonnements solaires reçus sur la surface terrestre.

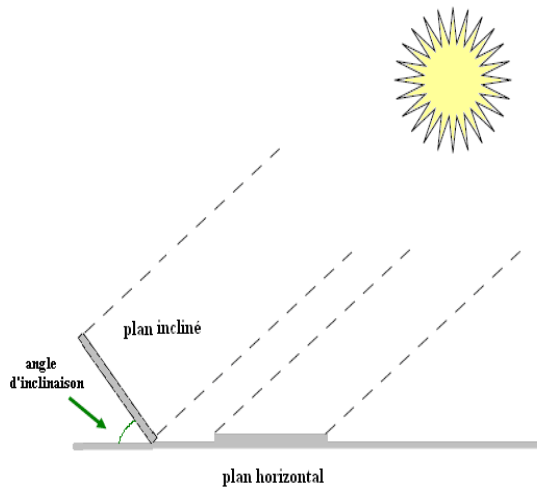


**Fig 1.4** Types de rayonnement solaire reçus au sol

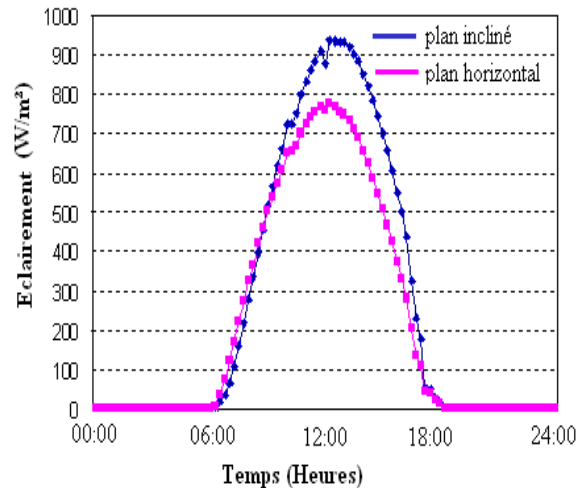
L'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan quelconque à un moment donné est appelée irradiation ou éclaircissement (noté généralement par la lettre G), il s'exprime en watts par mètre carré (W/m<sup>2</sup>).

La valeur du rayonnement reçu par la surface du module photovoltaïque varie selon la position de ce dernier. Le rayonnement solaire atteint son intensité maximale lorsque le plan du module photovoltaïque est perpendiculaire aux rayons [3].

Dans la figure 1.5 et la figure 1.6 est montré l'effet de l'inclinaison des modules photovoltaïques sur l'intensité de l'éclairement reçu sur leurs surfaces depuis le levé au couché du soleil.



**Fig 1.5** Rayonnement solaire capté par un plan horizontal et incliné



**Fig I.6** Intensité de l'insolation reçue sur un plan horizontal et incliné

### I.2.5.2 Masse d'air

On appelle masse d'air MA, la perte de l'énergie solaire par l'absorption atmosphérique. Elle est donnée en fonction de l'angle entre le soleil et le zénith [8].

$$MA \approx \frac{1}{\sin \theta} \quad (1.15)$$

Ou,

$\theta$  : L'angle entre la position du soleil et le zénith exprimée en (Degré).

Le spectre solaire AM0 correspond à une masse d'air nulle pour un rayonnement arrivant au-dessus de la couche atmosphérique à incidence normale, MA1 pour un soleil vertical à la terre (le soleil est au zénith), et MA1.5 pour un rayonnement solaire correspondant à une inclinaison du soleil de  $45^\circ$  par rapport au zénith. Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith [6].

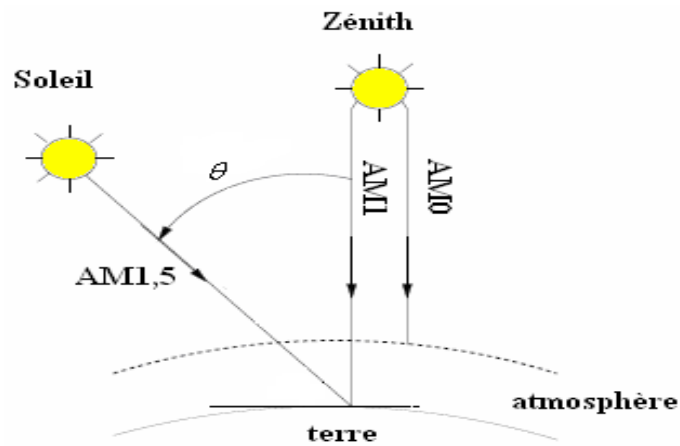
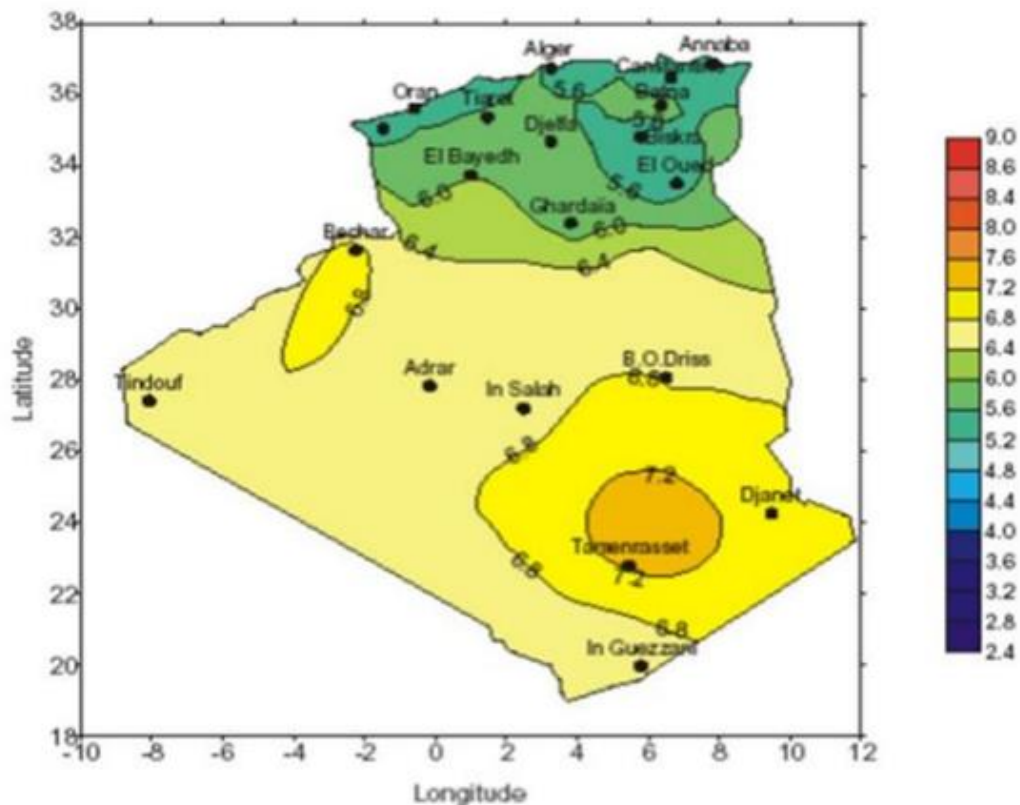


Fig 1.7 Description du nombre de masse d'air

### I.2.6. Gisement solaire en Algérie

Pour saisir la portée des énergies renouvelables en Algérie et les enjeux considérables et inépuisables existant de ces énergies non encore exploitées à savoir le gisement solaire exceptionnel qui couvre une superficie de 2381745 Km<sup>2</sup> [9].

L'Algérie est l'un des pays qui ont une diversité de sites grâce à son grand secteur, où le rayonnement de la région près de la mer est influencé par les saisons. Les zones du nord de l'Algérie sont à ciel - couvert plus que ceux du sud. Les régions Sahariens reçoivent une quantité plus grande d'énergie mais sont caractérisées par une température de l'air plus élevée. En raison de cette diversité dans le climat, l'ensoleillement moyen global au plan horizontal reçu varie entre 4,5 et 7.5 kWh/m<sup>2</sup>. En tenant compte de cette diversité, l'Algérie peut être divisée en 8 zones climatiques qui ont approximativement un ensoleillement homogène comme indiqué sur la figure (1.8).



**Fig 1.8** Carte d'éclairement solaire de l'Algérie

Donc, Part sa situation privilégiée, l'Algérie dispose du plus grand gisement solaire du bassin méditerranéen. La durée moyenne d'ensoleillement du territoire algérien dépasse les 2000 heures annuelles, peut atteindre près de 3500 heures d'ensoleillement dans le désert du Sahara. Le total d'énergie reçu est estimé à 169 400 TWh/an, soit 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays [9]

### **I.3 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque**

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur généralement à base silicium. Elle est réalisée à partir de deux couches, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel.

Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule [3].

La structure d'une cellule photovoltaïque est illustrée dans la figure suivante :



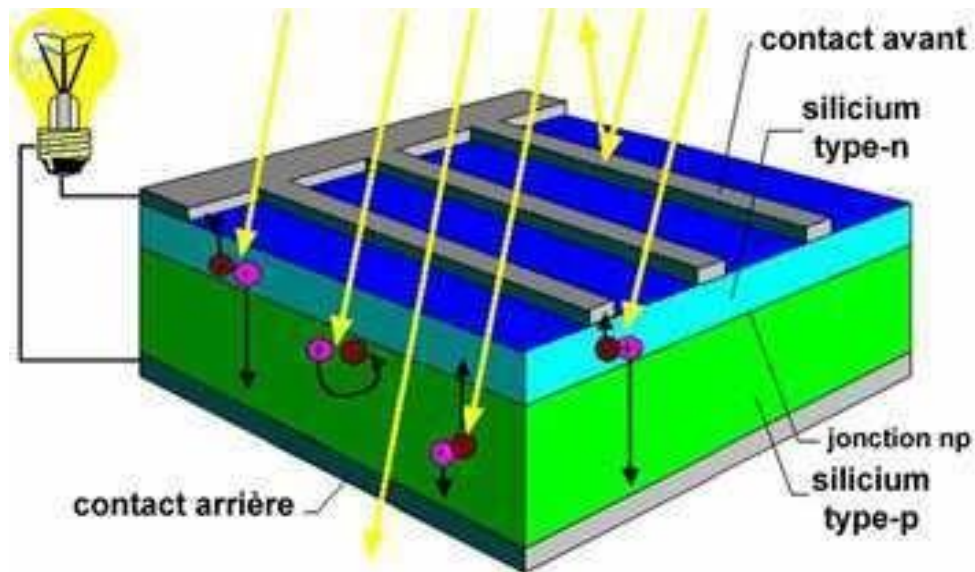


Fig 1.9 Structure d'une cellule photovoltaïque [5]

### I.3.1 Types et rendement des cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules solaires (ou cellules photovoltaïques), et chaque type de cellules a un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible : de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent. Le tableau 1.1 présente les trois principaux types de cellules [6].

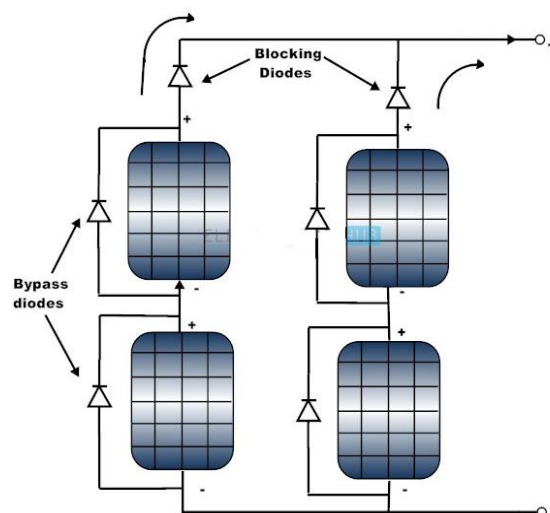
Type de cellule	Rendement	Avantage	Inconvénient
<b>Silicium monocristallin</b>	13-17%	Bon rendement pour une cellule	Coût de fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication
<b>Silicium poly-cristallin</b>	11-15%	Bon rendement pour un module	Coût de fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication
<b>Silicium amorphe</b>	5-9%	Facile à fabriquer	Mauvais rendement

Tableau 1.1 : Performance des différentes technologies des cellules photovoltaïques

### I.3.2 Protections classiques d'un générateur photovoltaïque

Deux types de protections contre les pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage sont classiquement utilisés [11] :

- ✓ la protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour).
- ✓ la protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds.



**Fig 1.10** Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour

### I.4 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

On peut citer les inconvénients et les avantages suivants [9]

#### I.4.1 Inconvénients

- ✓ La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé ;
- ✓ Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28% ;
- ✓ Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

- ✓ Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- ✓ Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

#### **I.4.2 Avantages**

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

#### **I.5 Conclusion**

Le contenu de ce chapitre a été consacré aux notions de base du développement de l'énergie solaire. En effet, on y trouve les principales notions sur potentiel solaire, le principe de la conversion PV et les cellules photovoltaïques.

# **Chapitre II**

---

## **Modélisation d'un système photovoltaïque**

---

## Chapitre II

### Modélisation d'un système photovoltaïque

#### II.1 Introduction

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui transforme l'énergie lumineuse en courant électrique. La première photopile a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs de laboratoire Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des quelques années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quittés les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé. Actuellement, l'objectif essentiel est devenu la production de l'électricité, sans pollution, pour l'alimentation des réseaux de distribution.

#### II.2 Circuit équivalent d'une cellule solaire

##### II.2.1 Cas d'une cellule idéale

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connecté à une charge peut être schématisée par un générateur de courant  $I_{pv}$  en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure (2.1), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale [12]

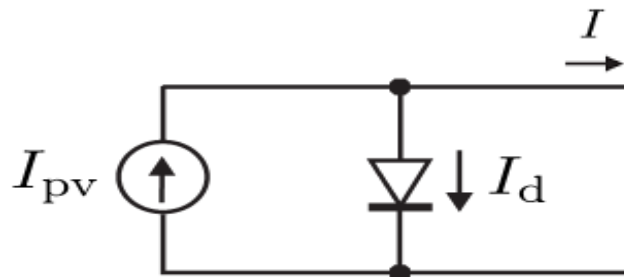


Fig 2.1 Schéma équivalent d'une cellule idéale

Les équations retenues de ce modèle sont :

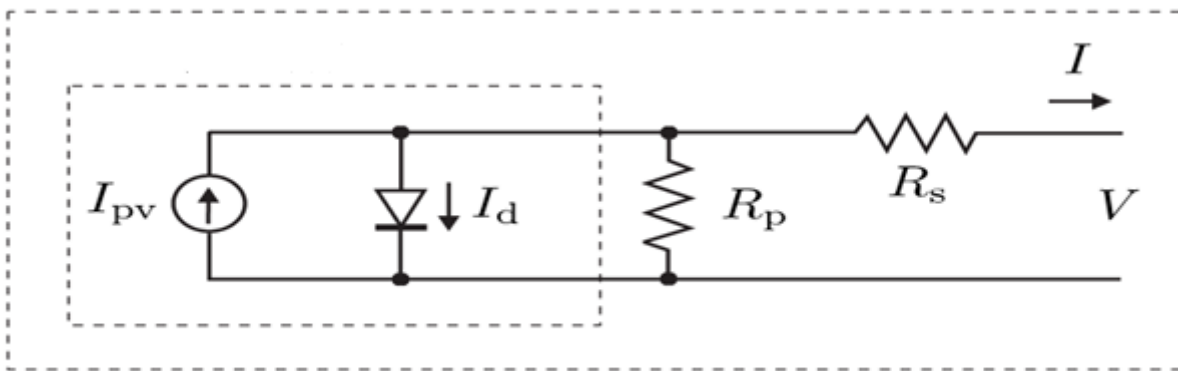
$$I = I_{pv} - I_d \quad (2.1)$$

Le courant  $I_{pv}$  est assimilé au courant  $I_{sc}$  avec  $V_{pv} = 0$ , courant de court-circuit obtenu en court-circuitant la charge.

### II.2.2 Cas d'une cellule réelle

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dues à la fabrication et représenté sur la figure (2.2).

Ce schéma équivalent est constitué d'une diode (d) caractérisant la jonction, une source de courant  $I_{pv}$  caractérisant le photo-courant, une résistance série ( $R_s$ ), et une résistance parallèle ( $R_p$ )



**Fig 2.2** Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

Dans notre travail, nous avons utilisé le modèle mathématique du module solaire à exponentiel simple [13]

Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante :

$$I = I_{pv} - I_d - I_p \quad (2.2)$$

$I$  : Courant généré par la cellule photovoltaïque ;

$I_{pv}$  : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident)

$$I_{pv} = (I_{pv,N} + K_1 \Delta T) \frac{G}{G_N} \quad (2.3)$$

$I_d$  : courant à travers la diode.

$$I_d = I_{0,CELL} \left[ \exp\left(\frac{qV}{aKT}\right) - 1 \right] \quad (2.4)$$

$$I_0 = I_{0,N} \left(\frac{T_N}{T}\right)^3 \exp\left[\frac{qE_G}{aK} \left(\frac{1}{T_N} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (2.5)$$

$$I_{0,N} = \frac{I_{SC,N}}{\exp\left(\frac{V_{OC,N}}{aV_{T,N}}\right) - 1} \quad (2.6)$$

$$R_P = V_{mp} (V_{mp} + I_{mp} R_S) / \left\{ V_{mp} I_{pv} - V_{mp} I_0 \exp\left[\frac{(V_{mp} + I_{mp} R_S)}{N_S a} \cdot \frac{q}{kT}\right] + V_{mp} I_0 - P_{\max,e} \right\} \quad (2.7)$$

$$I_{PV,N} = \frac{R_P + R_S}{R_P} I_{SC,N} \quad (2.8)$$

$$R_{p,\min} = \frac{V_{mp}}{I_{SC,N} - I_{mp}} - \frac{V_{OC,N} - V_{mp}}{I_{mp}} \quad (2.9)$$

$I_{or}$  : courant de court-circuit de la cellule à la température et l'éclairement de référence ;

$T$  : température de la jonction des cellules PV [°K] ;

$T_n$  : température de référence des cellules PV [°K] ;

$a$  : facteur d'idéalité de la jonction ;

$E_g$  : énergie de gap [ev] ;

$R_S$  : résistance série ;

$v$  : tension de sortie ;

$I_p$  : courant à travers la résistance  $RP$  ;

$R_p$  : résistance shunt

Notons que  $R_S$  représente la résistance de masse du matériau semi-conducteur, ainsi les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules et  $R_p$  représente les fuites autour de la jonction p-n dues aux impuretés

### II.3 caractéristiques du GPV

Les caractéristiques  $I=f(V)$  et  $P=f(V)$  de la cellule solaire ou du générateur photovoltaïque, sont très importantes. Elles peuvent être mesurées, ou reproduites par des modèles mathématiques ou électriques représentatifs, en utilisant des logiciels de simulation. Cependant, dans notre étude, On a utilisé l'environnement MATLAB/Simulink.

Les simulations effectuées dans cette partie sont basées sur les données du constructeur du module KYOCERA KC200GT.

Les données utiles dans les conditions standards sont consignées dans le tableau 2.1

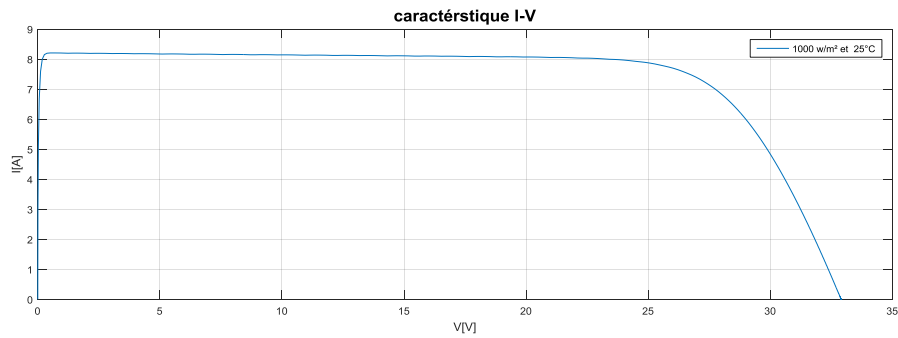
#### Présentation du module KYOCERA KC200GT

Paramètres de module	Valeur de chaque paramètre
Nombre des cellules en série $N_s$	54
Tension maximale $V_r$ à PPM (V)	26.3
Tension en circuit ouvert $V_{oc}$ (V)	32.9
Courant maximal $I_r$ à PPM (A)	7.61
Courant de court-circuit $I_r$ (A)	8.21

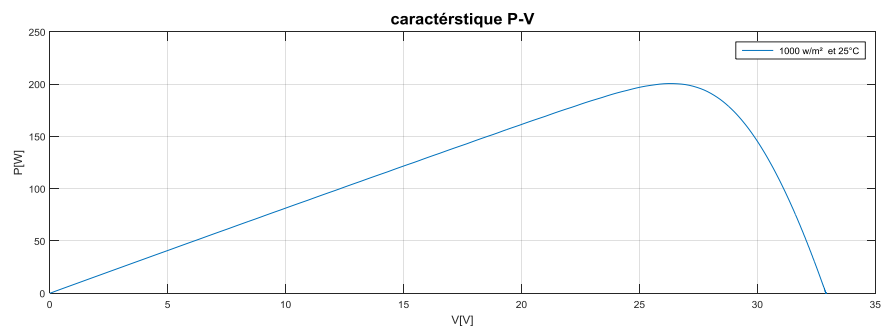
**Tableau 2.1** Valeurs des paramètres de simulation

Pour commencer, nous avons présenté par les figures 2.3 et 2.4, les caractéristiques du courant et de la puissance toutes les deux en fonction de la tension et ce correspondement aux conditions standards, soient pour une température  $T=25C^\circ$  et un éclairement  $E=1000w/m^2$ .





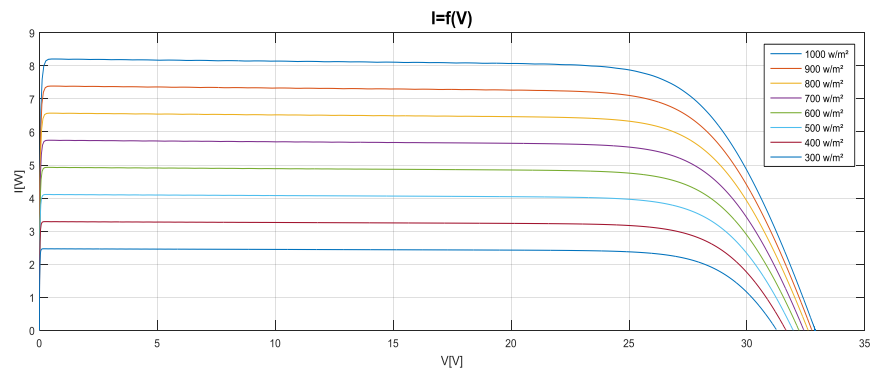
**Fig 2.3** Caractéristique  $I=f(V)$



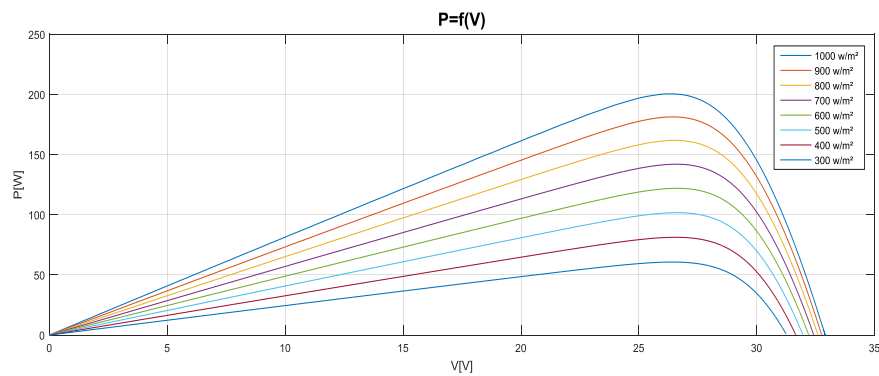
**Fig 2.4** Caractéristique  $P=f(V)$

### II.3.1 Influence de l'éclairement

En faisant varier l'éclairement entre  $300 \text{ w/m}^2$  et  $1000 \text{ w/m}^2$  avec un pas de 100, la caractéristique ( $I_{pv}=f(V_{pv})$ ) est donnée par les figures (II. (6,7)). On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.



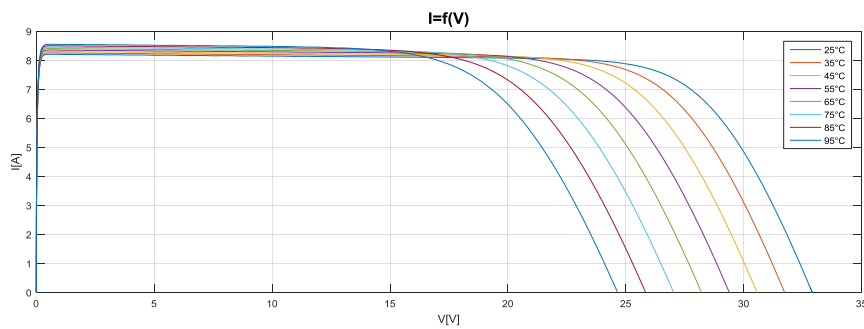
**Fig 2.5** Caractéristiques  $I=f(V)$  pour différents éclairements



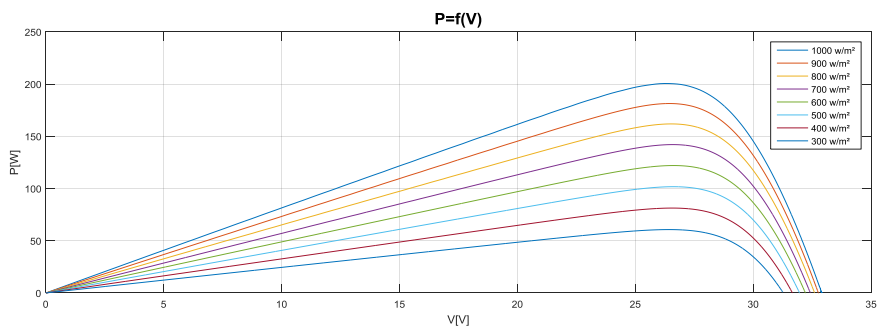
**Fig 2.6** Caractéristiques  $P=f(V)$  pour différents éclairements

### II.3.2 Influence de la température

Les caractéristiques de la puissance et du courant en fonction de la tension du panneau photovoltaïque sont illustrées, respectivement, par les figures 2.8 et 2.9. On remarque que la température à une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue.



**Fig 2.7** Caractéristiques  $I=f(V)$  pour différents températures



**Fig 2.8** Caractéristiques  $P=f(V)$  pour différents températures

## II.4 Constitution d'un générateur photovoltaïque

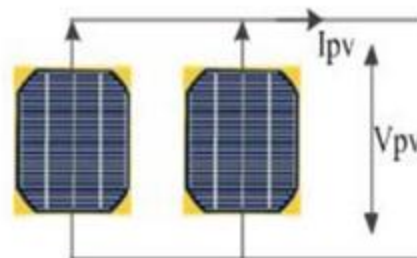
Les cellules photovoltaïques connectées en série/parallèle forment un générateur photovoltaïque (GPV). Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera [14].

### II.4.1 connexions de Cellules Photovoltaïques en Parallèle

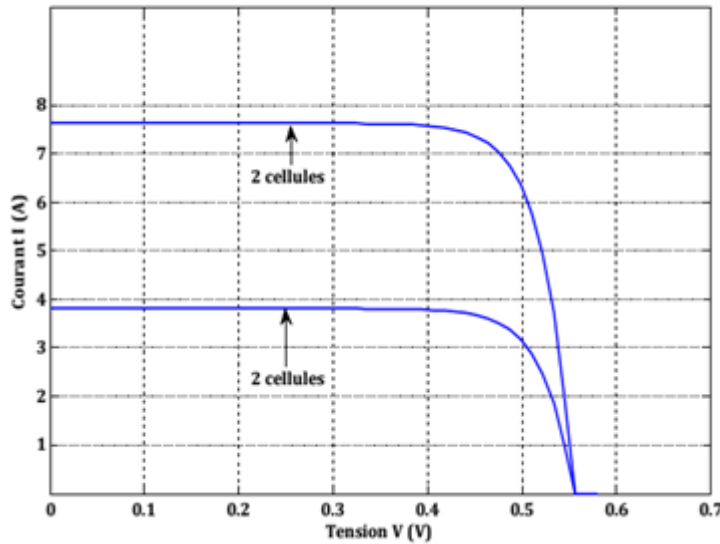
Dans ce cas, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée. Les figures 2.13 et 2.14 Montrent les caractéristiques résultantes ( $I_{PCC}, V_{PCO}$ ) obtenues en associant en parallèle (indice  $p$ )  $N_p$  cellules identiques :

$$I_{PCC} = N_p * I_{CC} \quad (2.10)$$

$$V_{PCO} = V_{CO} \quad (2.11)$$



a) Schéma de branchement



b) Caractéristiques I-V

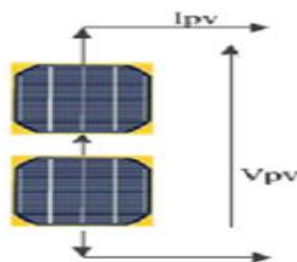
Fig 2.9 Schéma et caractéristique de deux (2) cellules PV en parallèles

### II.4.2 Connexion de Cellules Photovoltaïques en Série

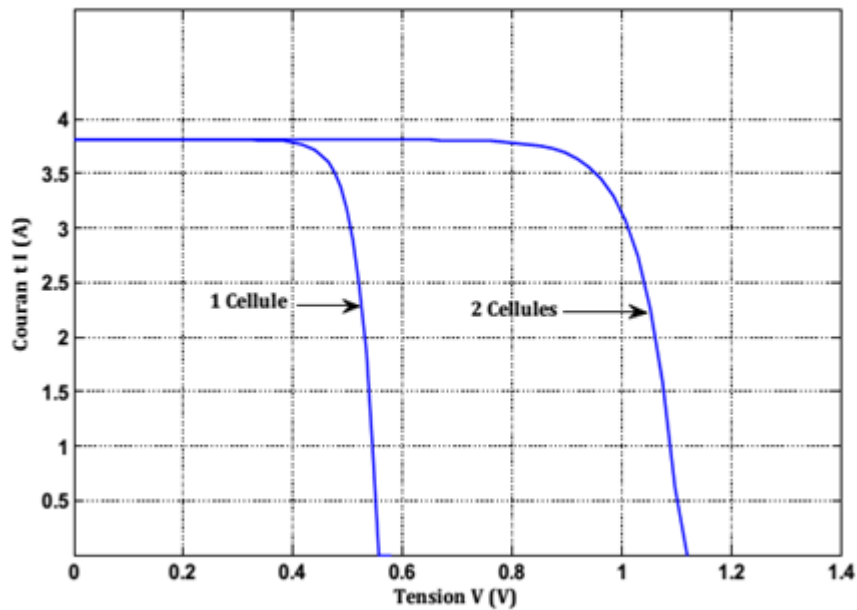
Pour la connexion en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. Figure 2.12 et 2.13, montre les caractéristiques résultantes ( $I_{scc}, V_{sco}$ ) obtenues en associant en série (indice s)  $N_s$  cellules identiques ( $I_{cc}, V_{co}$ ) :

$$I_{scc} = I_{cc} \tag{2.12}$$

$$V_{sco} = N_s * V_{co} \tag{2.13}$$



a) Schéma de branchement



b) Caractéristiques I-V

Fig 2. 10 Schéma et caractéristique de deux (2) cellules PV en série

### II.4.3 connexion mixte de Cellules Photovoltaïques

Les panneaux photovoltaïques sont constitués par des groupes de cellules connectées en série. Chacun est constitué de cellules photovoltaïques connectées en série [15].

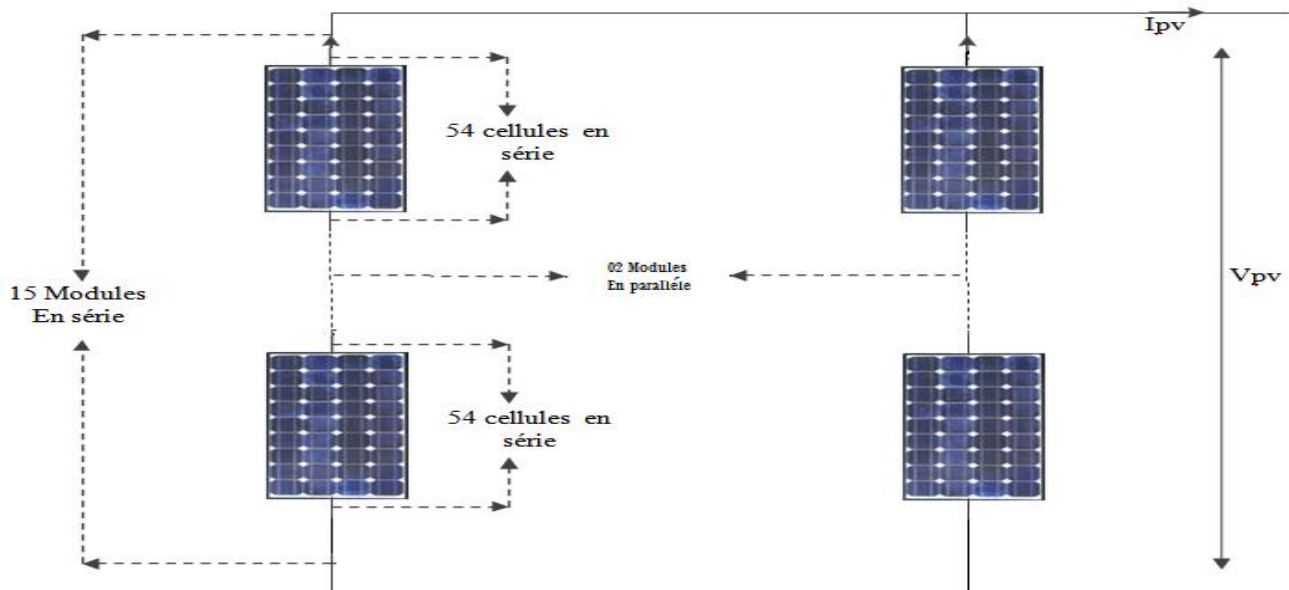
Ceci étant, le courant est exprimé par la relation suivante :

$$I = I_{pv}N_P - I_0N_P \left[ \exp \left( \frac{V + R_s \left( \frac{N_S}{N_P} \right) I}{V_t a N_S} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \left( \frac{N_S}{N_P} \right) I}{R_P \left( \frac{N_S}{N_P} \right) I} \quad (2.14)$$

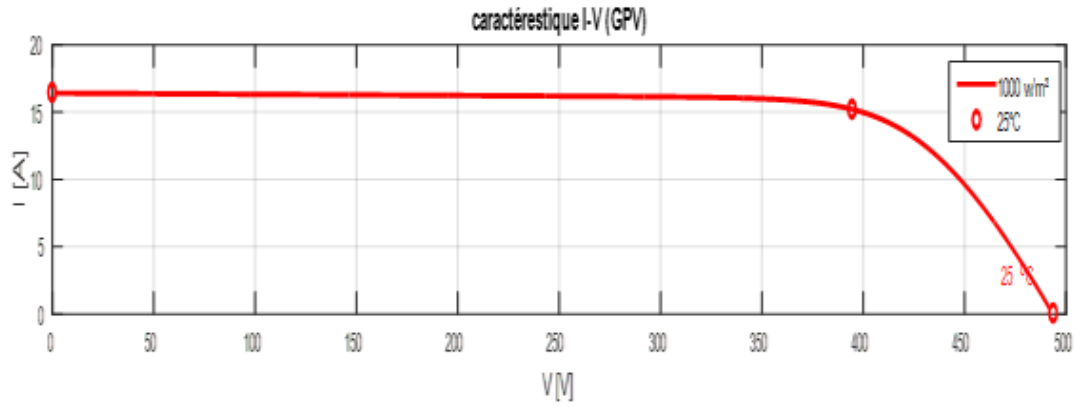
Ou, dans notre étude, on considère les paramètres donnés par le tableau 2.2

<i>Paramètres de GPV</i>	<i>V valeur de chaque paramètre</i>
<i>Nnombre de modules en série Ns</i>	15
<i>Nombre de modules en parallèle Np</i>	2
<i>Tension maximale Vr à PPM (V)</i>	$26.3*15=394.5$
<i>Tension en circuit ouvert Voc (V)</i>	$32.9*15=445$
<i>Courant maximal Ir à PPM (A)</i>	$7.61*2=15.22$
<i>Courant de court-circuit Icc (A)</i>	$8.21*2=16.42$

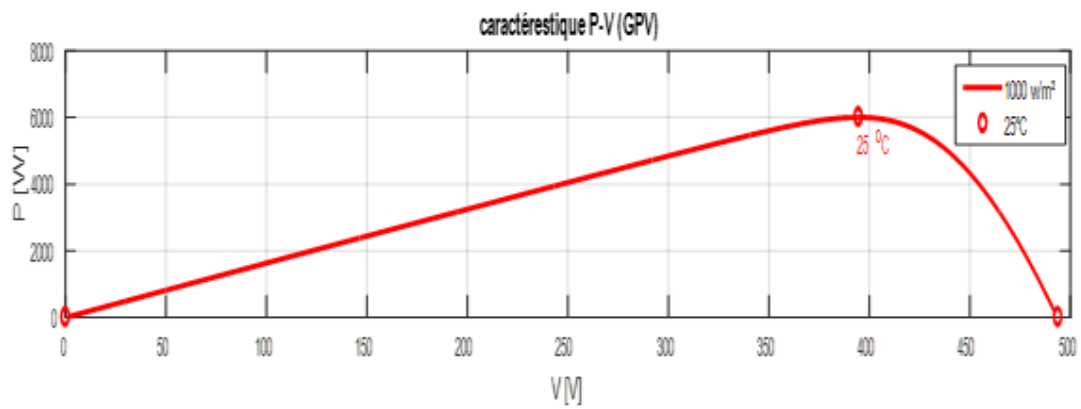
**Tableau 2.2** paramètres du PV



**Fig 2.11** Schéma générateur photovoltaïque



**Fig 2.12** Caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque



**Fig 2.13** Caractéristique P-V d'un générateur photovoltaïque



## II.5 Conclusion

A travers ce deuxième chapitre, nous avons mis le point sur la façon de former un panneau photovoltaïque à base de cellules photovoltaïque puis, en considérant un type de panneau. Nous avons simulé les caractéristiques du GPV et aussi présenté leurs fondamentales spécificités. Il ressort toutefois que le GPV en régime optimal, il est nécessaire d'utiliser un étage d'adaptation entre le PV et la charge.

L'étude de cet étage d'adaptation fera l'objet du prochain chapitre.

# **Chapitre III**

---

## **Convertisseur DC-DC**

---

## Chapitre III

### Convertisseur continu-continu

#### III.1 Introduction

Les stratégies de gestion de l'énergie photovoltaïque et du système de conversion d'énergie est un élément très important dans l'amélioration de l'efficacité. Parmi les stratégies, la méthode pour suivre la puissance maximale du GPV dite Méthode de suivi du Point de Puissance Maximale (MPPT) est amplement utilisée. Elle permet de trouver automatiquement la tension maximale ou le courant maximal du module PV au cours de lesquelles il fonctionnera pour atteindre le maximum de puissance quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation). On distingue de MPPT classiques et intelligents. [16] [17], dont généralement, la structure du système de conversion photovoltaïque est basée sur des blocs modulaires, comme le montre ci-dessous :

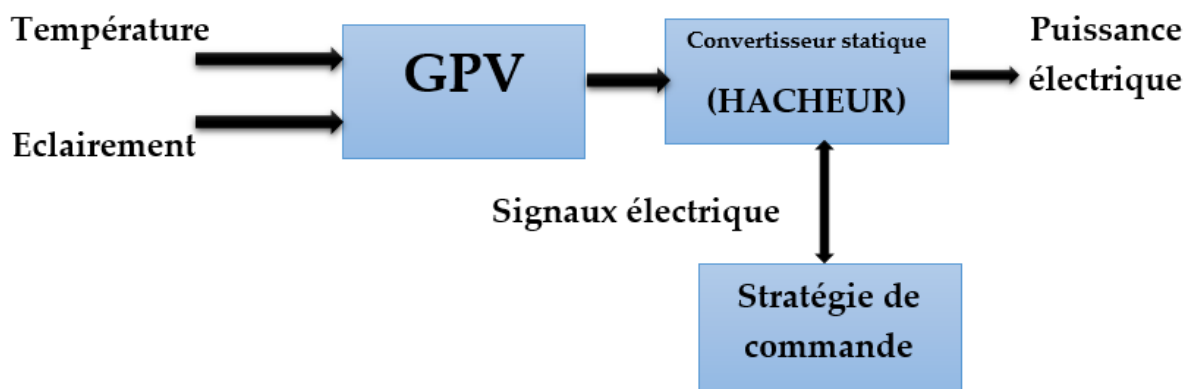


Fig 3.1 Système de conversion photovoltaïque

Alors, nous allons présenter d'abord l'ensemble hacheur système de commande et, étudier le fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque, à savoir rechercher le point de puissance maximale (MPPT).

### III.2 Fonctionnement d'un générateur PV à sa puissance maximale

La puissance produite par un GPV varie fortement en fonction de l'éclairement ( $E$ ), de la température ( $T$ ), et du vieillissement du système. Il faut donc assurer à concilier ces comportements avec ceux propres à une charge. Dans ces conditions, pour qu'une connexion source- charge soit possible, un point de fonctionnement correspondant à l'intersection des deux caractéristiques électriques doit exister. Soit une connexion directe entre un GPV et une charge résistive ( $R$ ), [18], comme le montre dans la figure 3.2.

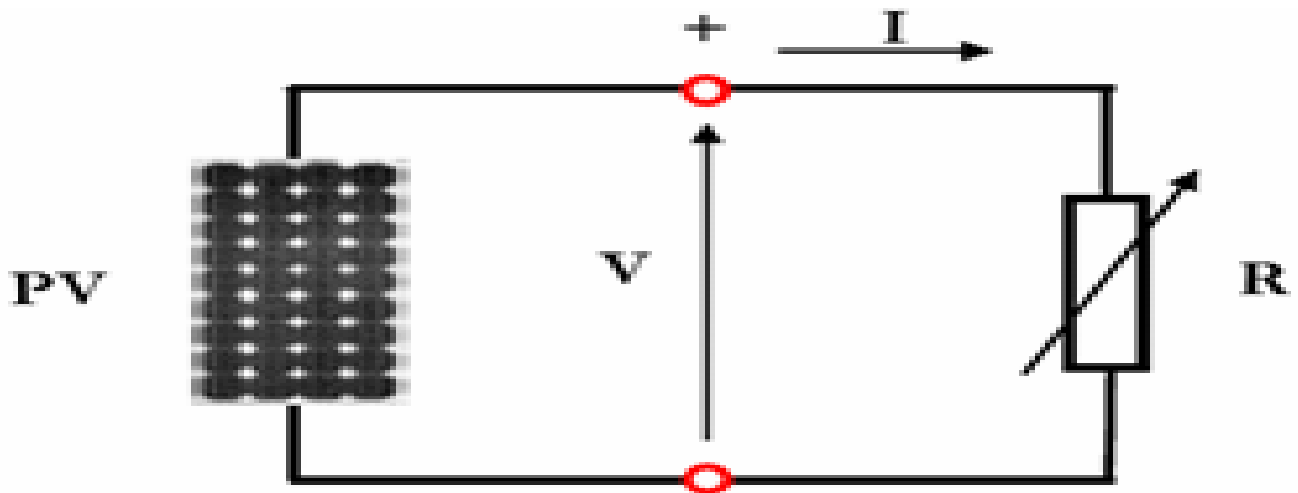


Fig 3.2 Connexion directe GPV – charge

Pour que le GPV fonctionne en régime optimal, la solution communément adoptée est d'insérer un hacheur boost qui joue le rôle d'adaptateur source-charge [19].

### III.3 Hacheurs

#### III.3.1 Type des hacheurs

Les hacheurs sont des convertisseurs continu/continu qui ont pour but de contrôler le transfert et l'écoulement de l'énergie entre les panneaux solaires et la charge. Ils permettent de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Ils sont souvent utilisés comme une interface d'adaptation qui assure la poursuite du point de puissance maximale selon des stratégies de contrôle spécifiques.

Les panneaux solaires et la charge peuvent être soit de nature capacitive (source de tension), soit de nature inductive (source de courant). La charge peut être de nature résistive aussi.

Les convertisseurs DC-DC sont classés en deux types : les convertisseurs non isolés et les convertisseurs isolés de la source [19]

**a) Non isolés de la source :**

Quatre configurations de base sont :

- Convertisseur abaisseur « BUCK »
- Convertisseur élévateur « BOOST »
- Convertisseur abaisseur- élévateur « BUCK-BOOST »
- Convertisseur « SEPIC », « Cuk »

**b) Isolés de la source :** Comme le convertisseur « Flyback »

La topologie Buck est employée pour les faibles tensions et la topologie Boost est employée pour augmenter la tension. Les systèmes de production de l'énergie emploient un convertisseur Boost pour augmenter la tension de sortie au niveau du service avant l'étage de l'onduleur. Puis, il y a des topologies capables d'augmenter et de diminuer la tension telles que le Buck-Boost, le Cuk, et le Sepic. Les convertisseurs DC-DC peuvent être vus comme des transformateurs DC-DC.[19]

En ce qui concerne notre travail, on considère le convertisseur élévateur "hacheur boost" dans le schéma de commutation est illustré par la figure 3.3.

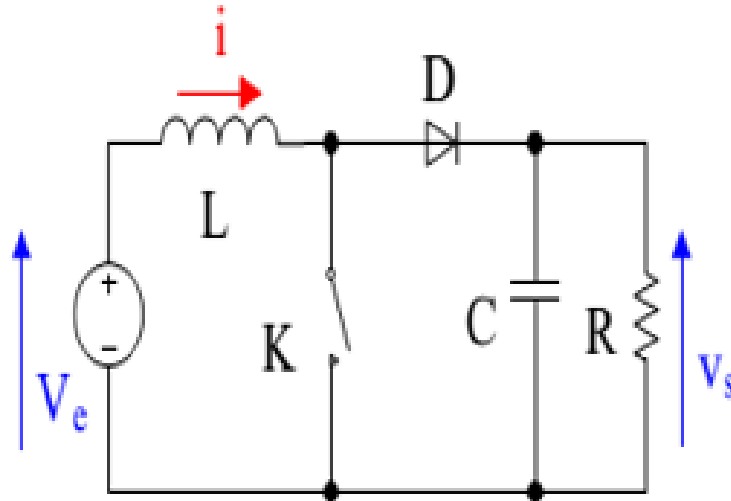
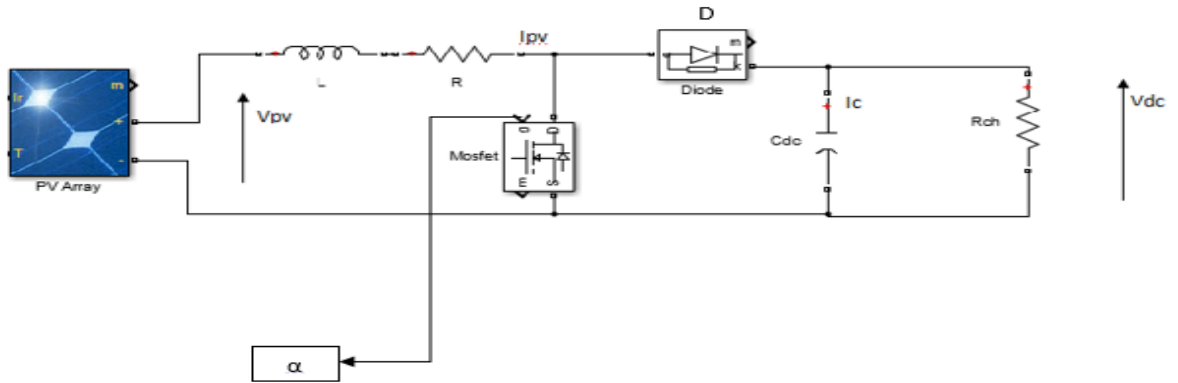


Fig 3.3 Convertisseur Boost (hacheur élévateur)

### III.3.2 Hacheur élévateur (Boost)

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge, lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est à droite du MPP.

La figure 3.4 illustre un système photovoltaïque adapté par un hacheur de type Boost alimentant une charge résistive  $R$ .



**Fig 3.4** Système photovoltaïque suivi par un hacheur de type Boost.

Il est composé d'un semi-conducteur de puissance (transistor MOSFET), d'une diode d'anti retour "D" et d'un condensateur de stockage  $C_{dc}$ .

Le fonctionnement dépend du rapport cyclique  $\alpha$ . or, il peut être représenté sous l'équation d'état suivante :

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{3.1}$$

Ou,  $x$  est le vecteur d'état définit par :

$$x = \begin{bmatrix} I_{pv} \\ V_{pv} \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

D'où  $I_{pv}$  et  $V_{pv}$  variable d'état.

Et,  $u$  est l'entrée de commande :

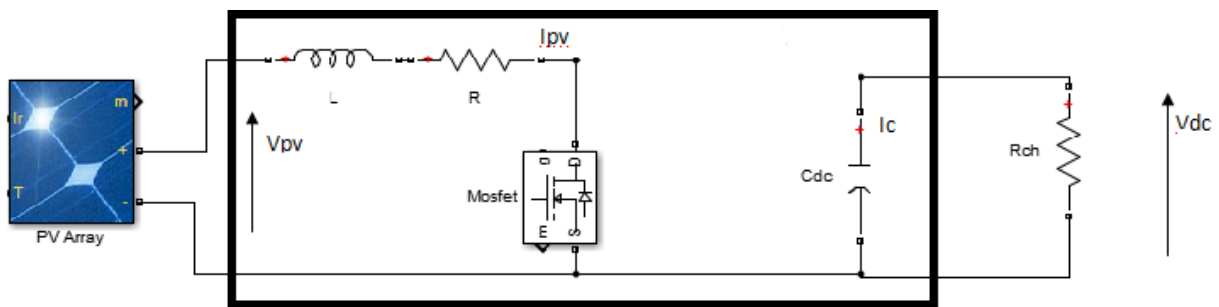
$$U = V_{pv} \tag{3.3}$$

En termes de modélisation, on distingue deux intervalles :

- Le première s'étale du  $[0 \div \alpha T_e]$

Où,  $T_e$  est la période d'échantillonnage.

Dans cet intervalle, le semi-conducteur "TR" est non bloqué (passant) et la diode est bloquée. Cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance "L" et par conséquent le stockage de l'énergie durant cet intervalle, la charge est déconnectée. D'où, le schéma de principe représenté par la figure 3.5.



**Fig 3.5** Convertisseur Boost durant l'état "ON".

Notons que  $R_{ch}$  est la résistance de la charge. Elle est identifiée par :

$$R_{ch} = \frac{V_{dc}}{I_{ch}} \quad (3.4)$$

$$\begin{cases} V_{pv} - l \frac{dI_{pv}}{dt} - R \cdot I_{pv} = 0 \\ V_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} \int I_{ch} dt \end{cases} \quad (3.5)$$

D'où sous forme d'état, en posant que :

$$X_1 = I_{pv} \quad \text{Et} \quad X_2 = V_{pv} \quad (3.6)$$

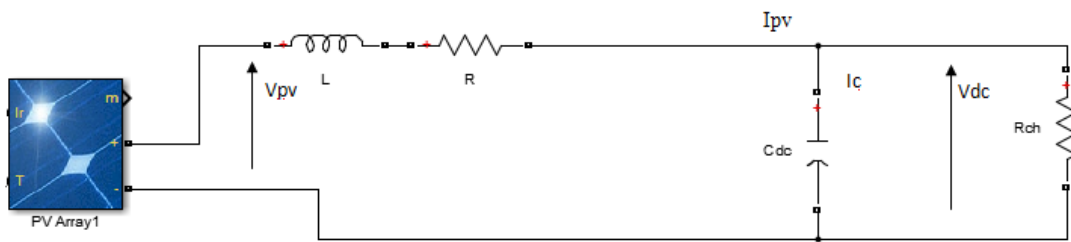


$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{ch} C_{dc}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_{pv} \quad (3.7)$$

$$\begin{cases} \dot{x} = A_1 x + B_1 V_{pv} \\ y = D_1 x \end{cases} \quad (3.8)$$

- Le second intervalle  $[\alpha T_e \div T_e]$

Dans cette période de fonctionnement, le transistor bloquée (non passant). Par contre le diode est passante, cela conduit au circuit équivalent suivant :



**Fig 3.6** Convertisseur Boost durant l'état "OFF".

De cette figure, on déduit les relations suivantes :

$$\begin{cases} V_{pv} - L \frac{dI_{pv}}{dt} - R \cdot I_{pv} - V_{dc} = 0 \\ C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = I_{pv} - \frac{V_{dc}}{R_{ch}} \end{cases} \quad (3.9)$$

Par conséquent

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C_{dc}} & -\frac{1}{R_{ch} C_{dc}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_{pv} \quad (3.10)$$

$$\begin{cases} \dot{x} = A_2x + B_2V_{pv} \\ y = D_2x \end{cases} \quad (3.11)$$

En considérant, le développement précédent, on représente le modèle globale correspondant aux deux (2) intervalles  $[0 \div T_e]$  en tenant compte du rapport cyclique ( $\alpha$ ).

$$\begin{cases} \dot{x} = (A_1x + B_1V_{pv})\alpha + (A_2x + B_2V_{pv})(1 - \alpha) \\ V_{dc} = D_1\alpha + D_2(1 - \alpha)x \end{cases} \quad (3.12)$$

Finalement, on a

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1-\alpha}{L}x_2 + \frac{1}{L}V_{pv} \\ \dot{x}_2 = \frac{1-\alpha}{L}x_1 - \frac{1}{RchCdc}x_2 \end{cases} \quad (3.13)$$

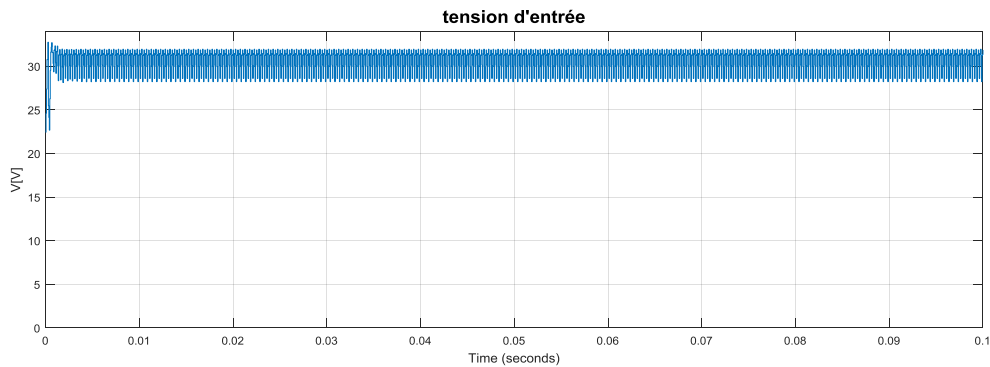
### III.3.3 Avantages de convertisseur Boost

Le convertisseur Boost est plus approprié aux systèmes photovoltaïques avec le suiveur du point de puissance maximale (MPPT), grâce à ces avantages :

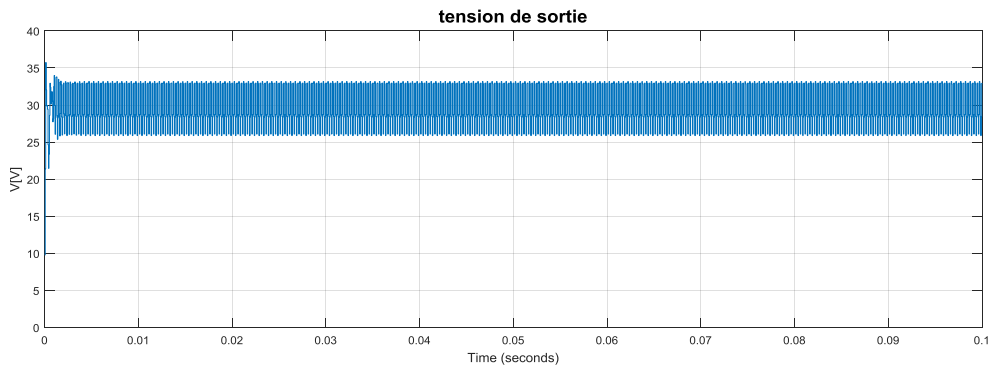
- ✓ le convertisseur Boost fonctionne au mode de courant continu extrayant autant de puissance que possible à partir de générateur photovoltaïque ;
- ✓ Ce convertisseur a l'avantage d'une ondulation du courant d'entrée limitée par l'inductance L.
- ✓ Il peut fonctionner même avec une tension d'entrée faible, ceci permet de récupérer le peu d'énergie disponible lors des périodes à faible éclairément. Aussi le convertisseur Boost est généralement employé pour obtenir une tension de sortie plus élevée, tandis que le convertisseur Buck est employé pour abaisser la tension de sortie.

### III.4 simulation

A l'issue de la modélisation dont les détails ont été faits précédemment, nous avons développé un programme de simulation sous le logiciel Matlab Simulink. Puis, la figure 3.7, montre l'évolution de la tension d'entrée et celle de sortie du hacheur. Par ailleurs, la figure 3.8, représente les puissances en entrée et en sortie du convertisseur.

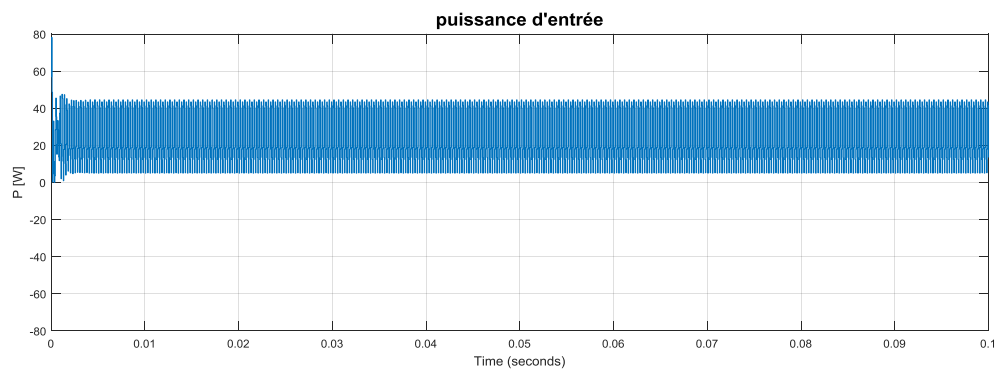


a) Tension d'entrée du convertisseur boost

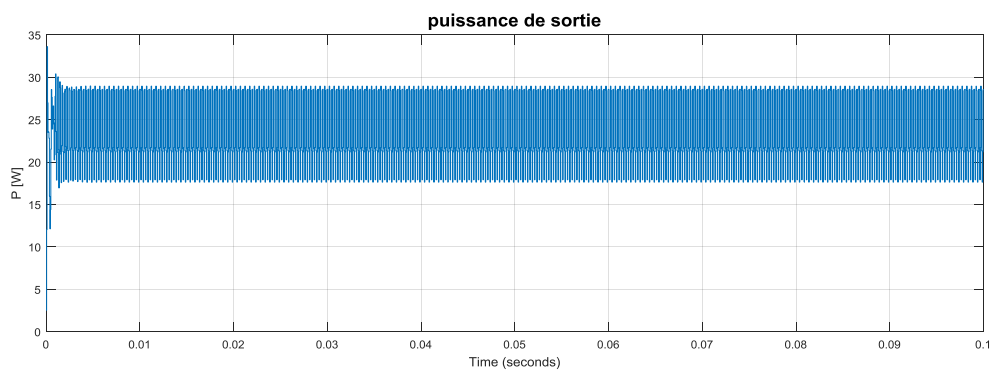


b) Tension de sortie du convertisseur boost

**Fig 3.7** Tensions d'entrée et de la sortie du hacheur



a) Puissance d'entrée du convertisseur boost



b) Puissance de sortie du convertisseur boost

**Fig 3.8** Puissance d'entrée et de la sortie du hacheur

### **III.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, on a étudié le module photovoltaïque et ses performances et les convertisseurs DC-DC utilisés dans les systèmes photovoltaïques, comme le hacheur survolteur.

On a présenté aussi le modèle du hacheur élévateur dans l'environnement Matlab/Simulink.

# **Chapitre VI**

---

**stratégies de commandes MPPT**

---

## Chapitre IV

### Stratégies de commandes MPPT

#### IV.1 Introduction

Ce chapitre présentera les principes de trois types de stratégies de commandes du point maximum de puissance. L'analyse de leurs performances sera considérée

#### IV.2 commande MPPT

La chaîne de puissance ou un générateur photovoltaïque alimente une charge continue en une adaptation avec un convertisseur statique de type hacheur élévateur commandé par une MPPT peut être représentée comme l'indique la figure 4.1. La commande MPPT varie le rapport cyclique du hacheur de telle sorte que la puissance fournie par le GPV soit la puissance maximale disponible. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP, mais en général

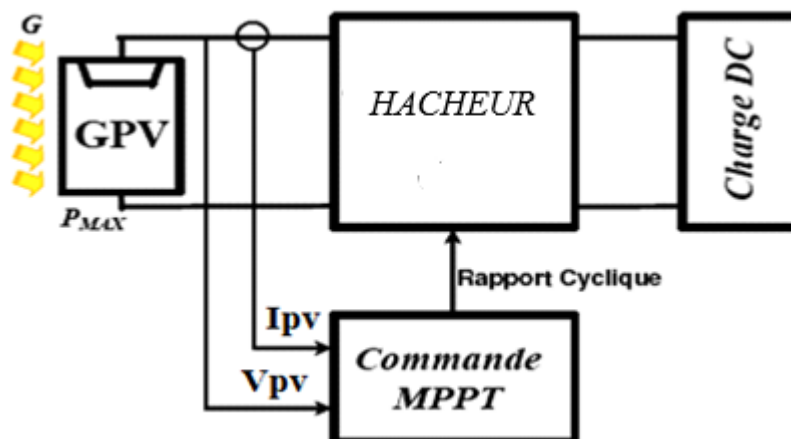


Fig 4.1 Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec hacheur

### IV.2.1 classification d'algorithmes du suiveur de point maximum

La classification des algorithmes du suiveur peut être basée sur la fonction des techniques ou des stratégies de commande utilisées. Ainsi, deux catégories peuvent être présentées : méthodes directes et indirectes.

#### IV.2.1.1 Méthodes contre réaction de tension

Dans ce cas, on se base sur le contrôle de la tension de fonctionnement des panneaux par la comparaison de cette tension avec une tension de référence. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique ( $\alpha$ ) de la commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI) afin d'annuler cette erreur.

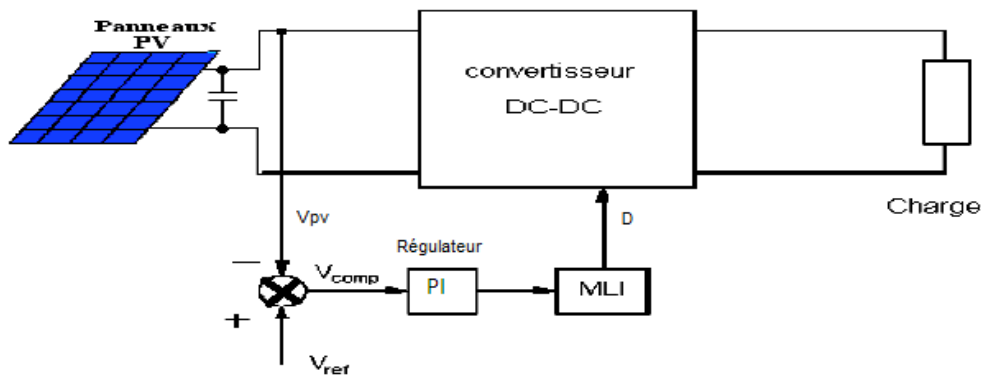


Fig 4.2 Méthode avec Contre-réaction de tension



Il y a trois types qui se distinguent par la nature de la tension de référence [22].

- Méthode à tension de référence fixe ;
- Méthode à tension de référence en fonction de  $V_{OC}$  ;
- Tension de référence externe (Cellule pilote) ;

#### IV.2.1.2 Méthodes à contre réaction de courant

##### A) Méthode à courant de référence en fonction du courant de court-circuit $I_{sc}$

Le courant de court-circuit du panneau solaire permet de connaître la valeur du courant optimal avec lequel le panneau doit fonctionner. Le courant optimal est proportionnel au courant de Court-circuit, cette proportionnalité est presque constante en fonction des conditions d'ensoleillement et de la température. La fonction  $I_{mp}=f(I_{sc})$  est pratiquement linéaire et elle est de forme  $I_{mp}=k*I_{sc}$ .

##### B) Méthode à courant de référence externe

Dans cette méthode, une cellule pilote ne peut être utilisée comme source d'information de courant de court-circuit de l'ensemble des panneaux car par le fait de court-circuiter en permanence cette cellule cause un échauffement supplémentaire qui faussera l'information générée et cause l'endommagement précoce de la cellule.

#### IV.2.1.3 Méthodes classiques de commande MPPT

Cette méthode est basée sur la recherche de l'extremum de la courbe de puissance  $v=f(V_p)$  obtenue directement de la caractéristique du (PV) [23], [24]. Le point de puissance maximale (PPM) est obtenu quand la dérivée de la puissance par rapport à la tension s'annule, soit

$$\frac{dp_v}{dV_p} = 0 \quad (4.1)$$

### A) Algorithme perturbation et observation

C'est l'algorithme perturbation et observation (P and O) de poursuite du PPM est le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de  $V_{ref}$  où en agissant directement sur le rapport cyclique du hacheur, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie de panneau [23]. La figure 4.3 présente le principe de suivi de point maximum et l'algorithme est décrite par la figure 4.4.

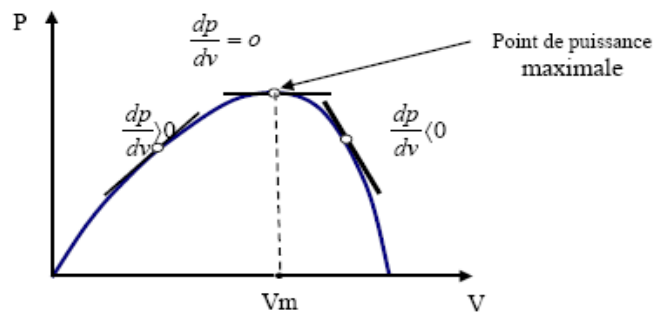


Fig 4.3 Méthode « perturbation et observation »

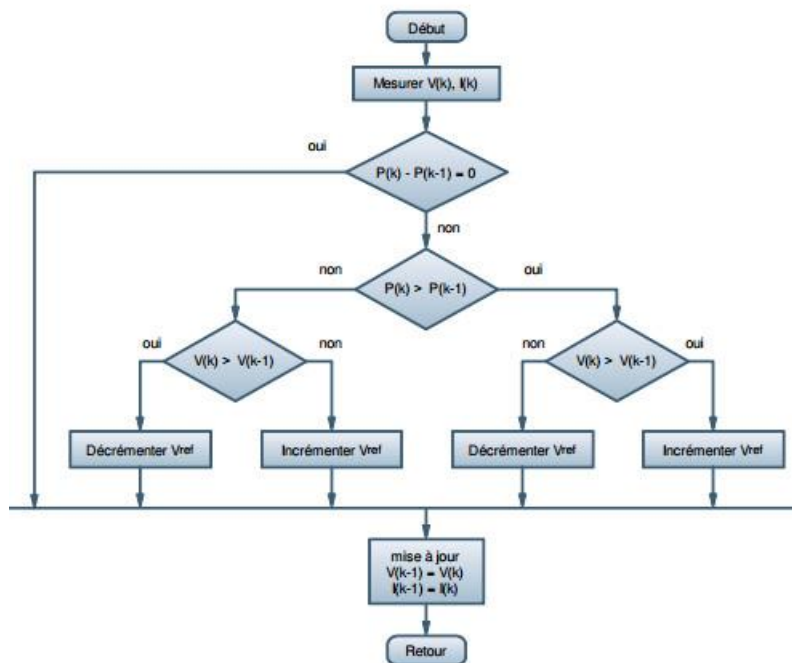
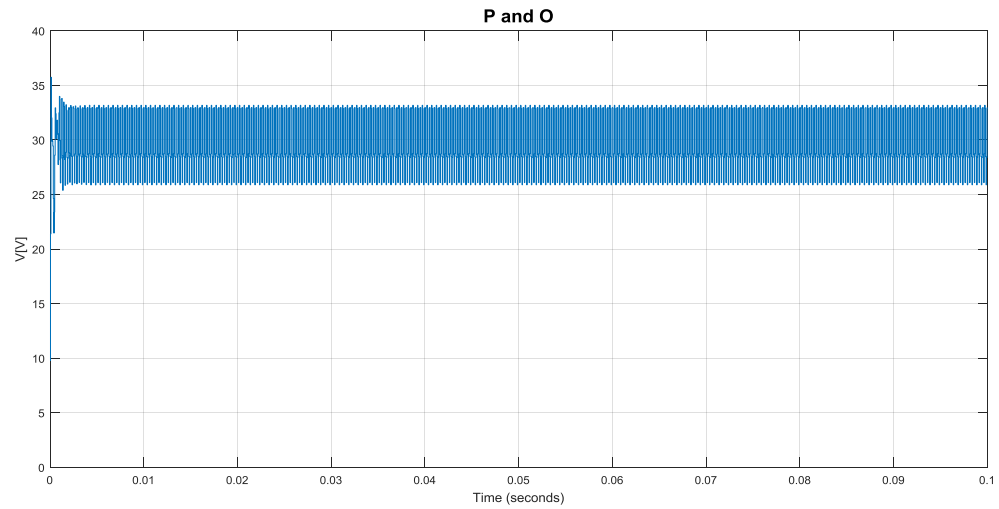


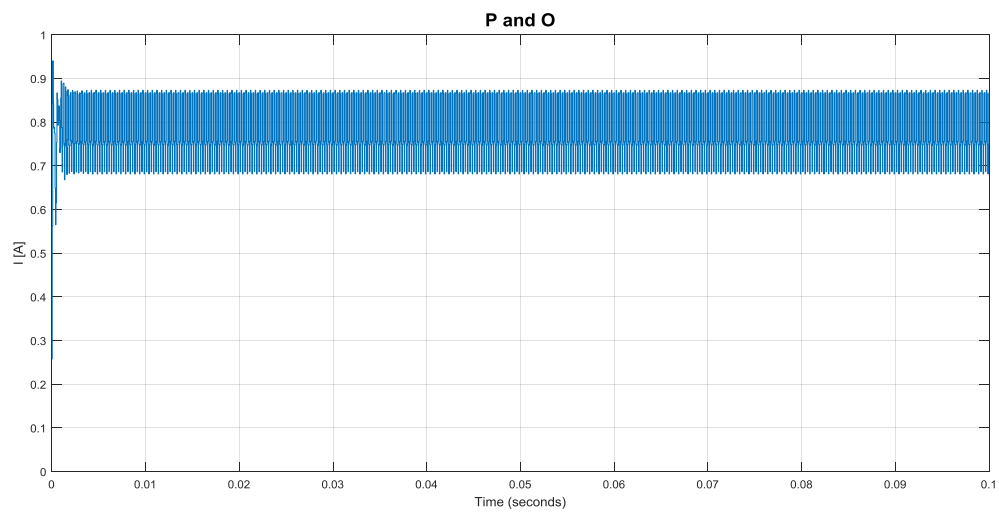
Fig 4.4 Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation.

Cependant, la méthode de P&O est présente l'inconvénient que, si une augmentation brutale de l'ensoleillement est produite on aura une augmentation de la puissance du panneau, l'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qui l'éloigne du vrai point de puissance maximale. Ce processus continu jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement où il revient au vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance [25].

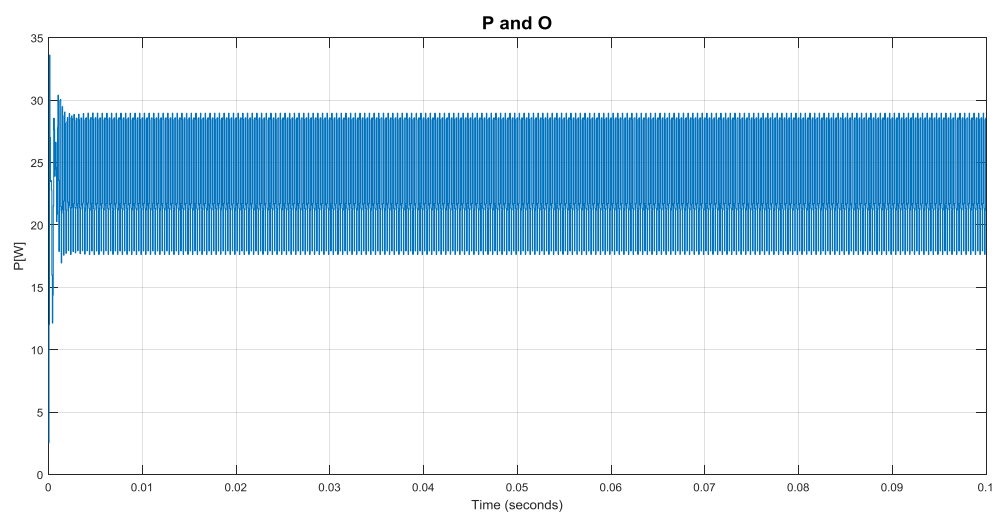
#### **A.1) Résultat de simulation**



*a) Tension*



*b) Courant*



*c) Puissance*

**Fig 4.5 a) :  $V(t)$  b) :  $I(t)$  c) :  $P(t)$**

### B) Méthode par incrémentation de conductance

L'algorithme par incrémentation de conductance se résulte en dérivant la puissance du panneau photovoltaïque par rapport à la tension et en mettant le résultat égal à zéro [26]. Ceci peut être décrit par les équations suivantes :

$$\frac{dp_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d(V_{pv} \cdot I_{pv})}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \quad (4.2)$$

$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = -\frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (4.3)$$

Le  $\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$  : terme représente l'opposé de la conductibilité instantanée du panneau photovoltaïque,

Et  $\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}}$  : représente le terme d'incrément de conductance. [27]

Par conséquent, pour le point de puissance maximum (PPM), ces deux termes peuvent être égaux mais de signes opposés. Si le point de fonctionnement ne coïncide pas avec le point (PPM), l'inégalité de l'équation (4.3) indique la position de la tension de fonctionnement si elle est plus grande ou inférieure à la tension du point de puissance maximum (PPM) [28].

$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}, \left(\frac{dP}{dV} = 0\right) \quad (4.4)$$

$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} > -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}, \left(\frac{dP}{dV} > 0\right) \quad (4.5)$$

$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} < -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}, \left(\frac{dP}{dV} < 0\right) \quad (4.6)$$

D'où l'organigramme représenté par la figure suivante :

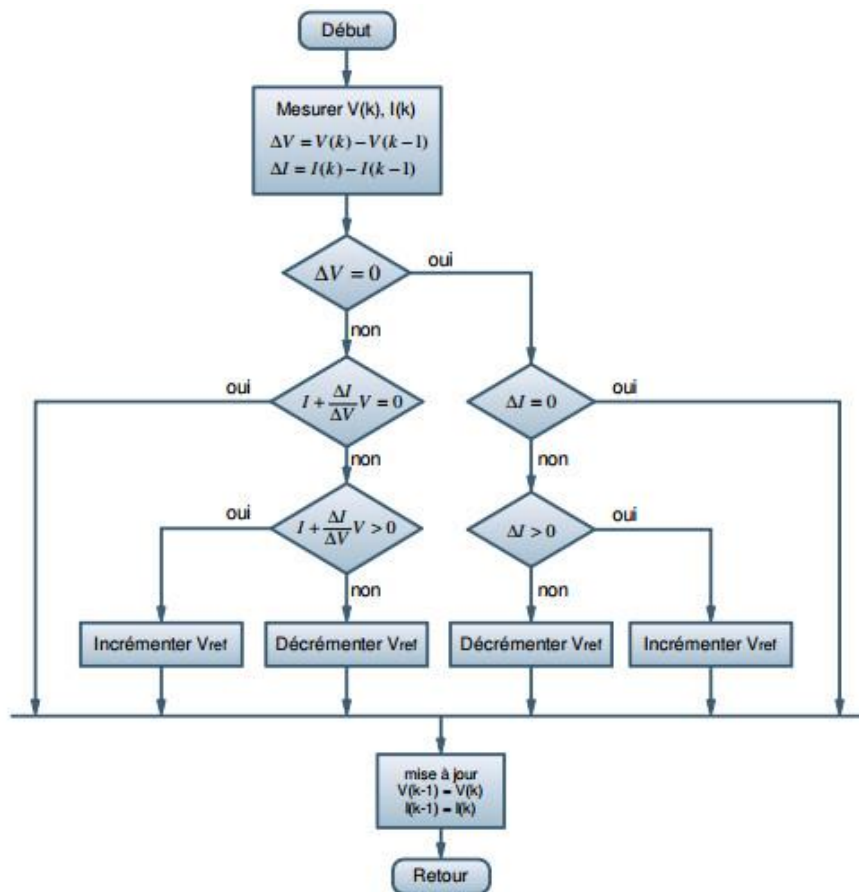
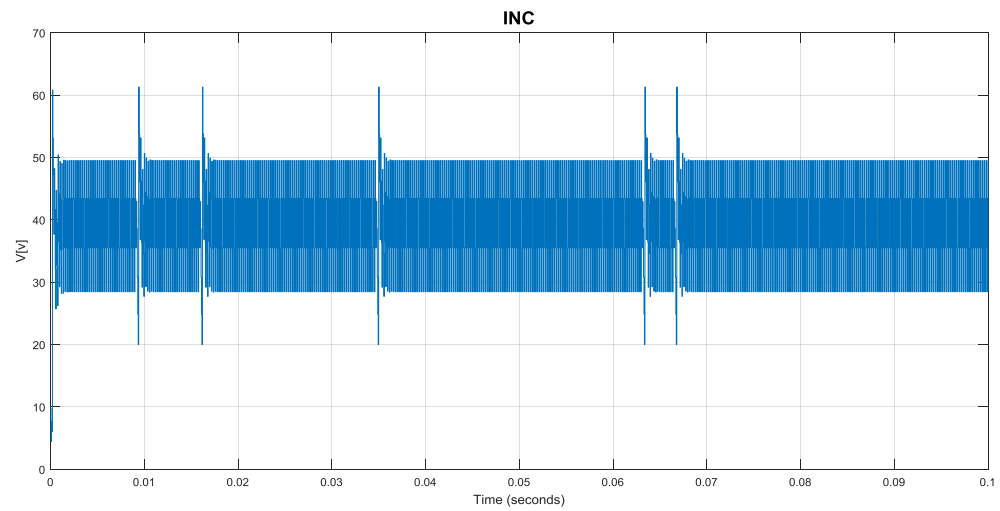
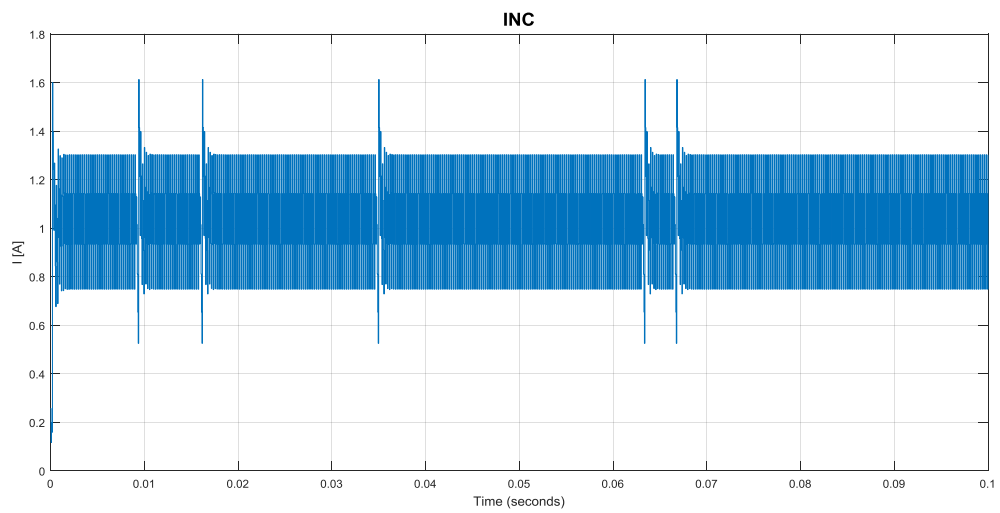


Fig 4.6 Organigramme de l'algorithme incrémentation de conductance

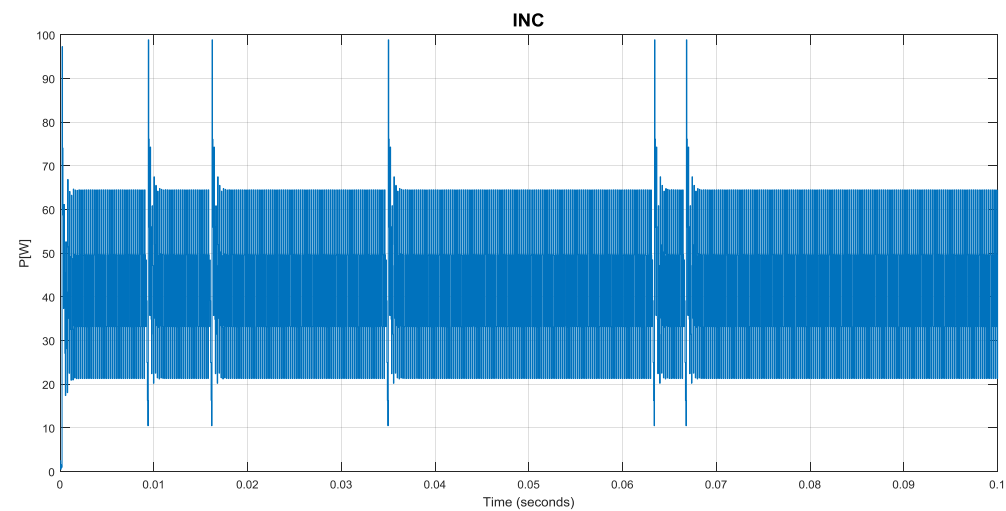
### B.1) Résultat de simulation



a) Tension



b) Courant



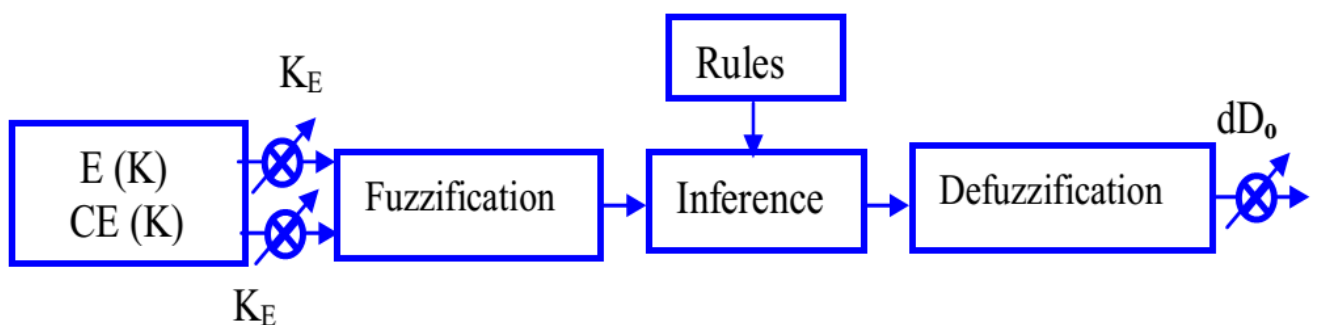
c) Puissance

**Fig 4.7 a) :  $V(t)$  b) :  $I(t)$  c) :  $P(t)$**

### C) Méthodes modernes de commande

Elle est basée sur la théorie de la logique floue [24].

Le contrôleur flou comporte les trois blocs suivants : Fuzzification des variables d'entrées par l'utilisation des fonctions trapèze et triangulaire, ensuite l'inférence où ces variables fuzzifiées sont comparées avec des ensembles prédéfinis pour déterminer la réponse appropriée. Et enfin la défuzzification pour convertir les sous-ensembles fuzzifiés en valeurs en utilisant la défuzzification cent roide. La structure de base de notre contrôleur flou est donnée par la figure suivante :



**Fig 4.8** Schéma synoptique général d'un contrôleur flou

Calcul de la variation de cette commande est par les étapes suivantes :

#### C.1) Fuzzification

La commande est déterminée sur la base de la satisfaction de deux critères concernant deux variables d'entrées de contrôleur proposé, à savoir l'erreur( $E$ ) et le changement d'erreur( $CE$ ), à un instant d'échantillonnage  $k$ .

Les variables  $E$  et  $CE$  sont exprimés comme suit :

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (4.7)$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \quad (4.8)$$



Où  $P(k)$  et  $V(k)$  sont la puissance et la tension de module PV, respectivement. Par conséquent,  $E(k)$  est zéro au point de puissance maximale du module PV. Ces variables d'entrée sont exprimées en termes de variables ou étiquettes linguistiques telles que le  $GP$  (grand positif),  $PP$  (petit positif),  $ZO$  (zéro),  $PN$  (petit négatif),  $GN$  (grands négatifs) en employant les sous-ensembles flous de base [29].

### C.2) Méthode d'inférence

Le tableau 4.1 montre les règles du contrôleur flou, ou toutes les entrées de la matrice sont les ensembles flous de l'erreur ( $E$ ), le changement de l'erreur ( $CE$ ) et le changement du rapport cyclique ( $dD$ ) au convertisseur. Dans le cas de la commande flou, la règle de la commande doit être conçue pour que la variable d'entrée  $E$  doive toujours être zéro.

$E(k)$	$CE(k)$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB		ZE	ZE	PB	PB	PB
NS		ZE	ZE	PB	PB	PB
ZE		PS	ZE	ZE	ZE	NS
PS		NS	NS	NS	ZE	ZE
PB		NB	NB	NB	ZE	ZE

Tableau 4.1 Table de règles à cinq classes (matrice d'inférences)

Les fonctions d'appartenance adaptées par l'erreur ( $E$ ) et la variable de l'erreur sont illustrées par la figure suivante :

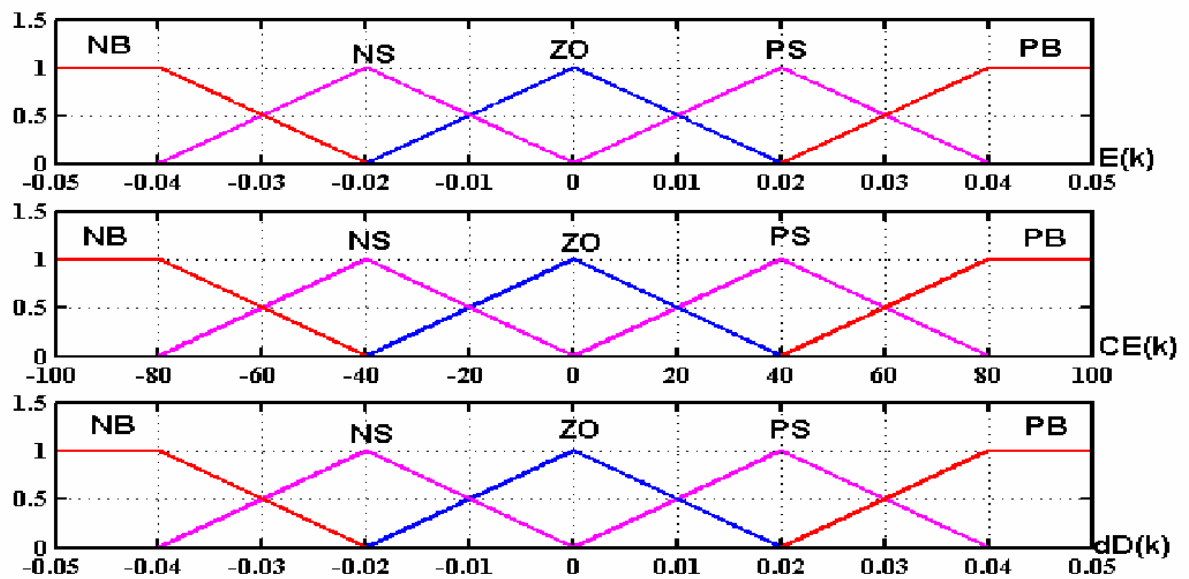


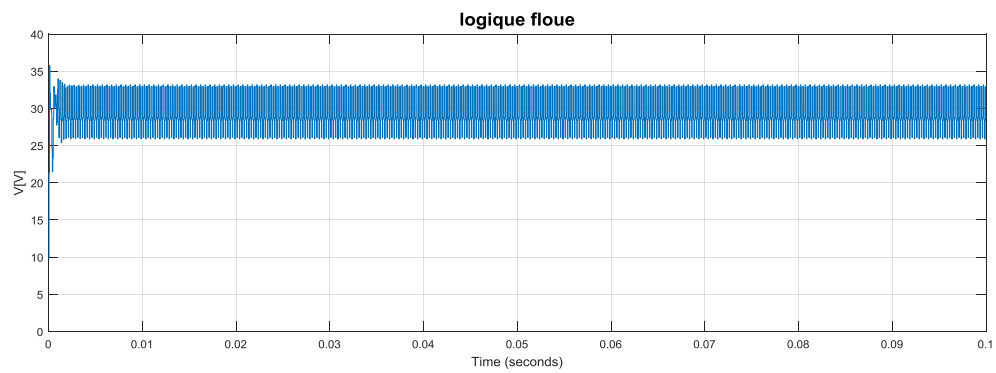
Fig 4.9 Fonctions d'appartenance de chacune des variables linguistiques

### **C.3) Défuzzification**

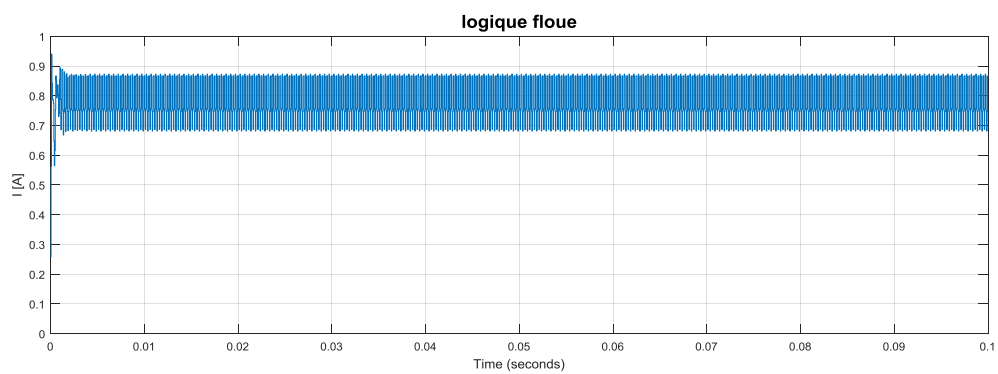
La défuzzification peut être fonctionné normalement par deux algorithmes [30] :

- La méthode de critère maximale (MCM)
- La méthode centre de gravité

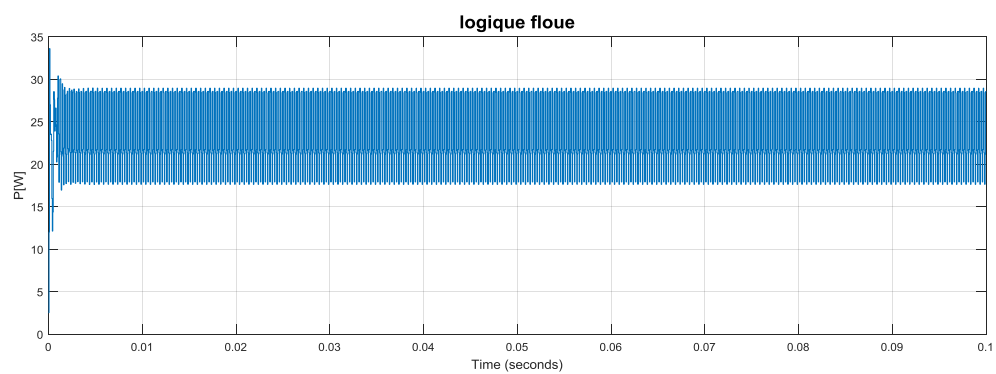
### **C.4) Résultat de simulation**



*a) Tension*



*b) Courant*



*c) Puissance*

**Fig 4.10** *a) : V(t) b) : I(t) c) : P(t)*

D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque que le contrôleur flou conduit à des meilleures performances, avec l'absence des oscillations dans le régime permanent, et un temps de réponse plus rapide.

Le tableau suivant résume les principales spécifications des différents algorithmes MPPT précédemment étudiés. Nous avons évalué et comparé ces algorithmes en termes de connaissance technique des paramètres du panneau PV, complexité, rapidité et précision.

<b>Algorithmes MPPT</b>	<b>P&amp;O</b>	<b>INC</b>	<b>LF</b>
<b>Type de Capteurs utilisés</b>	1 Tension 1 Courant	1 Tension 1 Courant	1 Tension 1 Courant
<b>Identification des paramètres du panneau PV</b>	Non nécessaire	Non nécessaire	Oui nécessaire
<b>Complexité</b>	Basse	Moyenne	Haute
<b>Nb itérations</b>	45	48	27
<b>Vit. Convergence</b>	Moyenne	Moyenne	Très rapide
<b>Précision</b>	95 %	98 %	99 %

**Tableau 4.2** *Comparaison des techniques MPPT*

### IV.3 Conclusion

Les résultats obtenus avec un contrôleur flou (technique non conventionnelle) sont meilleurs que ceux obtenus avec des algorithmes de contrôle conventionnels (P&O et IncCond). Ainsi le contrôle par logique floue peut être vu comme un pas vers un rapprochement entre le contrôle mathématique précis et la prise de décision humaine.

Aussi, ces résultats confirment le bon fonctionnement du contrôleur (IncCond) mais montrent un meilleur fonctionnement du contrôleur flou. Ce dernier a prouvé qu'il a de meilleures performances, temps de réponse rapide et erreur à l'état permanent très faible, et qu'il est robuste aux différentes variations des conditions atmosphériques.

## Conclusion Générale

Dans ce travail nous avons fait l'étude de la modélisation d'une chaîne photovoltaïque qui se compose d'un générateur photovoltaïque (avec une seule diode), un étage d'adaptation (convertisseur DC /DC Boost), une charge DC (résistance) et un étage de commande pour piloter le convertisseur (une première fois la commande MPPT classique en l'occurrence P&O, IncCond et puis la commande MPPT Floue).

Dans ce cadre nous avons présenté les systèmes d'énergie renouvelable en portant un intérêt particulier au système photovoltaïque qui est constitué essentiellement par un panneau photovoltaïque (PV) et un convertisseur DC-DC Boost. Le modèle électrique à une seule diode du PV décrit par le modèle mathématique. Pour le convertisseur Boost qui est dont le modèle Simulink. Différentes simulations, sous l'environnement Matlab/Simulink, sont réalisées pour mettre en évidence l'influence des variations des conditions climatiques (éclairage et température) sur le MPP où la puissance du système est maximale.

La commande MPPT soit classique (P&O, IncCond) ou Floue permet la meilleure connexion entre le panneau photovoltaïque (PV) et la charge et elle force le de faire fonctionner toujours au point de puissance maximale, cependant, l'étude comparative des résultats de simulation a permis de constater que la commande MPPT Floue conduit à des meilleurs performances (réduction du temps de réponse et de l'erreur en régime permanent).

Par ce travail, nous souhaitons d'avoir apporter une contribution à l'étude des caractéristiques photovoltaïques de la cellule solaire, l'étude des systèmes photovoltaïques autonomes et les commandes MPPT classiques et floue.

Comme perspective de ce travail, il serait intéressant de procéder à l'implémentation matérielle des techniques MPPT simulées, sur des systèmes à base de microcontrôleur ou DSP, afin de valider les résultats de simulation et confirmer les performances obtenues.

## Bibliographies

- [1]. A. Mohammed Ahmed, "Study of interconnecting issues of photovoltaic/wind hybrid system with electric utility using artificial intelligence", Electrical engineering dept., faculty of engineering, El-Minia University, 2006.
- [2]. B. Bendib, "Techniques conventionnelles et avancées de MPPT pour des applications photovoltaïques: étude comparative", Mémoire de Magister, Département d'Electronique, Université Ferhat Abbes-Sétif, 2007.
- [3]. N. Saadaoui, "Modélisation et extraction automatique des paramètres d'un générateur photovoltaïque", mémoire de Magister, département d'Electrotechnique, Université Ferhat Abbes-Sétif, 2010.
- [4]. U. Kassel, "Photovoltaic system technology", Germany, 2003, [www.uni-kassel.de/re](http://www.uni-kassel.de/re).
- [5]. S. Zeng, "Study on improving output current waveform of photovoltaic grid - connected system", IEEE, pp. 1-5, 2006.
- [6]. M.Z, F.Z.Zerhouni, "Optimisation d'un système à énergie verte avec validation pratique," Revue des energies renouvelables, vol. 11 , no. N°1, p. 41–49, 2008.
- [07] Laboratoire de recherche des énergies renouvelables <http://www.cder.dz>.
- [8]. J.E.Cotter, "P-type versus n-type silicon wafers: prospects for high-efficiency commercial silicon solar cells," IEEE, vol. 53, no. 8, pp. 1893-1901, 2006.
- [9]. N.Oleksiy, "Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigués," Ecole doctorale.Thèse de doctorat, 2005.
- [10]. F.Heroguel, "Les cellules photovoltaïques," Ecole normale supérieure, Lyon epreuve de projet, 2007.
- [11]. A.C. Pastor, "Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques," thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Toulouse 2005.
- [12]. Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli, Ernesto Ruppert Filho, "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays", IEEE Transactions on power electronics, vol.24,no.5, may2009
- [13] M.G.Villalva,J.R.Gazoli,E.RuppertF. " Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays",Brazilian Journal of Power Electronice,2009
- [14] H.S.Rauschenbach. "Solar cell array design hand book",Van Nostrand Reinhold, 1980.
- [15] J.Hyvarinen and J.Karila.New analysis method for crystalline silicon cells. InProc. 3rd World Conference. On Photovoltaic Energy Conversion, v.2,p .1521–1524, 2003.



- [16] I. Purnama, et al: "A Fuzzy Control Maximum Power Point Tracking Photovoltaic System". 2011 IEEE International Conference on Fuzzy Systems June 27-30, 2011.
- [17] V. Salas et al: "Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems", *Solar Energy Materials & Solar Cells* 90 (2006) 1555–1578.
- [18] C. Alonso : "Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie". Mémoire En vue de l'obtention de L'habilitation à diriger les recherches. 2003
- [19] R. Andoulssi: "étude d'une classe de système photovoltaïques par une approche bond graph : modélisation, analyse et commande". Thèse de doctorat université de Lille 2001.
- [20] M. Veerachary, et al, "Voltage-based maximum power point tracking control of PV systems", *IEEE Trans. AEROSP. Electron . Syst.*, vol. 38, pp. 262–270, Jan. 2002
- [21] Z. M. Salameh, F. Daghar, W.A. Lynch: "Step-down Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Systems ", *Solar Energy*, Vol. 46, N° 5, pp. 279-282, 1991
- [22] Z. Salameh S, D. Taylor, "Step-up maximum power point tracker for photovoltaic arrays", *Proc. Of the 1988 annual meeting of the American Solar Energy Society, Cambridge, USA*, pp. 409-414, 20-24 June 1988.
- [23] D. Petreus, et al: "A novel maximum power point tracker based on analog and digital control loops". *Solar Energy* 85 (2011) 588–600. 2007.
- [24] A. Zegaoui, M. Aillerie<sup>1</sup>, P. Petit<sup>1</sup>, J.P. Sawicki, A. Jaafar, C. Salame and J.P. Charles: "Comparison of Two Common Maximum Power Point Trackers by Simulating of PV Generators". *Energy Procedia* 6 (2011) 678–687
- [25] S.Ait-Cheikh, "Etude, investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques," mémoire de Magister, Ecole nationale polytechnique 2007.
- [26] F.Slama, "Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique", mémoire Magister, département d'Electrotechnique, Université de Sétif 2012.
- [27]. S.Kumari, "Comparison of maximum power point tracking algorithms for photovoltaic system," *International journal of advances in engineering & technology* (©IJAET) 2011.
- [28] Savita Nema, "Matlab / simulink based study of photovoltaic cells/modules/array and their experimental verification," *International journal of Energy and environment*", 2010.
- [29] M.Hatti, "contrôleur flou pour la poursuite du point de puissance maximum MPPT d'un système photovoltaïque". JCGE'08 Lyon, 16 et 17 décembre 2008.
- [30] C.Y. Won, D.H. Kim, S.C. Kim, W.S. Kim, H.S. Kim, "A new maximum power point tracker of photovoltaic arrays using fuzzy controller", *Proceedings of the IEEE Power elec. specialists conference*, pp.396-403, 1994.